



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE ARQUITECTURA Y URBANISMO

**Sistema Pasivo de Acondicionamiento Térmico: Evaluación
morfológica y de materialidad mediante simulaciones digitales
de un muro Trombe para la ciudad de Cuenca**

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
ARQUITECTO

Autor: Henry Marcelo Tenesaca Lojano

Director: Arq. Jefferson Torres Quezada, PhD

CUENCA - ECUADOR

2020

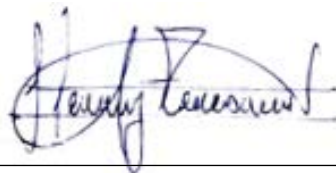
*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

Declaración

Yo, **Henry Marcelo Tenesaca Lojano**, con cédula de identidad 010682355-2, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. Que el trabajo aquí descrito es de mi autoría y soy responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en la presente investigación.
2. Que el trabajo es original, siendo resultado de mi trabajo personal, el cual no he copiado de otro trabajo de investigación, ni utilizado ideas, fórmulas, citas completas, ilustraciones, tablas, etc. sacadas de alguna publicación (en versión digital o impresa).
Caso contrario, referencio en forma clara y exacta su origen o autor.
3. Que el trabajo no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional.
4. Que el patrimonio intelectual del trabajo investigativo pertenece a la Universidad Católica de Cuenca.

Me hago responsable ante la universidad o terceros, de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado y asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello sometiéndome a las normas establecidas y vigentes de la UCACUE.



Henry Marcelo Tenesaca Lojano

Certificación

Certifico que el presente trabajo de investigación previo a la obtención del Grado de ARQUITECTO con el título: “*Sistema Pasivo de Acondicionamiento Térmico: Evaluación morfológica y de materialidad mediante simulaciones digitales de un muro Trombe para la ciudad de Cuenca*” ha sido elaborado por el Sr. **Henry Marcelo Tenesaca Lojano**, mismo que ha sido realizado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor, por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.



Arq. Jefferson Torres Quezada, PhD

Dedicatoria

El presente trabajo de investigación primeramente doy gracias a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado, por haberme permitido hacer realidad este sueño tan anhelado.

A mis padres Roberto y Rosario, que con su apoyo constante e incondicional, hoy ven realizado fruto de su esfuerzo. A mi padre, por enseñarme buenos valores y por sus consejos brindados durante este largo camino de formación profesional, y a mi madre, por su cariño, preocupación y compañía en el transcurso de mis días de estudio.

A mi hermano Cristhian, a mis hermanas; Nancy, Myriam, Diana y a mis bellas sobrinas; Karen, Evelyn, Daniela y Valentina por su bondad y cariño.

Henry Tenesaca

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, por inculcar en mí el ejemplo de trabajo y dedicación para poder alcanzar mis sueños.

Agradezco a los docentes de la carrera de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Católica de Cuenca, por haberme compartido sus conocimientos, de manera muy particular, al Arquitecto Jefferson Torres, director de mi tesis quien con su apoyo, paciencia y motivación ha logrado en mí que pueda terminar mis estudios con éxito.

A mis amigos, Adrián, Freddy, William, Paúl, Verónica, Katherine y Lisbeth les agradezco por todos los buenos y malos momentos de estudios que hemos compartido, y también por sus palabras de aliento que me han brindado en estos años de formación.

Finalmente, quiero agradecer a una persona muy especial en mi vida, que a pesar de la distancia y a las dificultades, me ha apoyado moralmente, motivándome a luchar arduamente, y, sobre todo, a no rendirme hasta ver cumplir mis objetivos.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a aquellas personas que me apoyaron y creyeron en mí.

Henry Tenesaca

Resumen

El cambio climático se ha convertido en una preocupación a nivel mundial, que ha generado grandes problemas ambientales, y que probablemente traiga consecuencias mayores para generaciones futuras. Este cambio climático depende directamente del incremento descontrolado de las emisiones de dióxido de carbono CO_2 , el cual se ha dado a partir de la revolución industrial y se ha intensificado en las últimas décadas. En la actualidad, el sector residencial y de la construcción tienen un alto impacto en la generación del CO_2 mundial, principalmente por el alto consumo energético que tienen las edificaciones con el fin de asegurar el confort térmico interior a través del uso de sistemas activos de energía.

Con base a esta problemática, esta investigación aborda estrategias pasivas devenidas de la Arquitectura Sostenible, con la finalidad de reducir el desconfort térmico interior en un clima frío, a través de la captación solar indirecta de los muros. De manera específica, esta tesis tiene como objetivo diseñar y comprobar la factibilidad de un muro Trombe para la ciudad de Cuenca, con énfasis en mejorar la temperatura interior y a reducir las demandas de calefacción, a través del estudio de sus variables morfológicas y de materiales. Para alcanzar este objetivo, en primera instancia se ha desarrollado una investigación bibliográfica para entender el funcionamiento y las variables que influyen en el comportamiento del muro Trombe. En segunda instancia, se ha establecido un muro Trombe tipo no ventilado, además de sus variables a estudiar, morfológicas (orientación, espesor), y de materiales (adobe, tapial, ladrillo) relacionadas al contexto de la ciudad de estudio. Por último, se realizaron las simulaciones energéticas, para a partir del Modelo de Estudio de muro Trombe comparar la influencia de las variables y sus variantes en dos parámetros de evaluación, el comportamiento de la temperatura interior y el consumo energético.

Según los resultados obtenidos se ha podido identificar cuáles son las variables con mayor impacto. Por un lado, en cuanto a la influencia sobre la temperatura interior, se ha concluido que durante los días de análisis el muro de adobe de 15cm con orientación ESTE, es el más adecuado ya que mantiene temperaturas interiores que varían desde los 17°C a 25°C durante casi todo el día. Sin embargo, en la evaluación energética realizadas para un periodo anual, los mejores resultados presenta el muro de adobe de 15cm con orientación OESTE. Además, se han evaluado otras variables de materiales como el uso del vidrio doble y la pintura de alta absorción solar, no obstante, no han tenido mayor repercusión en la reducción del desconfort interior ni en la demanda energética. Finalmente, se señala que con la implementación del muro Trombe propuesto se logra reducir la demanda energética por calefacción entre un 35 a 40 % en este clima.

Palabras clave : MURO TROMBE, TEMPERATURA INTERIOR, DEMANDA ENERGÉTICA, ADOBE, CUENCA-ECUADOR

Abstract

Climate change has become a global concern that has generated major environmental problems, and which will probably bring greater consequences for future generations. This climate change depends directly on the uncontrolled increase in carbon dioxide CO_2 emissions, which has occurred since the industrial revolution and has intensified in recent decades. Currently, the residential and construction sectors have a high impact on the generation of CO_2 worldwide, mainly due to the high energy consumption of buildings to ensure indoor thermal comfort through the use of active energy systems.

Based on this problem, this research addresses passive strategies resulting from Sustainable Architecture to reduce internal thermal discomfort in a cold climate, through indirect solar capture of the walls. Specifically, this thesis aims to design and verify the feasibility of a Trombe wall for the city of Cuenca, with an emphasis on improving the interior temperature and reducing heating demands, through the study of its morphological and material variables. To achieve this objective, in the first instance a bibliographic investigation has been developed to understand the functioning and the variables that influence the behavior of the Trombe wall. Second of all, a non-ventilated type of Trombe wall has been established, in addition to its morphological variables to study (orientation, thickness), and materials (adobe, mud, brick) related to the context of the study city. Finally, energetic simulations were carried out to compare the influence of the variables and their variants on two evaluation parameters, the behavior of the interior temperature and the energy consumption, using the Trombe Wall Study Model.

According to the results obtained, it has been possible to identify which are the variables with the greatest impact. On the one hand, regarding the influence on the interior temperature, it has been concluded that during the days of analysis the 15cm adobe wall facing EAST is the most suitable as it maintains interior temperatures that vary from $17^{\circ}C$ to $25^{\circ}C$ for most of the day. However, in the energy evaluation conducted for an annual period, the best results presented the 15cm adobe wall facing WEST. Additionally, other variables of materials such as the use of double glass and high solar absorption paint have been evaluated, however, they have not had a major impact on reducing interior discomfort or energy demand. Finally, it is highlighted that with the implementation of the proposed Trombe wall it is possible to reduce the energy demand for heating between 35 to 40 % in this climate.

Keywords: TROMBE WALL, INTERNAL TEMPERATURE, ENERGETIC DEMAND, ADOBE, CUENCA-ECUADOR.

Índice de Contenidos

| | |
|--|----------|
| Declaración | I |
| Certificación | II |
| Dedicatoria | III |
| Agradecimientos | IV |
| Resumen | V |
| Abstract | VI |
| Índice de Contenidos | VII |
| Lista de Figuras | X |
| Lista de Tablas | XIV |
| Introducción | XVII |
| Problemática | XVIII |
| Objetivos | XX |
| Justificación | XXI |
| Metodología | XXII |
| 1. Antecedentes Investigativos y Conceptos | 1 |
| 1.1. La Sostenibilidad y la Arquitectura | 2 |
| 1.2. El confort del usuario | 5 |
| 1.2.1. El Confort Térmico | 5 |
| 1.2.2. Índices de Confort | 6 |
| 1.3. El confort térmico en la ciudad de Cuenca | 8 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1.3.1. | Factores Climáticos | 8 |
| 1.4. | Sistemas de Captación Solar | 12 |
| 1.4.1. | Sistemas Pasivos | 12 |
| 1.5. | El Muro Trombe | 14 |
| 1.5.1. | Funcionamiento Térmico | 15 |
| 1.6. | Elementos que componen el Muro Trombe | 16 |
| 1.6.1. | Vidrio | 16 |
| 1.6.2. | Cámara de aire | 16 |
| 1.6.3. | Muro acumulador | 16 |
| 1.6.4. | Posibles mejoras | 17 |
| 2. | Muro Trombe como Sistema Pasivo de Acondicionamiento Térmico | 18 |
| 2.1. | Muro Trombe | 19 |
| 2.1.1. | Muro Trombe Ventilado y no Ventilado | 19 |
| 2.2. | Variables Morfológicas | 24 |
| 2.2.1. | Orientación, espesor | 24 |
| 2.3. | Variables Materiales | 31 |
| 2.3.1. | Adobe, Tapial, Ladrillo, Vidrio, Capa de pintura | 31 |
| 2.4. | Resumen del Capítulo | 35 |
| 3. | Análisis Mediante Simulaciones Digitales | 36 |
| 3.1. | Configuración del Modelo de Análisis | 37 |
| 3.2. | Configuración del Modelo de Estudio | 38 |
| 3.3. | Definición de Variables | 40 |
| 3.3.1. | Variables morfológicas | 40 |
| 3.3.2. | Variables materiales | 41 |
| 3.4. | Definición de los periodos de estudio | 43 |
| 4. | Resultados | 44 |
| 4.1. | Impacto en la temperatura | 45 |
| 4.1.1. | Análisis de resultados del modelo base | 45 |
| 4.1.2. | Análisis de variables morfológicas | 48 |
| 4.1.3. | Análisis de variables materiales | 56 |
| 4.2. | Impacto en la demanda energética | 60 |
| 4.2.1. | Análisis de resultados del modelo base | 60 |
| 4.2.2. | Análisis de variables morfológicas | 61 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3. Análisis de variables materiales | 66 |
| 4.3. Definición de la propuesta | 71 |
| 5. Conclusiones | 74 |
| 6. Recomendaciones | 78 |
| Referencias | 80 |
| Referencias Bibliográficas | 80 |
| Anexos | 82 |
| Anexo 1: Definición de los periodos de estudio | 82 |
| A1.1 Determinación del mes frío | 82 |
| A1.1 Definición del día promedio frío | 82 |
| A1.2 Determinación del mes promedio | 83 |
| A1.2 Definición del día promedio | 84 |
| Anexo 2: Simulaciones en el impacto de la temperatura | 85 |
| A2.1 Simulaciones en el impacto de la temperatura en el modelo base | 85 |
| A2.2 Simulaciones en el impacto de la temperatura de las variables morfológicas (día frío) | 87 |
| A2.3 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables morfológicas (día promedio) | 90 |
| A2.4 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables materiales (día frío) | 93 |
| A2.5 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables materiales (día promedio) | 94 |
| Anexo 3: Simulaciones en la demanda energética | 97 |
| A3.1 Simulaciones de la demanda energética en el modelo base, con orientación ESTE y OESTE, durante un año | 97 |
| A3.2 Simulaciones de la demanda energética de las variables morfológicas (periodo anual) | 97 |
| A3.3 Simulaciones de la demanda energética de las variables materiales (periodo anual) | 99 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.1. Carta Bioclimática de Givoni adaptada para la ciudad de Cuenca, Ecuador. Imagen tomada de Guillén & Cordero, 2012. | 7 |
| Figura 1.2. Temperatura (°C) de la ciudad de Cuenca según meses (año 2010). Elaboración propia con datos de Estación meteorológica del C.E.A de la Universidad de Cuenca, citado en Guillén & Cordero, 2012. | 9 |
| Figura 1.3. Velocidad, ráfaga, y frecuencia anual de los vientos. Imagen tomada de: https://es.windfinder.com/forecast/cuenca_mariscal_lamar_aeropuerto . | 10 |
| Figura 1.4. Radiación Solar (año 2010). Elaboración propia con datos tomados del Instituto de Ingeniería Solar, Universidad de Massachusetts, citado en Guillén & Cordero, 2012 | 11 |
| Figura 1.5. Primer Muro Trombe experimental. Imagen tomada de http://hiddenarchitecture.net/ungreen-trombe-wall/ | 14 |
| Figura 1.6. Partes del muro Trombe. Elaboración propia | 15 |
| Figura 1.7. Transferencia de calor en el muro Trombe. Elaboración propia . . . | 15 |
| Figura 2.1. Proceso de funcionamiento del MTNV (arriba) y el MTV (abajo). Imagen tomada de Guillén & Cordero, 2012 | 21 |
| Figura 2.2. Ganancias de calor globales de un muro Trombe no ventilado (izquierda), y un muro Trombe ventilado (derecha) en función de la pared de hormigón. Imagen tomada de Briga-Sá et al. (2014) | 22 |
| Figura 2.3. Diferentes formas geométricas que determinan la relación área-volumen. Imagen tomada de Pomaya, 2013 | 24 |
| Figura 2.4. Costo y ahorro de energía por calentamiento según las variables de funcionamiento y las características constructivas. Imagen tomada de Luna, Bojórquez, Romero, Gallegos & Corral, 2014. | 26 |
| Figura 2.5. Porcentaje de nivel de sensación en el interior de la habitación en estudio de muro Trombe en Ambato-Ecuador. Imagen tomada de Álvarez, 2015. | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.6. Isotermas para Huitzilac: R-TW- Frío. Imagen tomada de Hernández et al., 2016 | 29 |
| Figura 2.7. Isotermas para Huitzilac: R-TW- Frío. Imagen tomada de Hernández et al. (2016), Energía almacenada en el sistema de muro Trombe en Huitzilac (a) y Toluca (b). Imagen tomada de Hernández et al., 2016 | 30 |
| Figura 2.8. Energía acumulada por m^2 . Imagen tomada de Zalewski et al., 2002 | 34 |
| Figura 3.1. Dimensionamiento del modelo de estudio | 39 |
| Figura 3.2. Modelos de estudio (adobe, tapial, ladrillo). | 42 |
| Figura 4.1. Modelo Base con muro de Ladrillo | 46 |
| Figura 4.2. Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 47 |
| Figura 4.3. Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Radiación solar directa (amarillo) y difusa (marrón). | 48 |
| Figura 4.4. Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en adobe. | 49 |
| Figura 4.5. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 50 |
| Figura 4.6. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 51 |
| Figura 4.7. Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en tapial. | 51 |
| Figura 4.8. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 52 |
| Figura 4.9. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 53 |
| Figura 4.10. Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ladrillo. | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.11. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 54 |
| Figura 4.12. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 55 |
| Figura 4.13. Resultados del MODELO BASE y los MODELOS DE ESTUDIO, con orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 56 |
| Figura 4.14. Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 57 |
| Figura 4.15. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 58 |
| Figura 4.16. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior. | 59 |
| Figura 4.17. Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE (verde) y OESTE (magenta), durante un año: Demanda Energética. | 61 |
| Figura 4.18. Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ladrillo. | 61 |
| Figura 4.19. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética. | 62 |
| Figura 4.20. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual. | 63 |
| Figura 4.21. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética. | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.22. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual. | 64 |
| Figura 4.23. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética. | 65 |
| Figura 4.24. Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual. | 65 |
| Figura 4.25. Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO (15 cm) con orientación OESTE durante un año: Demanda Energética. | 66 |
| Figura 4.26. Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO (15 cm) con orientación OESTE: Consumo Energético anual. | 67 |
| Figura 4.27. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el OESTE durante un año: Demanda Energética. | 68 |
| Figura 4.28. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el OESTE: Consumo Energético anual. | 68 |
| Figura 4.29. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el OESTE: Demanda Energética. | 69 |
| Figura 4.30. Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el OESTE: Consumo Energético Anual.. . . . | 70 |
| Figura 4.31. MODELO PROPUESTO DE SISTEMA DE MURO TROMBE NO VENTILADO DE ADOBE DE (15cm). | 72 |
| Figura 4.32. Análisis comparativo del Consumo Energético de los SISTEMAS CONSTRUCTIVOS (Bloque pómez, Ladrillo Alivianado) empleados en la ciudad de Cuenca, frente al MODELO PROPUESTO de muro Trombe no Ventilado de ADOBE de 15cm. | 73 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1.1. Acciones significativas a nivel mundial sobre el tema de sostenibilidad. elaboración propia con datos de Flores, 2018. | 2 |
| Tabla 1.2. Energía consumida – mwh, por sectores en la ciudad de cuenca, periodo 2015 – 2019. elaboración propia con datos del CENTRO SUR, 2019. | 3 |
| Tabla 1.3. Humedad relativa (%) de la ciudad de cuenca según meses (año 2010). elaboración propia con datos de la estación meteorológica del C.E.A de la universidad de cuenca, citado en Guillén & Cordero, 2012. | 8 |
| Tabla 1.4. Humedad relativa (%) de la ciudad de cuenca según meses (año 2010). elaboración propia con datos de la estación meteorológica del c.e.a de la universidad de cuenca, citado en Guillén & Cordero (2012) | 9 |
| Tabla 1.5. Precipitaciones (mm/m^2) promedio de la cuenca por años y según meses (periodo 1999-2009). elaboración propia con datos de la estación meteorológica del c.e.a de la universidad de cuenca, citado en Guillén & Cordero, 2012. | 10 |
| Tabla 1.6. Radiación solar (año 2010). elaboración propia con datos del Instituto de Ingeniería Solar, Universidad de Massachusetts, citado en Guillén & Cordero, 2012. | 11 |
| Tabla 1.7. Tipos de sistemas de captación solar. elaboración propia datos de Serra y Coch, 1994 | 13 |
| Tabla 2.1. Espesor y conductividad térmica recomendado para una alta inercia térmica según materiales. elaboración propia con datos de Edward Mazrúa, citado en Guillén & Cordero (2012) | 20 |
| Tabla 2.2. Viviendas en la ciudad de Cuenca según sistema constructivo. elaboración propia con datos del censo de población y Vivienda - 2010, citado en Guillén & Cordero, 2012. | 20 |
| Tabla 2.3. Área de muro trombe y número de orificios según el área útil de la habitación a calentar. elaboración propia con datos del grupo de apoyo al sector rural - pontificia universidad católica de Perú, citado en Guillén & Cordero (2012). | 21 |

| | |
|--|----|
| Tabla 2.4. Dimensionamiento del muro trombe. elaboración propia con datos de Pomaya, 2013. | 24 |
| Tabla 2.5. Ángulo de captación del muro trombe según la latitud del lugar de aplicación. elaboración propia con datos de Pomaya, 2013. | 25 |
| Tabla 2.6. Variables de funcionamiento y características constructivas. elaboración propia con datos de Luna et al., 2014. | 26 |
| Tabla 2.7. Factor forma. elaboración propia con datos de Álvarez, 2015. | 28 |
| Tabla 2.8. Conductividad térmica, pérdidas de calor entre distintos materiales. elaboración propia con datos de Neira, 2015. | 31 |
| Tabla 2.9. Materiales empleados en la simulación energética. elaboración propia con datos de Serrano, Aguilar & Trejo, 2017. | 32 |
| Tabla 2.10. Propiedades termofísicas de los materiales que integran el muro trombe. elaboración propia con datos de Serrano et al., 2017. | 32 |
| Tabla 2.11. Comparativa de temperaturas internas alcanzadas en el espacio arquitectónico interior. elaboración propia con datos de Serrano et al., 2017. | 33 |
| Tabla 2.12. Efectos de los colores en el rendimiento del muro solar. elaboración propia con datos de Ozbalata & Kartal, 2010. | 33 |
| Tabla 3.1. Modelo de estudio | 38 |
| Tabla 3.2. Modelo de estudio, parámetros de análisis, variables materiales y morfológicas para el sistema de muro trombe no ventilado. | 42 |
| Tabla 3.3. Periodos y parámetros de análisis. | 43 |
| Tabla 4.1. Masa y transmitancia térmica del adobe, tapial y ladrillo. | 58 |
| Tabla 6.1. Determinación del mes frío | 82 |
| Tabla 6.2. Definición del día promedio frío | 83 |
| Tabla 6.3. Determinación del mes promedio | 83 |
| Tabla 6.4. Definición del día promedio | 84 |
| Tabla 6.5. Temperatura en el día frío | 85 |
| Tabla 6.6. Temperatura en el día promedio | 86 |
| Tabla 6.7. Simulaciones en un muro de adobe | 87 |
| Tabla 6.8. Simulaciones en un muro de tapial. | 88 |
| Tabla 6.9. Simulaciones en un muro de ladrillo, | 89 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 6.10. Simulaciones en un muro de adobe | 90 |
| Tabla 6.11. Simulaciones en un muro de tapial | 91 |
| Tabla 6.12. Simulaciones en un muro de ladrillo. | 92 |
| Tabla 6.13. Simulaciones en el adobe, tapial y ladrillo | 93 |
| Tabla 6.14. Simulaciones en un muro de adobe, tapial y ladrillo de 15cm | 94 |
| Tabla 6.15. Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm | 95 |
| Tabla 6.16. Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm de vidrio doble | 96 |
| Tabla 6.17. Simulaciones de la demanda energética en el modelo base | 97 |
| Tabla 6.18. Simulaciones de la demanda energética en un muro de adobe de 15cm, con orientación ESTE y OESTE | 98 |
| Tabla 6.19. Simulaciones de la demanda energética en un muro de tapial de 15cm, con orientación ESTE y OESTE | 98 |
| Tabla 6.20. Simulaciones de la demanda energética en un muro de ladrillo de 15cm, con orientación ESTE y OESTE | 99 |
| Tabla 6.21. Simulaciones de la demanda energética en un muro de adobe, tapial y ladrillo de 15cm con orientación oeste | 100 |
| Tabla 6.22. Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm | 100 |
| Tabla 6.23. Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm | 101 |

Introducción

En la actualidad, se evidencia que la mayoría de espacios habitables se construyen sin considerar aspectos bioclimáticos. Desde el estudio morfológico de la envolvente arquitectónica hasta la correcta utilización de los materiales empleados para la construcción, han sido temas a los que cada vez se les ha dado menos importancia. Esto supone un incremento del desconfort térmico, lo cual conlleva directamente a una disminución en la calidad de vida de las personas. En efecto, el cuerpo humano reacciona de distintas formas ante los cambios bruscos de temperatura, generando sensaciones de calor o frío extremo producidas por el viento, nivel de humedad, radiación solar y otras.

En un intento por contrarrestar estas sensaciones de desconfort, las sociedades han optado por mecanismos calefactores o de enfriamiento de bajo ahorro energético y de alto nivel de contaminación ambiental. Este caso se observa en la ciudad de Cuenca, característica en la clasificación [Köppen \(1948\)](#) por su clima Mesotérmico semihúmedo (Cfb), en la que los ciudadanos se exponen la mayor parte del tiempo a un ambiente frío, con índices de lluvia por arriba del promedio. Si a esto se añade el escaso criterio de arquitectura bioclimática en la construcción de viviendas y otros espacios, se puede determinar que el índice de desconfort térmico es alto, especialmente en personas de recursos limitados que no pueden permitirse un sistema de calefacción de alto consumo energético.

Con esta base, la presente investigación plantea una propuesta de un sistema pasivo de acondicionamiento térmico conocido como muro Trombe, abarcando características tanto morfológicas como materiales. Para ello, se parte de la revisión bibliográfica sobre las distintas variables que influyen en el comportamiento del muro Trombe. A su vez, se analiza el contexto geográfico en el que se propone emplazar el elemento, sus condiciones climáticas y los factores clave para generar confort térmico en un espacio habitable.

Posteriormente, se evalúa la propuesta a través de simulaciones digitales. Esta labor se complementa con un análisis comparativo entre el modelo de muro Trombe propuesto frente a un muro con los sistemas constructivos más utilizados en la ciudad de Cuenca. En este punto se hace hincapié en las ventajas a nivel económico, ganancia calorífica y de impacto ambiental.

Por medio de este estudio, se busca brindar un enfoque de sostenibilidad por medio de los muros de una vivienda. Como resultado, se espera ampliar la base teórica existente sobre el tema. De esta manera se brinda un punto apoyo tanto para profesionales como particulares, quienes desconocen acerca de las propiedades y ventajas que ofrece este sistema. A futuro se espera que la investigación sirva de asidero para promover la aplicación de Muros Trombe en el contexto cuencano, aportando con un incremento de confort térmico en espacios habitables y una reducción significativa de contaminación ambiental.

Problemática

El disconfort térmico representa un problema cotidiano en casi todos los contextos geográficos a nivel mundial. Sus efectos en el ser humano abarcan desde el estrés o incomodidad térmica, hasta la disminución del rendimiento físico y mental. Esto se debe a que el disconfort térmico trata de un efecto que se expresa a bajas o altas temperaturas, el cual ocasiona malestar en las personas (Flores, 2012 citado en Carrasco, 2019). Siguiendo esta línea, se define que, si el tema no se trata a tiempo y con las debidas estrategias, puede ocasionar problemas de salud e incluso incremento en los índices de mortalidad (Healy, 2015).

Evidentemente, el disconfort térmico se vincula con el desconocimiento y desdén que se tiene por parte de la sociedad de aplicar sistemas bioclimáticos a nivel arquitectónico y urbano. Estos sistemas suponen un ahorro energético, considerando que los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado que son utilizados para mejorar el bienestar térmico en los usuarios, representan aproximadamente un 10 % de del consumo energético a nivel mundial (Pérez et al., 2008).

Esto es visible en Cuenca, ciudad en la que los habitantes están expuestos al disconfort térmico durante periodos prologados debido a las bajas temperaturas. Parte de esto se debe a la ausencia de criterios bioclimáticos en el diseño de vivienda, la corta vida útil de los materiales y/o de una mala implementación de éstos. Por tanto, se considera oportuno indagar sobre las estrategias existentes para reducir el consumo de energía eléctrica, centrándose en los sistemas de ahorro de energía pasivo, los cuales no utilizan soluciones mecánicas para cumplir una función específica (Costa, 2011). Entre estos se considera el muro acumulador o muro Trombe, el cual recibe la radiación solar y acumula calor en una pared de alta inercia térmica y al mismo tiempo genera una corriente convectiva entre el muro y una superficie acristalada basada en el efecto invernadero (Escobar, 2019). En la noche la pared expulsa la energía almacenada y calienta la atmósfera circundante, creando un importante ahorro energético para el usuario.

Siguiendo esta línea, se busca determinar en qué medida un muro Trombe puede mejorar el confort térmico y reducir el consumo de energía en una vivienda en la ciudad de Cuenca. Se señala que debido a las condicionantes climáticas del contexto, las fachadas más amplias deben orientarse hacia el Este y Oeste, a fin de garantizar mayor ganancia calorífica en la mañana o tarde, NEC (2011).

Mediante esta investigación se demuestra qué tan factible es implementar un muro Trombe, como alternativa de sistema de ahorro pasivo, en un espacio arquitectónico en

la ciudad de Cuenca. Por tanto, el aporte de la investigación reside en la ampliación de conocimiento sobre la aplicación de esta estrategia bioclimática, basada en métodos no convencionales de construcción. De igual manera, el estudio demuestra la factibilidad del sistema a nivel económico y de confort térmico, con respecto a otros sistemas de acondicionamiento térmico convencionales.

Objetivos

Objetivo General:

Diseñar y comprobar la factibilidad de un muro Trombe como sistema pasivo de acondicionamiento térmico en la ciudad de Cuenca.

Objetivos Específicos:

- Realizar una recopilación bibliográfica para definir las variables y parámetros que influyen en el comportamiento térmico de un Muro Trombe.
- Determinar las características morfológicas y de materiales con mayor impacto en la reducción del consumo energético por calefacción a través de simulaciones digitales en la región Andina de Cuenca.
- Comparar el funcionamiento térmico entre el modelo propuesto frente a un muro con los sistemas constructivos más utilizados en la ciudad de Cuenca.

Justificación

Se ha indagado que, en el cantón Cuenca, la mayor parte de la población permanece en condiciones de discomfort térmico; ya sea en la vivienda o el trabajo. Por ello, es importante conocer en la disciplina de la arquitectura los aspectos esenciales que se deberían considerar al momento de diseñar un espacio habitable con criterios bioclimáticos. Entre estos, la orientación de las fachadas principales, las propiedades de los materiales, y especialmente la disposición de los elementos de captación solar, como muros, ventanas, cubiertas, tragaluces y otros (Neila, 2014).

La presente investigación surge de la necesidad de contrarrestar el discomfort térmico por medio de materiales que contengan características térmicas, de acuerdo a su capacidad de captación, conservación y transmisión de calor. De igual manera, se pretende ampliar el conocimiento sobre una alternativa que evite el incremento de emisiones de gases CO_2 , consecuencia del alto consumo energético de fuentes convencionales como los derivados del petróleo (Agrawal, 1989). En este sentido, el muro Trombe demuestra ser una técnica eficiente para el desarrollo de una arquitectura sustentable que, aprovecha los recursos naturales y minimiza significativamente el uso de sistemas energéticos convencionales de calefacción poco amigables con el medio ambiente.

En base a lo anterior, el estudio aporta de manera sustancial a la academia, ya que se amplía la base teórica existente sobre el tema. A su vez, la investigación aborda las ventajas a nivel económico y práctico con respecto a otros sistemas convencionales de acondicionamiento térmico. Aquello puede servir de incentivo para que el muro Trombe se convierta en una alternativa por la que se decanten más profesionales y particulares en el diseño y construcción de espacios habitables y de trabajo.

Metodología

La presente investigación se aborda en tres etapas. La primera, es de carácter investigativo, se basa en la búsqueda y recopilación de estudios experimentales y teóricos sobre el funcionamiento y las variables que influyen en el comportamiento del muro Trombe.

Como segundo punto, se evalúa la influencia de las variables propuestas sobre el comportamiento térmico y energético interior de un determinado espacio. Este análisis se realiza a través de simulaciones digitales con el uso del software Desing Builder y el motor de cálculo Energy Plus. Para realizar las simulaciones digitales, se ha considerado y se ha definido el dormitorio como el espacio de mayor uso continuo de una vivienda y que requiere de una mayor captación solar. Las variables del elemento a analizar son de tipo morfológicas (orientación, espesor) y materiales (adobe, tapial ladrillo). Como parámetro de evaluación se utilizará el comportamiento de la temperatura del aire interior (T_{ai}) y el consumo energético (CE) del espacio analizado.

Finalmente, en la tercera etapa, se efectúa un análisis comparativo del funcionamiento térmico interior entre el modelo de muro Trombe propuesto frente a los sistemas constructivos convencionales más utilizados en la ciudad de Cuenca.

Antecedentes Investigativos y Conceptos

1.1. La Sostenibilidad y la Arquitectura

A lo largo de la historia el ser humano ha buscado comodidad y seguridad. Por ello se agrupó en colectivos, edificó monumentos y desarrolló continuamente todo tipo de tecnologías que aportasen a facilitar las actividades cotidianas. Uno de los saltos más significativos a nivel tecnológico fue la Revolución Industrial, en la que se automatizaron gran parte de procesos que anteriormente se los realizaba a mano (Morris & Bernet, 1998). En efecto, el precio del desarrollo se ha traducido en un daño importante al medio ambiente, produciendo cambios climáticos, contaminación del aire, deforestación, escasez y contaminación del agua, entre otros.

Entre los efectos causados por el incesante desarrollo se destaca el cambio climático, el cual responde a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases que atrapan el calor; este proceso se conoce como “efecto invernadero”. Este efecto produce variaciones climáticas que afectan directamente a la salud de las personas. Debido a esto, gobiernos y entre otras organizaciones han indagado sobre estrategias de mitigación de los múltiples efectos de cambio climático; entre estos, la concientización a la población y la educación sobre el respeto a la naturaleza. Como consecuencia, se han tomado acciones, realizando conferencias y entre otros temas referentes a la sostenibilidad, (Tabla 1.1).

Tabla 1.1: ACCIONES SIGNIFICATIVAS A NIVEL MUNDIAL SOBRE EL TEMA DE SOSTENIBILIDAD. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE FLORES, 2018.

| EVENTO | FECHA | DESCRIPCIÓN |
|--|-------|---|
| Informe del Club de Roma | 1971 | Se replantea la viabilidad del crecimiento económico a nivel mundial. Aparece el concepto de “ecodesarrollo”, y los primeros proyectos edificatorios y de planificación urbanística con una nueva sensibilidad. |
| Conferencia Europea sobre Ciudades Sostenibles | 1994 | Se aprueba la Carta Aalborg en la cual se tratan de adaptar planes de acción hacia la sostenibilidad a las ciudades europeas. |
| Protocolo de Kioto | 1997 | Aprobado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Plantea que los países en vías de desarrollo reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero. |

Nota: Se destacan algunos de los eventos más importantes a nivel macro e internacional, referentes al tema de sostenibilidad.

En estos eventos (Tabla 1.1) se proponen una serie de acciones globales medioambientales y de desarrollo sostenible, las cuales deben convertirse en una obligación para los países que han formado parte del evento. De igual manera, se menciona la importancia en que el resto de países adopten estas acciones, ya que se trata de un problema a nivel global.

Como parte de la problemática se enlista la construcción de infraestructuras, debido a que demandan un alto consumo energético. Según datos de la Comisión Europea (CE) la construcción genera el 50% en vertidos de residuos de la emisión mundial y una vez concluida la fase de construcción, los edificios consumen aproximadamente el 50% de energía utilizada a nivel mundial y producen el 40% de emisiones de gases de efecto invernadero (Galindo & Baigts, 2015). Esto conlleva a la destrucción progresiva de la capa de ozono y la pérdida de flora y fauna. A pesar de esto, los edificios representan el lugar de vivienda y trabajo del hombre moderno, por lo que seguirán construyéndose.

Por otra parte, el Balance Nacional de Energía (SENER, 2017) ha determinado que el transporte como es el sector más intensivo en uso de energía, representando un 46.8 % del consumo energético a nivel global. A esto le precede el sector industrial con 31.7 %; el sector residencial, comercial y público con 18.1 %, y el sector agropecuario con el 3.4 %.

En el caso de Ecuador, el porcentaje de consumo energético correspondiente al sector residencial es del 35 % de la demanda energética (ARCONEL, 2014).

Mientras que, a nivel local los datos emitidos por la Empresa Eléctrica Regional (CENTRO SUR), muestran un incremento de consumo energético en la ciudad de Cuenca entre los periodos 2015-2019 en diversos sectores. De este modo, según la (Tabla 1.2), el sector residencial representa el mayor en términos de consumo, con un porcentaje del 37.72 %. A esto le sigue el industrial con el 30.41 %, el sector comercial con 14.89 %, el sector público 10.19 % y otros con el 6.79 % (CENTRO SUR, 2019).

Tabla 1.2: ENERGÍA CONSUMIDA – MWH, POR SECTORES EN LA CIUDAD DE CUENCA, PERIODO 2015 – 2019. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL CENTRO SUR, 2019.

| TARIFA | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | VARIACIÓN (%) | PARTICIPACIÓN (%) |
|--------------|----------------|----------------|------------------|------------------|------------------|---------------|-------------------|
| Residencial | 381.451 | 399.049 | 405.327 | 406.380 | 412.078 | 1,40 | 37,72 |
| Comercial | 155.539 | 154.801 | 154.042 | 156.369 | 162.983 | 4,04 | 14,89 |
| Industrial | 304.068 | 293.707 | 327.042 | 337.904 | 332.281 | -1,66 | 30,41 |
| A. Público | 86.182 | 87.452 | 93.942 | 100.510 | 111.279 | 10,71 | 10,19 |
| Otros | 57.946 | 61.597 | 68.814 | 72.911 | 74.195 | 1,76 | 6,79 |
| Total | 985.187 | 996.606 | 1.049.167 | 1.074.074 | 1.092.516 | 1,72 | 100,00 |

Este aumento de demanda energética se traduce en mayores costos e impactos ambientales más severos. Por ende, optimizar el diseño de los espacios habitables con un enfoque sustentable es cada vez más importante y necesario.

Debido al aumento del consumo energético y con ello, los crecientes problemas ambientales, se ha visto que el diseño sustentable se ha vuelto un enfoque cada vez más importante en casi todo el planeta. Es así, que surgen conceptos relacionados a la eficiencia energética, y la Arquitectura Sostenible. Esta última ofrece y brinda gran aporte en la toma de decisiones para poder mitigar los problemas medioambientales que en las últimas décadas se han incrementado.

Si bien es cierto, no solo la Arquitectura es una de las soluciones que puede remediar aquellos problemas, pero es una de las disciplinas que tienen una gran influencia para poder combatir y disminuir a los efectos del cambio climático.

Ante eso, la búsqueda de soluciones para contrarrestar el cambio climático, es una de las propuestas que ofrece la rama de la Arquitectura y se la puede encontrar a través de la ideología del desarrollo sostenible.

El concepto “desarrollo sostenible” se expone en el informe Brundtland y establecido por la ONU (Organización de las Naciones Unidas), como “Nuestro futuro común es satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas” (Brundtland, 1989). Mediante este término se busca de manera equilibrada un desarrollo en los ámbitos sociales, económicos, ecológicos, pensando

primordialmente en las características de una vivienda social, considerando en esta, las condiciones climáticas del sector con el propósito de brindar un adecuado confort interior para el usuario.

A partir de esta idea de sostenibilidad aparecen conceptos en el Ecuador, como es el caso de la NEC-11, Capítulo 13 (Eficiencia Energética en la Construcción). Esta norma ha sido realizada con el propósito de impulsar el diseño y construcción de edificaciones bajo el punto de vista de la sostenibilidad, la eficiencia y de un razonable manejo de recursos, buscando de esta manera disminuir el consumo de combustibles fósiles y recursos no renovables, y, además pretende evitar la emisión de gases causantes del efecto invernadero CO_2 , (NEC, 2011).

En este sentido, la búsqueda hacia un ambiente confortable y amigable con el medio ambiente involucra aspectos importantes a considerar desde el uso de materiales de bajo impacto ambiental, la incorporación de fuentes de energía renovables, el estudio de las condiciones climáticas, el reciclaje y la reutilización de residuos (Assefa et al., 2010). La Arquitectura Sostenible busca aprovechar estos recursos de tal forma que minimice la contaminación y a la vez se puedan crear espacios cómodos para el ser humano.

Considerando que el confort del usuario es una de las causas directas en el consumo energético del sector residencial y la búsqueda de proponer diseños óptimos cuyo consumo de energía eléctrica para alcanzar el confort térmico interior sea menos intensivo, McMullan (2018) menciona tres puntos importantes que son utilizados dentro de la Arquitectura Sostenible.

El primero está relacionado con el microclima del lugar, por lo que la información de los datos climáticos permite analizar las variaciones que puede presentar el clima y en base a ello, se puedan tomar criterios de diseño, el segundo punto constituye la manera racional con la cual se puede conseguir y utilizar los materiales para la construcción, finalmente el tercer punto está relacionado con el ahorro energético pensando sobre todo en reducción de gases de efecto invernadero y además de mejorar la calidad de vida de las personas, McMullan (2018).

Desde otro punto de vista, las envolventes arquitectónicas desempeñan gran importancia en la toma de decisiones dentro de la Arquitectura Sostenible, ya que por medio de esta parte constructiva se pueden abordar variables de confort ya sea por medio de la iluminación natural, materiales de construcción y eficiencia energética aplicadas a una vivienda (González & Molina, 2018). Es así que, la Arquitectura Sostenible ofrece alternativas que pueden servir para disminuir el impacto del calentamiento global, y a su vez brinda una oportunidad al usuario de vivir en un ambiente cómodo, confortable y sobre todo respetando el medioambiente.

1.2. El confort del usuario

En la época clásica, Sócrates y Vitrubio sintieron la necesidad de habitar en un ambiente confortable y saludable. Por ello, diseñaron y construyeron espacios tomando en cuenta los factores climáticos en los que se encuentran (Auliciems & Szokolay, 2007 citado en [Molina & Veas \(2012\)](#)). Esta idea sería rescatada a inicios del siglo XX, en el que se pone interés sobre el confort del usuario. En conjunto, se realizarían análisis profundos respecto a la mejora de la calidad de vida de las personas. En este proceso se tomarían en cuenta las nuevas tecnologías, mejores ideas de diseño y sistemas constructivos innovadores que aportasen no solo al confort del usuario, sino a la protección por el medio ambiente. De esta manera, se llevarían a cabo las primeras estrategias y elementos de control ambiental.

El confort, es un término que está asociado al bienestar o comodidad ([Real Academia Española, 2020](#)). Bajo este concepto, profesiones de la rama de la Arquitectura, observan la importancia de crear y proponer ambientes confortables e inteligentes con el menor costo energético, procurando la contaminación ambiental, y sobre todo brindando a los usuarios espacios cómodos para una correcta realización de sus actividades (Frontczak & Wargock, 2011; Mahdavi & Unzeitig, 2005 citado en [Molina & Veas \(2012\)](#)). La creación de un espacio confortable contribuye de manera significativa al medioambiente y a su vez brinda al usuario a mantener una adecuada sensación de confort interior.

Para conseguir aquella sensación de confort es necesario conocer la existencia de agentes principales que influyen directamente hacia el confort térmico, lumínico y auditivo. Los mismos que están ligados a los órganos sensoriales y agrupados en factores de confort del usuario y parámetros ambientales de confort.

De este modo, el presente estudio conlleva un análisis directo en el confort térmico, lo cual, hoy en día es un aspecto determinante a considerar antes y durante el proceso de construcción de una vivienda.

1.2.1. El Confort Térmico

Actualmente, el ser humano permanece mayor tiempo en ambientes interiores (Van Hoof, 2010 citado en [Arballo et al., 2016](#)). Ante aquello, la Arquitectura puede responder por medio de la construcción de espacios cómodos y confortables, los mismos que son determinantes en las sensaciones de equilibrio entre una persona y un ambiente.

El confort térmico es definido como el “estado mental o cognitivo que expresa satisfacción con el ambiente térmico” ([ASHRAE, 2004](#)). Este término depende de ciertos parámetros externos, como la temperatura del aire, la velocidad del mismo, la humedad relativa, la temperatura radiante y entre otros aspectos específicos internos como la actividad física desarrollada, la cantidad de ropa o el metabolismo de cada individuo.

Por un lado, los modelos de confort térmico en espacios interiores han dado lugar a la

obtención de diversas normas tanto locales e internacionales de referencia que establecen rangos térmicos aceptables en las edificaciones.

Para llegar a la sensación de confort, el balance de pérdidas y ganancias de calor debe ser nulo, conservando de esta así una temperatura normal. Por esta razón, según en el capítulo 13 de la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC: “Eficiencia energética en la construcción en Ecuador” establece los rangos de confort con los que deben mantenerse las edificaciones, en donde la temperatura del ambiente, como la temperatura radiante media de superficies del local deben estar entre 18°C y 26°C (NEC, 2011).

De acuerdo a lo mencionado, en la ciudad de Cuenca, Quesada & Bustillos (2018), han realizado encuestas a los propietarios de las viviendas urbanas, en donde han procedido a definir los niveles de confort de los ambientes interiores. De esta forma, establecen que los rangos de la temperatura de los ambientes analizados están entre 16,62°C a 23,62°C.

En base a aquello, se puede señalar que las temperaturas obtenidas están por debajo a lo establecido en la normativa, lo cual pueden ocasionar sensaciones de disconfort interior en los usuarios.

En nuestro caso de estudio, se tomará en consideración los rangos de confort según lo indica la NEC, es decir de 18°C y 26°C. Estos valores mencionados, serán utilizados como referencia durante el apartado de las simulaciones digitales. De este modo, se buscará que el espacio simulado mantenga las condiciones para lograr un confort deseado.

1.2.2. Índices de Confort

Desde hace algunos tiempos ha existido maneras en las que se pueden evaluar el confort y es mediante la utilización de los denominados índices de confort.

Entre los índices más conocidos y utilizados se encuentran, el Humidex, su propósito es de indicar la temperatura efectiva efectuada que el ser humano percibe en determinadas condiciones de humedad y temperatura ambiente (De Steffens et al., 2005). Por otro lado, existen diagramas bioclimáticos que integran variables útiles en los estudios de diversas zonas de confort, como es el caso del diagrama de Olgyay.

Este tipo de diagrama ha sido desarrollado por los hermanos Olgyay (2008), se trata principalmente de una carta bioclimática que integra variables importantes para conseguir el confort. La humedad, la temperatura, la radiación y el viento son las variables por las que se permiten conocer las medidas de climatización que requiere un determinado sector (Fernández, 1994).

Otro diagrama que habitualmente se utiliza, es el de control “Psicrométrico” de Baruch Givoni. El cual ubica los valores de la temperatura y humedad media de cada mes, para evaluar la sensación térmica, y a partir de esto, el grado de confort que se requiere.

Uno de tantos ejemplos con los que se ha aplicado esta carta bioclimática, se da en el estudio realizado por Guillén & Cordero (2012). En la figura 1.1, se observa las líneas

climáticas de los meses se encuentran localizados en la zona “A”, lo cual indica que la estrategia a considerarse para el diseño de una edificación es el calentamiento solar pasivo.

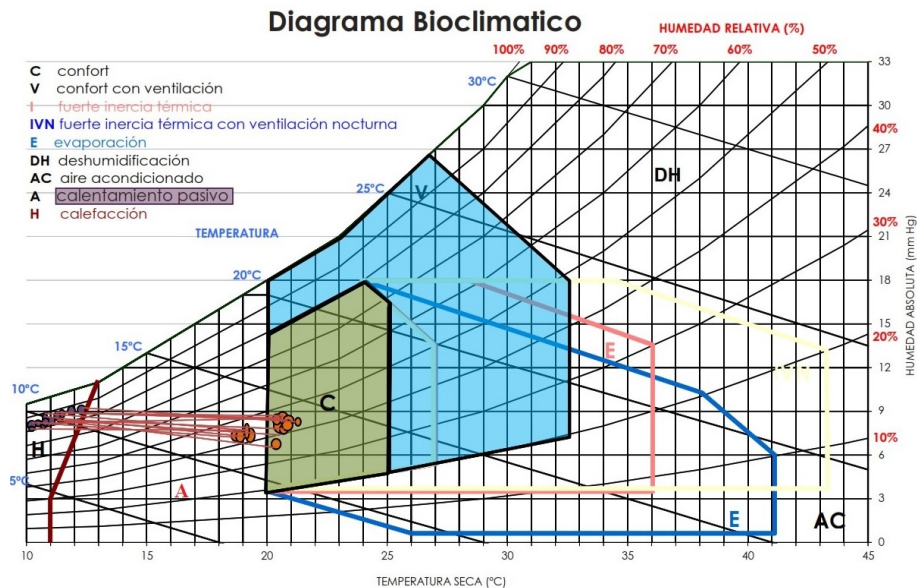


FIGURA 1.1: Carta Bioclimática de Givoni adaptada para la ciudad de Cuenca, Ecuador. Imagen tomada de Guillén & Cordero, 2012.

Sin embargo, para poder definir cuáles son las estrategias que deben aplicarse a un determinado lugar, es necesario entender la variación climática con las que cuenta el sector. En este caso, se realiza un estudio previo sobre las condiciones climáticas que las posee la ciudad de Cuenca.

1.3. El confort térmico en la ciudad de Cuenca

1.3.1. Factores Climáticos

La ciudad de Cuenca se encuentra en la Región Interandina del Ecuador, dentro del sistema orográfico de los Andes en las coordenadas 2°53'12" de latitud sur, 79°09' de longitud Oeste y una altitud promedio de 2.530 m.s.n.m.

Para describir los elementos climáticos de esta ciudad, se ha considerado la información a partir de datos mensuales del año 2010 de la Estación Meteorológica del Centro de Estudios Ambientales (CEA) de la Universidad de Cuenca y datos de la Estación Climatológica del Aeropuerto Mariscal Lamar.

Debido a que la ciudad se ubica dentro de un extenso valle en medio de la cordillera andina, el clima puede presentar variaciones en cuanto a sus temperaturas, humedad, niveles de precipitaciones, velocidad de vientos, y la radicación solar.

Dicho esto, a continuación, se presenta una breve información referente a los datos climáticos de esta ciudad.

Temperatura

Por un lado, las temperaturas máximas variables que presenta la ciudad, es de 18.1° en el mes de junio a 21.8° del mes de abril, y temperaturas mínimas que varían entre 13.2°C y 9°C en los meses de febrero y agosto respectivamente, y con una amplitud térmica promedio de 8.98°C (Tabla 1.3).

Tabla 1.3: HUMEDAD RELATIVA (%) DE LA CIUDAD DE CUENCA SEGÚN MESES (AÑO 2010). ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL C.E.A DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA, CITADO EN GUILLÉN & CORDERO, 2012.

| Meses | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Temp. Máxima | 20,7 | 21,8 | 20,7 | 21,8 | 21,1 | 18,1 | 20,5 | 18,9 | 19,9 | 21,4 | 18,3 | 20,1 |
| Temp. Mínima | 11,9 | 13,2 | 11,8 | 12,1 | 12,3 | 11,1 | 10,9 | 9 | 10,4 | 10,3 | 10,9 | 11,6 |
| Temp. Promedio | 16,3 | 17,5 | 16,3 | 17,0 | 16,7 | 14,6 | 15,7 | 14,0 | 15,2 | 15,9 | 14,6 | 15,9 |
| Amplitud Térmica | 8,8 | 8,6 | 8,9 | 9,7 | 8,8 | 7 | 9,6 | 9,9 | 9,5 | 11,1 | 7,4 | 8,5 |

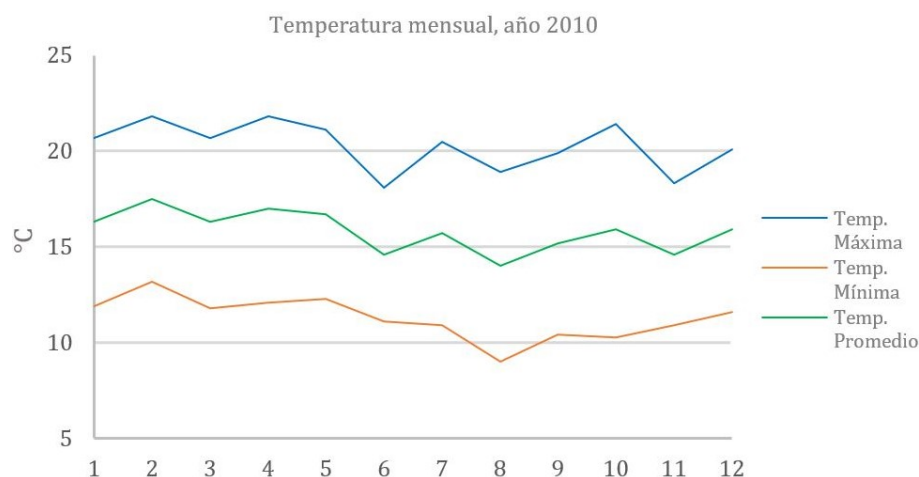


FIGURA 1.2: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de la ciudad de Cuenca según meses (año 2010). Elaboración propia con datos de Estación meteorológica del C.E.A de la Universidad de Cuenca, citado en Guillén & Cordero, 2012.

Humedad

La humedad relativa, oscila entre 79.2% y 86.8%, con mayores porcentajes de humedad entre los meses de octubre y diciembre, mientras tanto, los porcentajes mínimos son de 34.5%, 48.7% en los meses de octubre y junio respectivamente (Tabla 1.4).

Tabla 1.4: HUMEDAD RELATIVA (%) DE LA CIUDAD DE CUENCA SEGÚN MESES (AÑO 2010). ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL C.E.A DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA, CITADO EN GUILLÉN & CORDERO (2012)

| Meses | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Hum. Máxima | 83 | 83,3 | 84,6 | 85,1 | 85,7 | 84,9 | 86,2 | 81,8 | 81,1 | 79,2 | 86,9 | 86,8 |
| Hum. Mínima | 41,6 | 40,2 | 42,1 | 42,2 | 42,6 | 48,7 | 44 | 38,5 | 39,4 | 34,5 | 48,3 | 44,6 |
| Hum.Promedio | 62,3 | 61,8 | 63,4 | 63,7 | 64,2 | 66,8 | 65,1 | 60,2 | 60,3 | 56,9 | 67,3 | 65,7 |

Precipitación

Las máximas precipitaciones están comprendidas entre los meses de marzo $129.8\text{mm}/\text{m}^2$ y abril $183.7\text{mm}/\text{m}^2$, mientras que las mínimas precipitaciones se sitúan en los meses julio $20.8\text{mm}/\text{m}^2$ y agosto $4.8\text{mm}/\text{m}^2$ y una precipitación promedio de $73.99\text{mm}/\text{m}^2$, Tabla 1.5.

Tabla 1.5: PRECIPITACIONES (mm/m^2) PROMEDIO DE LA CUENCA POR AÑOS Y SEGÚN MESES (PERIODO 1999-2009). ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL C.E.A DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA, CITADO EN [GUILLÉN & CORDERO, 2012](#).

| Meses | Años | | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 |
| ENERO | 96,3 | 29,4 | 91,2 | 37,1 | 28,3 | 40,1 | 60,4 | 44,7 | 55,8 | 44,5 | 90,3 |
| FEBRERO | 183,3 | 124,7 | 42,9 | 15,6 | 38,5 | 105,2 | 115,8 | 78,8 | 28,5 | 174,4 | 33,9 |
| MARZO | 173,1 | 80,3 | 129,8 | 85,4 | 92,9 | 37,9 | 224,1 | 101,5 | 154,6 | 124,9 | 126,3 |
| ABRIL | 183,7 | 127,7 | 58,8 | 122,7 | 133,2 | 111,1 | 122,8 | 141,7 | 199,4 | 169,3 | 146,1 |
| MAYO | 143,8 | 161,1 | 51,4 | 78,8 | 53,3 | 66,2 | 56,6 | 31,7 | 59,2 | 162,6 | 62,3 |
| JUNIO | 62,0 | 56,5 | 38,3 | 24,8 | 44,6 | 19,2 | 70,2 | 57,6 | 94,7 | 44,0 | 56,5 |
| JULIO | 19,8 | 21,5 | 9,4 | 36,0 | 27,1 | 36,8 | 11,8 | 20,8 | 12,5 | 18,0 | 7,1 |
| AGOSTO | 29,4 | 18,8 | 13,9 | 17,9 | 6,5 | 4,8 | 7,4 | 23,9 | 34,2 | 42,3 | 6,8 |
| SEPTIEMBRE | 106,1 | 179,9 | 67,1 | 9,1 | 83,1 | 83,2 | 5,2 | 29,6 | 23,4 | 49,4 | 16,0 |
| OCTUBRE | 98,0 | 15,4 | 24,3 | 144,0 | 53,8 | 43,5 | 149,7 | 37,7 | 62,1 | 107,2 | 20,3 |
| NOVIEMBRE | 92,4 | 13,2 | 73,4 | 124,6 | 138,9 | 137,3 | 33,1 | 94,5 | 101,4 | 81,6 | 58,3 |
| DICIEMBRE | 140,9 | 61,3 | 62,1 | 145,6 | 76,5 | 78,1 | 225,2 | 97,1 | 94,0 | 53,0 | 93,1 |
| PROMEDIO | 106,98 | 74,15 | 55,22 | 70,13 | 64,73 | 63,73 | 90,19 | 63,30 | 76,65 | 89,27 | 59,75 |

Vientos

En tanto que, los vientos son predominantes de sentido suroeste con velocidades comprendidas entre los 7.41 y 11.11 km/h, (Figura 1.3).

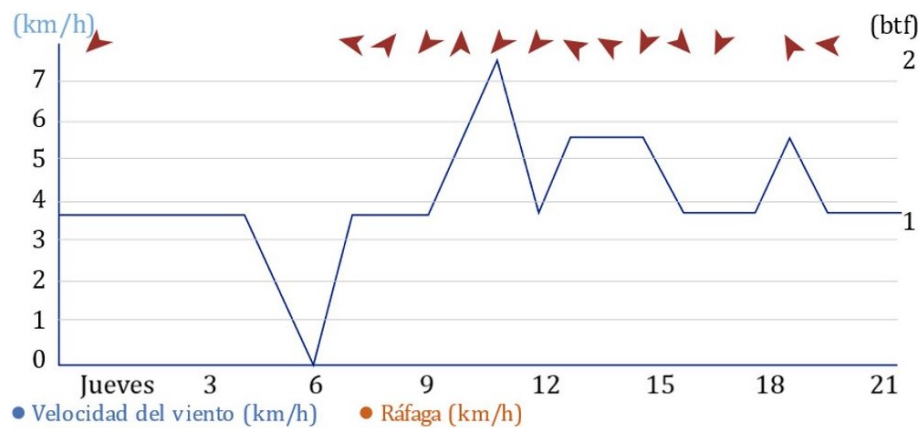


FIGURA 1.3: Velocidad, ráfaga, y frecuencia anual de los vientos. Imagen tomada de: https://es.windfinder.com/forecast/cuenca_mariscal_lamar_aeropuerto

Radiación Solar

Uno de los factores, en los que se requiere un mayor análisis es la radiación solar. Este elemento climático tiene gran importancia sobre cómo puede incidir, y a la vez, como se le puede aprovechar en la envolvente de una vivienda. En gran parte, la radiación solar puede determinar la ubicación de los elementos de protección (muros), y con ello condiciona las

sensaciones que puede percibir el cuerpo humano con relación a la temperatura interior que puede ocasionar la misma.

De esta forma, según los datos de la (Tabla 1.6), la radiación solar muestra variaciones durante los diferentes meses del año. Estas variaciones son de aproximadamente $3.92kWh/m^2$ en el mes de junio, y de $5.06kWh/m^2$ en el mes de noviembre, mientras que en el resto de los meses se obtiene un promedio de $4.5kWh/m^2$.

Tabla 1.6: RADIACIÓN SOLAR (AÑO 2010). ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA SOLAR, UNIVERSIDAD DE MASSACHUSETTS, CITADO EN [GUILLÉN & CORDERO, 2012](#).

| Meses | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sept. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | 4,62 | 4,62 | 4,60 | 4,25 | 4,20 | 3,92 | 4.15 | 4,40 | 4,4 | 4,7 | 5,06 | 4,9 |

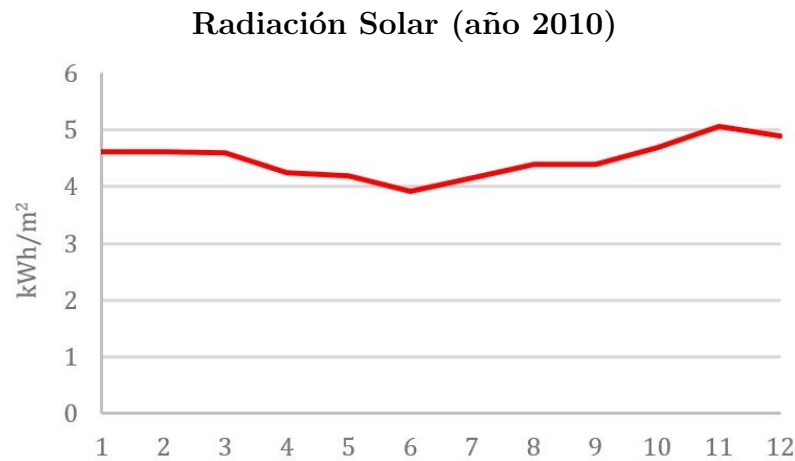


FIGURA 1.4: Radiación Solar (año 2010). Elaboración propia con datos tomados del Instituto de Ingeniería Solar, Universidad de Massachusetts, citado en [Guillén & Cordero, 2012](#)

Tanto los factores y elementos climáticos, hoy en día conllevan estudios minuciosos dentro de la Arquitectura, ya que tienen gran incidencia en relación hacia cualquier envolvente arquitectónica y en especial sobre los muros, que en gran porcentaje no es considerado para mantener el calor en interior de las edificaciones.

Por esta razón si se requiere lograr un confort interno dentro de un determinado espacio, es indispensable estudiar el clima del sector. En el clima del caso de estudio, se aprovechará estrategias de captación solar tanto directa como indirecta.

1.4. Sistemas de Captación Solar

Se entiende a los sistemas de captación solar como, “aquellos elementos que utilizan la energía solar para distintos fines como, por ejemplo: la calefacción, ventilación o acondicionamiento de los edificios y viviendas” (Torres & Bucheli, 2017).

Inicialmente las primeras edificaciones introducían en su diseño los sistemas captadores solares, pero con el pasar del tiempo, esto ha ido cambiando, de tal modo que ha surgido la incorporación de los sistemas pasivos, (Serra & Coch, 1995).

Así, el primer paso para el aprovechamiento de la energía solar es su captación, aspecto dentro del que se pueden distinguir dos sistemas de características muy diferentes entre sí, siendo estos; los sistemas activos y pasivos.

Por un lado, los sistemas activos, implementan equipos mecánicos eléctricos que comúnmente están situados en las cubiertas o fachadas de las edificaciones, esto con el fin de captar la irradiación, transformarla en energía útil, almacenarla y distribuirla para su posterior uso (Zalamea & Quesada, 2017). Entre los sistemas de captación solar activa se encuentran; las captaciones térmicas (sistemas de agua caliente, calefacción, refrigeración), fotovoltaicas, o una combinación de los anteriores (híbridas).

Y por otro lado se encuentran los sistemas pasivos, los cuales que aprovechan la captación solar mediante estrategias aplicadas a la orientación, geometría y materiales que constituyen la edificación (Giraldo & Arango, 2020).

El presente caso de estudio se enfocará en los sistemas para calefacción pasiva, por lo que se tomará mayor interés en la funcionalidad que presentan estos sistemas bioclimáticos.

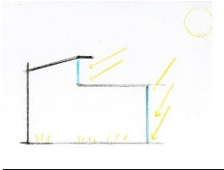
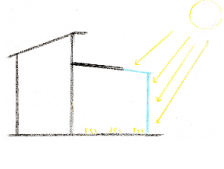
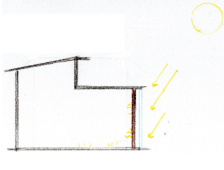
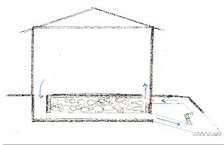
1.4.1. Sistemas Pasivos

Los sistemas pasivos tienen la función de aprovechar la energía solar para la calefacción interior del espacio, evita la incorporación de sistemas mecánicos, y por el contrario, utilizan la misma forma y materiales de la edificación.

Este tipo de sistema se clasifica por dos tipos de captación solar, la primera es a través de captación directa por medio de las ventanas, y la captación indirecta a través de la envolvente arquitectónica (muros).

De esta manera, los sistemas pasivos abordan 4 configuraciones diferentes, que a continuación se describen, (Tabla 1.7).

Tabla 1.7: TIPOS DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN SOLAR. ELABORACIÓN PROPIA DATOS DE SERRA Y COCH, 1994 .

| SISTEMA DE CAPTACION | DESCRIPCIÓN |
|---|---|
|  | <p>Directa Son aquellos en donde la captación solar es directa e incide sobre el espacio que se desea acondicionar. Para lograr es captación, se permite el acceso de los rayos solares a través de las superficies vidriadas (ventanas o lucernarios). De este modo, la energía acumulada se retarda en el espacio, mientras que los vidrios reducen las pérdidas de calor.</p> |
|  | <p>Semidirectos Este tipo de sistema posee un espacio en el que gran parte de sus paredes son superficies acristaladas totalmente cerradas, creando así un espacio invernadero, en ocasiones puede existir un muro en la parte habitada y otro que sirve para recibir la captación. La radiación penetra a través de las superficies vidriadas y es absorbida dentro del mismo, para convertirse en calor y ceder al espacio por conducción.</p> |
|  | <p>Indirectos En este sistema, la radiación atraviesa una superficie de vidrio para luego ser captada por un muro de alta masa térmica, y ceder la energía captada hacia el espacio interior. Estos sistemas se clasifican por la captación por medio de fachadas, por cubierta o por suelo. El primer caso es el muro invernadero, la captación solar se realiza por medio de un muro vertical, protegida por un vidrio y dejando una cámara de aire de 12cm. Otro caso es el muro Trombe, el cual posee características similares al muro invernadero, pero lo que lo diferencia, son las perforaciones que se le pueden dejar en la parte superior e inferior.</p> |
|  | <p>Independientes Son sistemas de climatización natural, en donde, la captación de la radiación solar, la acumulación y cesión, se realiza por medio de flujos naturales de aire o de agua que circulan por conductos hacia el ambiente interior que se requiere acondicionar.</p> |

Para esta investigación se considerará únicamente el sistema pasivo de captación solar indirecta por medio de su fachada; es decir el sistema de muro Trombe. Con el propósito de evaluar la factibilidad del mismo en el clima de estudio.

Se ha visto importante el aporte que puede brindar este sistema, ya que al ser un “diseño solar pasivo representa una de las estrategias más importantes para reemplazar los combustibles fósiles convencionales y reducir la contaminación ambiental en el sector de la construcción” (RECONSOST, 2019). Con esto queda claro como la energía solar puede ser de gran contribución y aporte a los requerimientos de calefacción que pueda demandar una vivienda.

1.5. El Muro Trombe

El muro Trombe se trata de un sistema de calefacción solar pasivo de calentamiento indirecto, creado en Francia en 1957 por Félix Trombe y Jacques Michel (Olaya, 2005) y se trata del primer Muro Trombe experimental, diseñado especialmente para aumentar las ganancias de calor hacia el interior de las viviendas mediante el aprovechamiento de la radiación solar, figura 1.5.

El aporte que puede brindar este tipo de sistema, es que ayuda a reducir la demanda de calefacción y por ende el consumo energético hasta un 30 %, con esto la degradación del medio ambiente y las emisiones de gases de efecto invernadero, (Agrawal, 1989).



FIGURA 1.5: Primer Muro Trombe experimental. Imagen tomada de <http://hiddenarchitecture.net/ungreen-trombe-wall/>

Este sistema está compuesto principalmente por una superficie de vidrio en la parte exterior, un muro de alta inercia térmica como el hormigón, piedra, adobe, ladrillo y una cámara de aire. En algunos casos, se emplean ductos o rejillas de ventilación tanto en la parte superior e inferior del muro acumulador, cabe indicar que los ductos pueden ser controlados, según el tipo de clima en el que se desee aplicar este tipo sistema, figura 1.6.

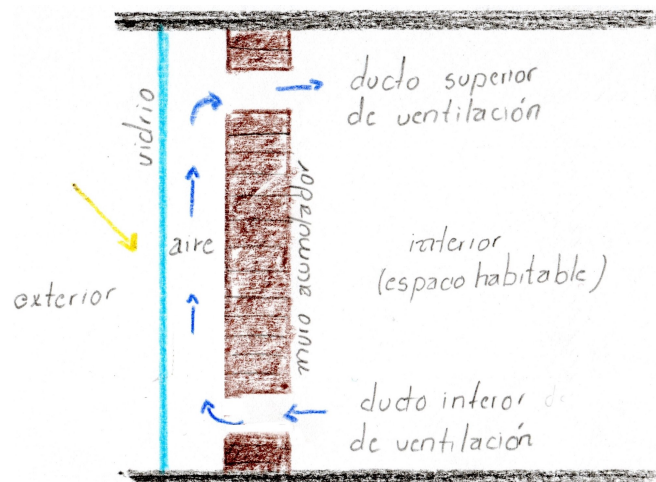


FIGURA 1.6: Partes del muro Trombe. Elaboración propia

1.5.1. Funcionamiento Térmico

Una vez indicado las partes del sistema de muro Trombe, ahora se da paso para explicar su funcionamiento y la transferencia de calor.

El muro Trombe es un sistema pasivo de recolección de energía solar de forma indirecta, aplicado para el calentamiento interno de viviendas por medio de la transferencia de calor, ya sea por conducción, convección y/o radiación, figura 1.7.

En primera instancia la radiación solar atraviesa el vidrio y calienta el aire que existe entre el mismo vidrio y el muro. Seguidamente, el aire de la cámara que ha sido calentado asciende por convección natural, e ingresa por los orificios superiores e inferiores del muro para luego pasar al espacio habitable. Finalmente, la energía que ha logrado ser captada por el muro, empieza a cederse hacia todo el espacio interior por medio de la convección natural (Torres & Bucheli, 2017).

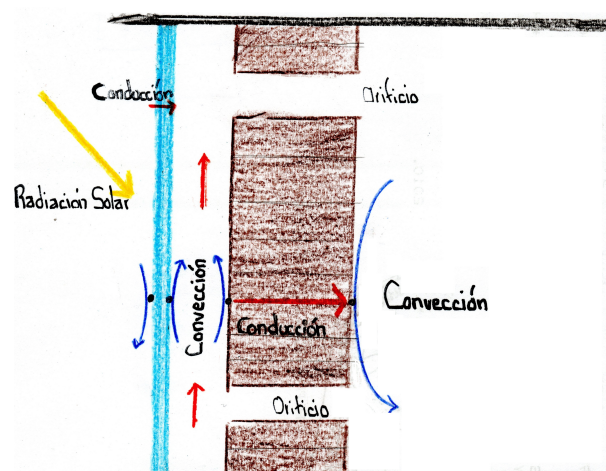


FIGURA 1.7: Transferencia de calor en el muro Trombe. Elaboración propia

1.6. Elementos que componen el Muro Trombe

Entre los principales elementos que componen el muro Trombe se encuentra; el vidrio, la cámara de aire, el muro acumular, y posibles mejoras que se puedan adicionar como, una capa de pintura o una lámina delgada de metal.

A continuación, se describen estos elementos y la funciones que cumplen cada uno de ellos.

1.6.1. Vidrio

Este elemento cumple la función de generar el efecto invernadero, y a su vez previene que la radiación solar retorne al exterior luego de haber sido captada. En este sentido [Loaiza \(2013\)](#), considera que un vidrio de alta transmisión solar puede aumentar el calor en la pared, y a la vez aísla por más tiempo la energía captada. Este tipo de vidrio hace que se genere el atrapamiento radiativo, permitiendo que el sol entre pero que el calor no salga.

1.6.2. Cámara de aire

La cámara de aire cumple la función de minimizar o maximizar las pérdidas de calor que existe entre el espacio del vidrio y del muro.

1.6.3. Muro acumulador

Este elemento tiene la función específica de transferir la energía acumulada y transmitir el calor (por conducción) a través del material deseado, para posteriormente cederlo hacia el interior del espacio a calefactar. Es necesario prestar importancia al espesor y sobre todo a las características de conductividad y transmisiones térmicas que pueden presentar los distintos materiales.

Además, se prevé que los rendimientos de los muros pueden estar determinados de acuerdo a su capacidad de capacidad de conductividad, por lo que, “si mayor es la conductividad, mayor calor se trasfiere a través del muro” ([Loaiza, 2013](#)).

Entre los materiales de construcción local que habitualmente se utilizan en la ciudad de Cuenca, se encuentra el adobe, tapial, y ladrillo. Por lo que, a partir de estos materiales mencionados se revisarán sus propiedades térmicas que poseen, para efectuar los correspondientes análisis que se realizarán en los siguientes capítulos.

1.6.4. Posibles mejoras

Mediante la aplicación de una correcta superficie como una capa de pintura o una hoja especial de metal, que están adheridos en el exterior de la pared, se puede aumentar el rendimiento del muro. Estas posibles mejoras ayudan a maximizar en la absorción producto de las radiaciones solares.

En conclusión, todos los elementos que han sido mencionados cumplen funciones claras y específicas, por ello, es importante indagar su la disponibilidad del material, las dimensiones, su correcta ubicación, el color que puede presentar la superficie exterior y entre otros aspectos, ya que, de estos, dependerá considerablemente en la funcionalidad del sistema de muro Trombe.

**Muro Trombe como Sistema Pasivo de
Acondicionamiento Térmico**

2.1. Muro Trombe

El sistema pasivo de muro Trombe, cumple principalmente con la propiedad de calefacción, basado en las funciones de la captación, almacenamiento y distribución de la energía solar hacia el interior de un determinado espacio (Cuevas, 2019). Sin embargo, para poder aprovechar esta estrategia bioclimática de la manera más eficiente, es indispensable conocer y considerar el funcionamiento que tienen los dos tipos de sistemas, el Muro Trombe Ventilado (MTV) y el Muro Trombe no Ventilado (MTNV).

En el primer caso, el sistema de MTV contiene aberturas u orificios en la parte superior e inferior del muro acumulador, estas aberturas ayudan a mejorar el flujo del aire caliente, mientras que, el sistema MTNV no contiene aberturas, y a pesar de aquello, puede conseguir una mayor temperatura en la cámara de aire.

Como se revisó en el capítulo anterior, para el clima de la ciudad de Cuenca es necesario e importante la utilización de sistemas pasivos de captación solar como es el caso del muro Trombe. El mismo que por medio del uso correcto de las variables materiales de alta masa térmica (adobe, tapial, ladrillo), y con la correcta aplicación de variables morfológicas (orientación, espesor), se pueda llegar a un eficiente funcionamiento en relación a la captación de la radiación solar.

A continuación, se repasan distintas publicaciones realizadas con relación al tema de estudio. Se presentan, estudios entre los dos tipos de sistemas MTV y MTNV. De igual manera, se exponen investigaciones con diferentes configuraciones entre las variables morfológicas y materiales. Finalmente se exhiben los resultados de dichas variables que han sido aplicadas en distintos climas, con las siguientes descripciones.

2.1.1. Muro Trombe Ventilado y no Ventilado

Diversos estudios han abordado investigaciones sobre la aplicación entre el sistema pasivo de MTV y el MTNV. Por ejemplo, Guillén & Cordero (2012), en su tema de tesis establecen criterios bioclimáticos para el diseño de viviendas unifamiliares a nivel de anteproyecto en la ciudad de Cuenca (Ecuador).

Dentro de las estrategias bioclimáticas, se ha aplicado el sistema pasivo de acondicionamiento térmico muro Trombe, el mismo que ha sido debidamente configurado en dos espacios determinados.

En el primer caso, se aplica el sistema MTNV en la fachada de una zona de uso continuo como el dormitorio, puesto que la temperatura que alcanza la cámara de aire es superior frente a un MTV, por tal razón, permite un mayor almacenamiento de energía durante el día para luego cederla en la noche.

Las configuraciones realizadas en este sistema consisten en una cámara de aire de 5cm (ya que no es necesario la convección de aire). Para el dimensionamiento del espesor del muro acumulador en ambos casos se ha utilizado el ladrillo macizo (24cm), puesto que

es un material que presenta mayor conductividad térmica según la (Tabla 2.1). De igual manera indican que el sistema constructivo con este material (ladrillo macizo) es el más predominante en la ciudad, (Tabla 2.2). La superficie del *muro* ha sido pintada de color marrón oscuro, además el área del mismo y del vidrio fue de $5m^2$ ya que depende del área útil del ambiente a calentar. En ambos casos el área a calefactar cuenta con $9.80m^2$.

Tabla 2.1: ESPESOR Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA RECOMENDADO PARA UNA ALTA INERCIA TÉRMICA SEGÚN MATERIALES. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE EDWARD MAZRÍA, CITADO EN GUILLÉN & CORDERO (2012)

| MATERIAL | ESPESOR RECOMENDADO (<i>cm</i>) | CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/m. °C) |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Adobe | 20 a 30 | 0,45 |
| Ladrillo común | 25 a 35 | 0,63 |
| Hormigón en masa | 30 a 45 | 1 |

Tabla 2.2: VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE CUENCA SEGÚN SISTEMA CONSTRUCTIVO. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA - 2010, CITADO EN GUILLÉN & CORDERO, 2012.

| CATEGORÍA | CASOS (#) | PORCENTAJE (%) |
|-------------------|--------------|----------------|
| Hormigón | 3840 | 4.45 |
| Ladrillo | 73211 | 84.82 |
| Adobe | 7614 | 8.82 |
| Madera | 1333 | 1.54 |
| Caña revestida | 189 | 0.22 |
| Caña no revestida | 17 | 0.02 |
| Otros | 113 | 0.13 |
| TOTAL | 86317 | 100 |

Con respecto al sistema MTV, se han aplicado configuraciones en una zona de uso más inmediato como la sala, considerado como un espacio que no se extiende hacia horas de la madrugada, de tal manera, el sistema se puede aprovechar en el transcurso del día.

Conforme al clima de la ciudad de Cuenca y un área establecida de $9.80m^2$. El sistema MTV se ha configurado de acuerdo a la (Tabla 2.3), estableciendo así, un total de 8 orificios de $10 \times 10cm$ distribuidos cuatro en la parte superior y cuatro en la parte inferior del muro.

Tabla 2.3: ÁREA DE MURO TROMBE Y NÚMERO DE ORIFICIOS SEGÚN EL ÁREA ÚTIL DE LA HABITACIÓN A CALENTAR. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DEL GRUPO DE APOYO AL SECTOR RURAL - PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE PERÚ, CITADO EN [GUILLÉN & CORDERO \(2012\)](#).

| ÁREA DE HABITACIÓN (m^2) | ÁREA DEL MURO TROMBE (m^2) Y N.º DE ORIFICIOS EN LA PARED | | | |
|------------------------------|---|------------------|---------------|------------------|
| | Lugares templados | N.º de orificios | Lugares fríos | N.º de orificios |
| 9 a 11 | 5 | 8 | 7 | 10 |
| 12 a 14 | 6,5 | 10 | 9 | 14 |
| 15 a 17 | 8 | 12 | 11 | 16 |
| 18 a 20 | 9,5 | 14 | 13,5 | 20 |
| 21 a 23 | 11 | 16 | 15,5 | 24 |

Las autoras mencionan que la función de los orificios es de crear un bucle convectivo en una cámara de aire de 9cm (esta dimensión es óptima ya no limita la circulación de aire), haciendo que el aire frío se caliente y circule por el interior del espacio.

En lo que se refiere a la (figura 2.1), se observa el proceso de captación - acumulación en el día y la distribución - aislamiento del calor en la noche entre el sistema MTNV y el MTV.

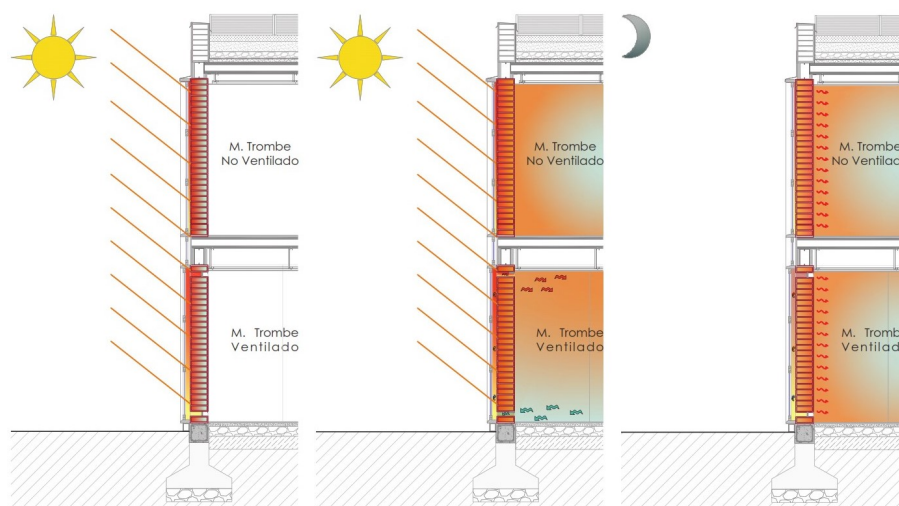


FIGURA 2.1: Proceso de funcionamiento del MTNV (arriba) y el MTV (abajo). Imagen tomada de [Guillén & Cordero, 2012](#)

El tipo de sistema MTV o MTNV además de estar debidamente configurados, es importante considerar que su aplicación involucra de acuerdo el tiempo y a la actividad que se pretenda ejecutar en los distintos espacios arquitectónicos de una vivienda.

En el contexto de las configuraciones en los sistemas de MTV y MTNV, [Briga-Sá et al. \(2014\)](#), utilizan la metodología de cálculo del rendimiento energético para el sistema de muro Trombe basado en la norma ISO 13790: 2008 (Eficiencia energética), adaptado a las condiciones climáticas de ciudad de Vila Real (Portugal).

Para el cálculo de rendimiento energético, en primera instancia se han aplicado dos tipos de sistemas; MTV y MTNV en una superficie de $7,52\text{m}^2$.

En el primer caso, el sistema MTV consta de un muro de hormigón pintado de negro en su superficie, una cámara de aire de 10cm , doble acristalamiento en el exterior y orificios en la parte superior e inferior del muro correspondiente al 3% del área total del mismo. Mientras que, en el segundo caso, el MTNV mantiene las mismas configuraciones mencionadas, a excepción de las aberturas.

Con respecto al espesor de la pared, han adaptado el método de cálculo según la norma internacional anteriormente mencionada, en la que se estudia su comportamiento de las ganancias o pérdidas de calor en un muro de hormigón con espesores de 15cm , 20cm , 25cm , 30cm , 35cm y 40cm .

Los resultados obtenidos indicaron que, en una temporada de calefacción si el muro Trombe se ventiló, las ganancias de calor aumentaron con el aumento del espesor de la masiva pared. Sin embargo, en el caso del MTNV, las ganancias de calor disminuyeron cuando el espesor ha aumentado figura 2.2, cuanto más gruesa sea la pared, más tiempo tarda el calor para alcanzar el interior.

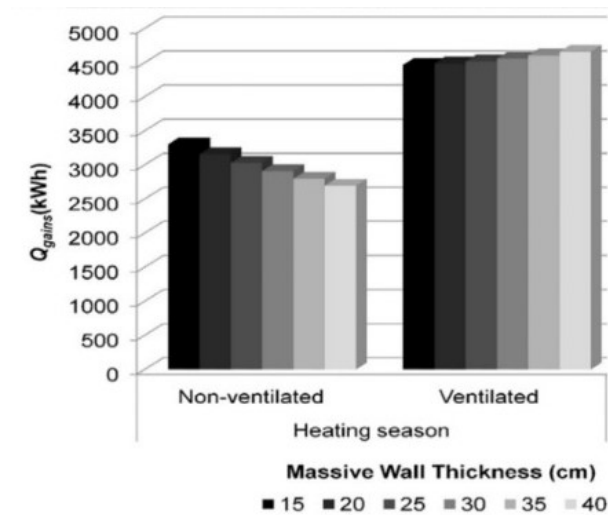


FIGURA 2.2: Ganancias de calor globales de un muro Trombe no ventilado (izquierda), y un muro Trombe ventilado (derecha) en función de la pared de hormigón. Imagen tomada de [Briga-Sá et al. \(2014\)](#)

Finalmente, en este estudio se concluyó que las necesidades de calefacción de energía se pueden reducir hasta en un 16.36% si se agrega un muro Trombe a la envoltura del edificio.

Los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta proporciona un enfoque válido para calcular el rendimiento térmico del sistema de muro Trombe conforme al dimensionamiento del muro acumular según el tipo de sistema.

Otro ejemplo de estudio es de [Balcomb & Mcfarland \(1978\)](#), quienes estudian el comportamiento del sistema de MTV y el MTNV en nueve climas diferentes de los Estados Unidos. El estudio manifestó que orificios del muro producen un flujo inverso durante la

noche y reducen la eficiencia en gran medida en determinadas circunstancias.

Los autores propusieron el uso de amortiguadores para controlar los orificios para evitar el flujo inverso. Sus resultados revelaron que el uso de orificios controlados no afectan significativamente en el rendimiento de los muros Trombe en climas templados.

Además, concluyeron que las paredes Trombe ventiladas funcionan un 10-20 % más eficientemente en los climas severos (Boston -9°C a 25°C).

Si bien, los dos tipos de sistemas de muro Trombe cumplen los mismos objetivos, es importante conocer que un muro con o sin orificios influyen dependiendo al clima en el que se desea emplazar el sistema.

En otro sentido, [Manzano \(2017\)](#) analiza el estado actual de los espacios interiores de un establecimiento educativo y determina el entorno saludable en el cual permanecen los estudiantes de la escuela “General Córdova” en la ciudad de Ambato (Ecuador).

La metodología aplicada en este estudio, es a través de un análisis de los componentes de estudio solar, sombras, investigaciones de campo y una metodología cuantitativa con 663 encuestas aplicadas entre docentes y alumnos. Entre los datos obtenidos se ha determinado que un 67 % de los encuestados manifiestan que los materiales delgados de hormigón y bloques situados en las mamposterías de las aulas no son propicios en el aislamiento del frío, mientras tanto, el 72 % de encuestados consideran que se debe mejorar la condición térmica interna, finalmente el 59 % creen que el entorno escolar repercute hacia los problemas de salud.

El autor ha comprobado que la insuficiencia de captación solar causa molestias, esto debido al deficiente estudio técnico sobre la orientación, latitud, humedad relativa y temperatura anual del sector, que junto con el recorrido del viento y su velocidad están ligadas a formar parte del discomfort térmico.

Como resultado de los datos obtenidos, el autor indica que es adecuado ejecutar muros de acumulación ventilado en determinadas zonas, ya que presentan una mayor incidencia solar y por ello, se puede conseguir en confort térmico interno deseado.

2.2. Variables Morfológicas

2.2.1. Orientación, espesor

Respecto a los análisis de estudios encontrados sobre las variables morfológicas, Pomaya (2013) propone el uso del muro Trombe para lograr el confort térmico en el terminal terrestre de la ciudad de Huancayo (Perú). Esta ciudad está situada a 3,266 m.s.n.m., a una latitud de 12°03'38" y 75°12'32" de longitud, condiciones geográficas algo similares al caso de estudio de esta tesis.

La metodología aplicada es descriptiva-explicativa no experimental, ya que solamente se describe y explican los parámetros respecto al espacio, la función y forma para la optimización en el uso del sistema de muro Trombe.

Mediante el uso de la (Tabla 2.4), se puede obtener el dimensionamiento del área de captación y el número de orificios que debe tener muro Trombe. Este dimensionamiento tiene relación según el nivel de frío y el área de la habitación en que se desea calentar.

Tabla 2.4: DIMENSIONAMIENTO DEL MURO TROMBE. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE POMAYA, 2013.

| Área de la habitación (m ²) | Área del muro Trombe m ² (lugares fríos) | Nº de orificios | Área del muro Trombe m ² (lugares muy fríos) | Nº. de orificios |
|---|---|-----------------|---|------------------|
| 9 a 11 | 7 | 10 | 8.5 | 12 |
| 12 a 14 | 9 | 14 | 11 | 16 |
| 15 a 17 | 11 | 16 | 13.6 | 20 |
| 18 a 20 | 13.5 | 20 | 16.5 | 24 |
| 21 a 23 | 15.5 | 24 | 19 | 28 |

De igual manera, el autor considera importante minimizar la relación del área-volumen, esto para limitar las pérdidas de calor, es decir, el uso de formas compactas con menor relación entre área/volumen (menor o igual a 1), limitan las pérdidas de la energía y optimizan la distribución de la misma, ver figura 2.3.

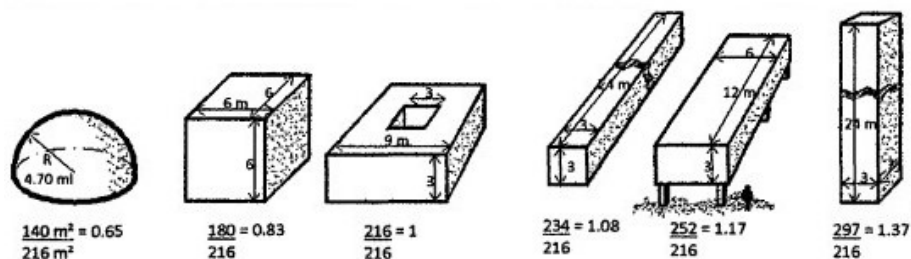


FIGURA 2.3: Diferentes formas geométricas que determinan la relación área-volumen. Imagen tomada de Pomaya, 2013

Con respecto al ángulo de captación, se establece el uso de la (Tabla 2.5), en donde se indica que la latitud debe ser igual a la misma, es decir 12°03'40" mientras que los colores oscuros como el negro o el azul marino, poseen mayor coeficiente de absorción solar.

Adicionalmente, se estudiaron los materiales con mayor capacidad térmica (Kj/dm^3C) como al ladrillo (1.61), adobe y tierra (1.34), recalcando que los muros de mayor espesor, tardan más en acoger la energía solar.

Tabla 2.5: ÁNGULO DE CAPTACIÓN DEL MURO TROMBE SEGÚN LA LATITUD DEL LUGAR DE APLICACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE POMAYA, 2013.

| LATITUD DEL LUGAR | INCLINACIÓN |
|-------------------|---------------|
| de 0° a 10° | i= lat. + 15° |
| de 10° a 20° | i= lat. + 15° |
| de 20° a 35° | i= lat. + 15° |
| >de 35° | i= lat. + 15° |

Como resultado de los análisis efectuados para el clima frío de Huancayo. Se establece que con el uso del muro Trombe el ambiente interior cuando la temperatura es mínima, se alcanza un promedio de 12.45°C y cuando es máxima se puede alcanzar un promedio de 28°C.

Por otro lado, se indica que la radiación solar es intensa favoreciendo la latitud y la altura llegando a percibirse hasta $7,748Wh/m^2$ sobre el plano horizontal, además de aplicar materiales con alta capacidad térmica como el concreto (agua, acero, piedra, hormigón), protegido por un vidrio doble de 6 mm o agrofilm (lámina plástica) como materiales transparentes de mayor transmisión de radiación solar.

La morfología de un modelo prototipo de simulación contiene formas compactas debidamente orientadas para una correcta captación de energía solar en una determinada superficie en función del clima en el que se encuentre.

En otro estudio, Luna et al. (2014) realizan una simulación mediante el programa Design Builder para estimar el desempeño térmico y el costo de energía anual en un modelo prototipo aplicado en Mexicali, Baja California. El modelo prototipo de análisis es equivalente al 30% del área de una vivienda de interés social.

En el diseño prototipo de análisis se establece un área de $45m^2$, con un volumen de 121.21m³, orientado hacia el sur, ya que esta zona tiene mayor incidencia de radiación solar.

La evaluación de análisis se realiza aplicando cinco variantes de funcionamiento en el sistema de muro Trombe en un periodo frío y cálido con características constructivas para cada tipo de muro, (Tabla 2.6).

Tabla 2.6: VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE LUNA ET AL., 2014.

| Tipo de Muro | Variaciones de funcionamiento | Características constructivas |
|--------------|---|--|
| Tipo 1 | a) Con intercambio conductivo. b) Sin intercambio convectivo con el espacio interior y ambiente exterior. c) Sin sombreado anual del vidrio. | a) Base en ladrillo recocido de 0.30 m, pintados de color negro en la parte exterior. b) Pared externa (sur) del espacio donde se ubica el muro Trombe, con base en bloque con aislamiento (poliestireno expandido 0.0254 m). c) Paredes externas de espacio de bloque sin aislamiento. d) Techo de vigueta y casetón con aislante (poliestireno expandido 0.508 m) |
| Tipo 2 | a) Con intercambio convectivo (MT)-espacio interior, en periodo frío. b) Sin sombreado anual del vidrio | Características a), b), c) y d). Además de: f) rejillas con ventilación al espacio interior. |
| Tipo 3 | a) Sin intercambio convectivo con espacio interior. b) Con enfriamiento convectivo natural (MT) ambiente exterior durante periodo cálido. c) Sin sombreado anual del vidrio. | Características a), b), c) y d). Además de: e) Rejillas con ventilación al ambiente exterior f) Rejillas con ventilación al espacio interior. |
| Tipo 4 | a) Con intercambio convectivo (MT)-espacio interior en periodo frío. b) Con enfriamiento convectivo natural (MT)-ambiente exterior en periodo cálido. c) Sin sombreado anual del vidrio. | Características a), b), c), d), e) y f). |
| Tipo 5 | a) Con intercambio convectivo (MT)-espacio interior en periodo de frío. b) Con enfriamiento convectivo natural (MT)-ambiente exterior en periodo cálido. c) Con sombreado de vidrio sólo en periodo cálido. | Características a), b), c) d), e) y f). Además de: g) Muro Trombe sombreado. |

En cuanto a los resultados simulados, la figura 2.4 muestra que el muro tipo 4 es posible ahorros energéticos anuales de hasta 71.93 % por calentamiento.

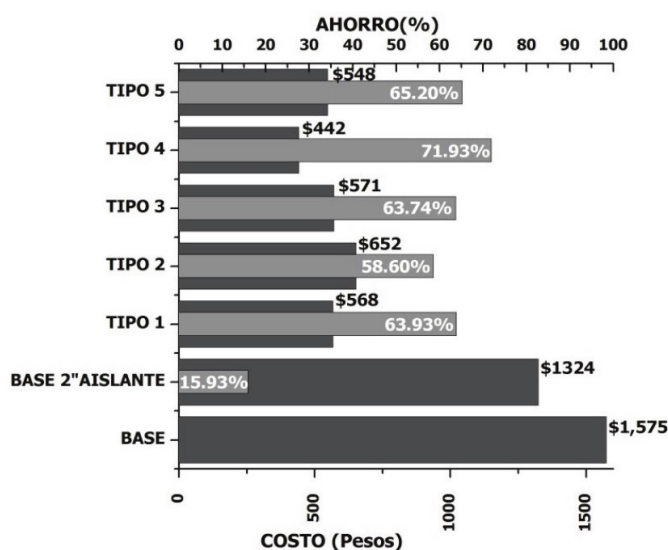


FIGURA 2.4: Costo y ahorro de energía por calentamiento según las variables de funcionamiento y las características constructivas. Imagen tomada de Luna et al., 2014.

A demás, se determina que el comportamiento térmico en un periodo anual con el uso del muro Trombe es posible incrementar en 22 días el confort térmico en comparación con una vivienda que no utiliza ninguna estrategia de adecuación.

Es necesario mencionar como las características constructivas pueden variar las distintas variables de funcionamiento en los diferentes tipos de sistema de muro Trombe. Por esta razón se ve necesario considerar estos aspectos indispensables como la superficie vidriada, esto con el afán de mantener porcentajes conforme a los periodos necesarios.

Luengo (2018) analiza técnica y económicamente la construcción de un muro Trombe aplicado en un establecimiento infantil que reúne diariamente a 60 niños con edades de entre 1 y 4 años en la ciudad de Lebu (Chile). Esta ciudad se caracteriza por un clima promedio de 14°C y fuertes vientos en casi todo el año.

La construcción del muro se aplica en una sala de juegos definido como el espacio que demanda un mayor tiempo para la estadía de los niños.

El muro se orientó en la fachada en el nor-oeste, ya que cuenta con los criterios y condiciones necesarias para captar los rayos solares durante gran parte del día.

Para el estudio solamente se ha considerado las dimensiones de sus elementos externos y los materiales que lo conforman. El muro tiene una dimensión de 3m de ancho x $1,80\text{m}$ de alto y 20cm de espesor de hormigón, ya que actualmente el muro está construido con este material mencionado.

Se concluye que la construcción del muro Trombe es factible por su bajo coste material e instalación que bordea los $30\$/\text{m}^2$, y su vez el sistema aporta a la captación de energías solares para alcanzar un confort térmico adecuado, disminuyendo los gastos energéticos y emanaciones de gases contaminantes al medio ambiente.

La definición de un espacio interno y el aprovechamiento del material actual, repercute en cierta medida el costo del sistema de muro Trombe, sin embargo, con la correcta configuración se puede disminuir este costo y además se puede dar aporte sobre la contaminación ambiental.

Dentro de un estudio de las variables de funcionamiento, Álvarez (2015) se centra en el tipo de medio convectivo y longitud de canal del elemento colector.

El autor aplica una metodología experimental, obteniendo medidas, tipos de materiales y medios convectivos que involucren un mayor rendimiento en el uso de un muro Trombe en la ciudad de Ambato (Ecuador) en un clima 14°C 18°C y una radiación promedio de $4650\text{Wh}/\text{m}^2/\text{día}$.

Para la correspondiente área de la propuesta, se diseñó una habitación de 7.50m^2 , con una altura de 2m , largo 2.20m , ancho 3.60m y utilizando el principio de funcionamiento de muro Trombe que constituye unas paredes de fibrocemento, una pared externa y una

pared interna separadas a 10cm. Mediante el uso de la formula del factor forma se ha ratificado el uso de las medidas establecidas anteriormente (Tabla 2.7)

Tabla 2.7: FACTOR FORMA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [ÁLVAREZ, 2015](#).

| Factor de forma (f) | Zona climática |
|---------------------|----------------|
| $0,5 < f < 0,8$ | Templada |
| $f > 1,2$ | Cálida |

Publicación INEN: Asoleamiento y sus aplicaciones para el diseño climatológico de la vivienda en el Ecuador

$$f = \frac{S}{V} \tag{2.1}$$

F (factor forma)
 S (superficie en m^2) = 7.80
 V (volumen en m^3) = 15.85

Aplicando los datos a la ecuación se obtiene como resultado $f=0.5$ correspondiente a una zona climática templada. Por otro lado, se han aplicado ensayos a tres configuraciones en los canales de aire con dimensiones de 5cm, 10cm, y 15cm, en donde se determinó la variación de las temperaturas promedio ambientales (15 - 26°C), humedad (40 - 65 %) y una velocidad de viento (m/s 0.05 - 0.15) resultados obtenidos al modificar las variables anteriormente manifestadas.

Además, se determinaron las propiedades físicas en un bloque de 10cm de espesor unido y revestido con una capa de cemento para su buen acabado superficial. En la figura 2.5, se presentan los resultados establecidos en un determinado periodo, indicando que la habitación diseñada alcanzó el 62 % de conformidades térmicas, el 23 % por disconformidad por calor y un 15 % por disconfort por frío.

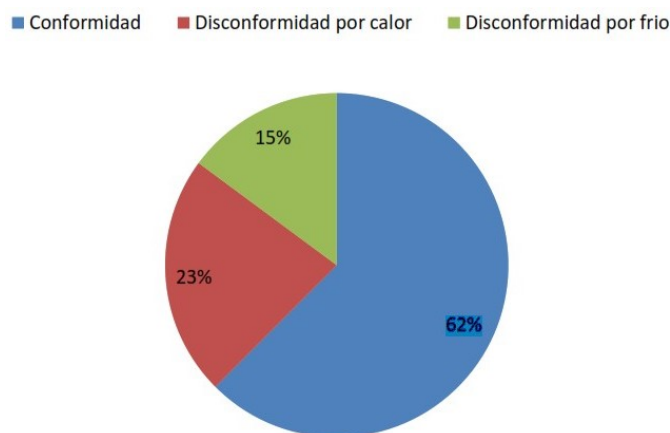


FIGURA 2.5: Porcentaje de nivel de sensación en el interior de la habitación en estudio de muro Trombe en Ambato-Ecuador. Imagen tomada de [Álvarez, 2015](#).

Durante la fase de configuración del sistema de muro Trombe, es importante realizar una toma de datos anuales, sobre todo en la temperatura, ya que es una variable que cambia muy drásticamente en las diferentes estaciones del año.

Otro ejemplo de estudio es el de [Hernández et al. \(2016\)](#), quienes analizan el calor conjugado transferencia en un modelo bidimensional de un sistema de muro Trombe para evaluar la energía almacenada, las pérdidas de energía térmica y las temperaturas en la habitación.

Se han utilizado los datos climáticos en horarios de los días más fríos y más cálidos del 2014 para evaluar el comportamiento del muro en dos ciudades de México (Huitzilac y Toluca).

El muro Trombe fue aplicado en una habitación, y se ha realizado una evaluación térmica en un periodo de 8:00h a 18:00h, bajo los siguientes parámetros. La configuración del sistema consiste en 3m la altura de la cavidad, 2.6m de altura del muro de hormigón con un espesor de 30cm y un vidrio transparente de 6 mm de espesor.

Las respectivas simulaciones se efectuaron de forma numérica. Mediante la figura 2.6, se muestran las isotermas de la siguiente época intervalos: 8:00 a 10:00, 12:00 a 13:00 y 15:00 a 18:00h. Los periodos indicados representan el comportamiento del campo de temperatura en el sistema durante la mayor parte del día. Se encontró que las pérdidas de energía térmica a través de la pared semitransparente son alrededor del 60% de la radiación solar incidente en el sistema.

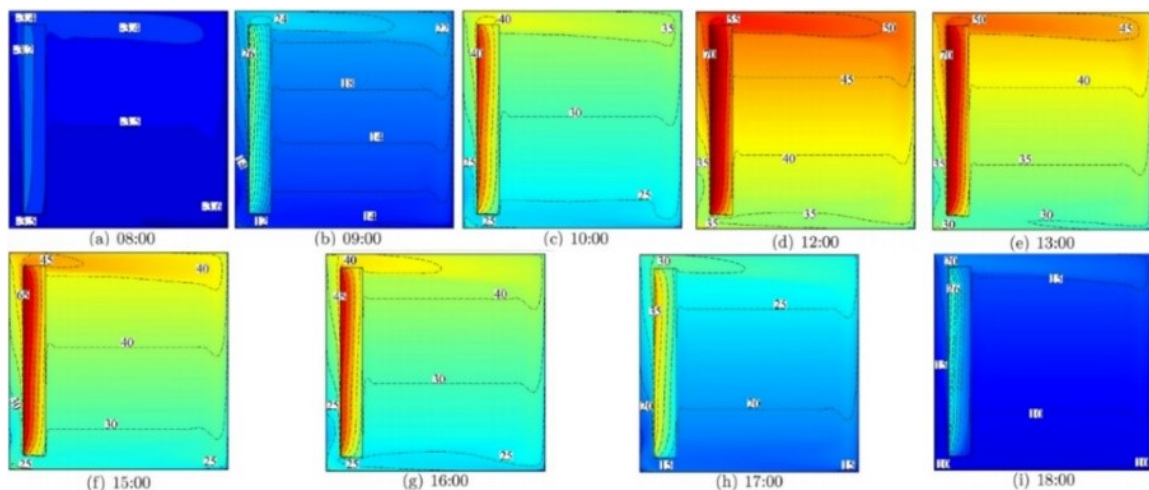


FIGURA 2.6: Isotermas para Huitzilac: R-TW- Frío. Imagen tomada de [Hernández et al., 2016](#)

A pesar de las pérdidas térmicas, el sistema de muro Trombe obtiene suficiente energía para mantener el aire dentro de la habitación con una temperatura superior a 35°C. Los resultados de la figura 2.7, representa la energía almacenada en el sistema. Se determina que en ambas ciudades durante el día más frío la máxima energía almacenada es 109MJ y durante el día más cálido es de unos 70MJ. Esta energía es suministrada por la pared de almacenamiento al aire dentro de la habitación durante los períodos sin insolación.

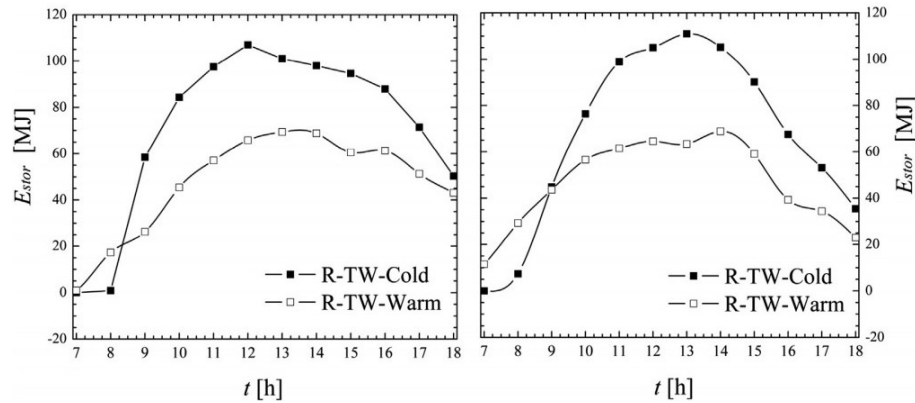


FIGURA 2.7: Isotermas para Huitzilac: R-TW- Frío. Imagen tomada de [Hernández et al. \(2016\)](#), Energía almacenada en el sistema de muro Trombe en Huitzilac (a) y Toluca (b). Imagen tomada de [Hernández et al., 2016](#)

Está claro reconocer que el sistema de muro Trombe en su configuración de calentamiento tiene un alto potencial para implementarse en las ciudades consideradas, pero en sí, hay que considerar la influencia que tienen tanto el dimensionamiento del espacio como en la introducción de los distintos materiales.

Con la finalidad de conseguir una configuración óptima desde el punto de vista térmico, [Cuevas \(2008\)](#), realiza un estudio en modelos físicos y matemáticos para el estudio del movimiento de fluido con la transferencia de calor en un sistema solar pasivo muro Trombe aplicado a climas fríos.

En el estudio paramétrico óptimo se consideraron tres tamaños de cavidad, dos materiales de muro (adobe y concreto) con cinco espesores de muro y tres configuraciones en el ancho del canal para encontrar la configuración correcta, basadas en la temperatura promedio de la habitación y la eficiencia del sistema.

De las configuraciones mencionadas, se obtuvo que el concreto con un espesor de 30cm es más efectivo frente a un adobe, dado que tiene una mejor transferencia de calor al aumentar la eficiencia. Esto se debe a sus propiedades térmicas, lo que le permite que transmita mayor cantidad de calor al aire comparado con el adobe. Una cámara de aire 15cm de ancho, ya es el adecuado para aprovechar de mejor manera la energía solar.

2.3. Variables Materiales

2.3.1. Adobe, Tapial, Ladrillo, Vidrio, Capa de pintura

En las variables de materiales, el estudio de Neira (2015), analiza el acondicionamiento térmico en espacios interiores utilizando la energía solar en las viviendas genéricas de la ciudad de Cuenca (Ecuador).

Entre los sistemas pasivos considerados en la base de experimentación se encuentra el sistema de muro Trombe, en el que se seleccionan y determinan los materiales de alta inercia térmica típicos de la construcción cuencana como: el ladrillo artesanal, ladrillo tochana, bloque pómez, entre otros.

Por medio de fichas técnicas se indican las pérdidas de calor con distintas configuraciones en los materiales anteriormente mencionados, pero manteniendo las mismas configuraciones en la superficie de cristal y la cámara de aire, un vidrio templado (0.012) y en una cámara de aire (0.15m) respectivamente.

A través de la (Tabla 2.8), se presentan las diferencias de pérdidas de calor y temperatura entre los distintos materiales.

Tabla 2.8: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, PÉRDIDAS DE CALOR ENTRE DISTINTOS MATERIALES. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE NEIRA, 2015.

| Material | Espesor (m) | Conductividad térmica (W/m x k) | Pérdida de calor (W) por 1.5h | Pérdida de calor (W) durante la noche 12h |
|----------------|------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| Adobe | 0.4 | 1.1 | 7.54 | 60.32 |
| Ladrillo común | 0.3 | 0.69 | 7.36 | 58.88 |
| Tapial | 0.6 | 0.58 | 7.28 | 58.24 |
| Hormigón | 0.3 | 1.63 | 7.65 | 61.20 |
| Bahareque | 0.5 | 1.5 | 7.63 | 61.04 |
| Piedra | 0.3 | 0.55 | 7.29 | 58.32 |

Se resume que si se requiere de un aislante térmico es preferible encontrar un material con baja conductividad térmica para evitar las pérdidas de calor. Como es el caso de la piedra y seguido del tapial ($0.58 \text{ W/m} \times k$), que de igual manera las pérdidas son bajas representando un valor de 7.28W o 0.03° en un lapso de 1.5h.

En la captación solar, por medio de los muros es necesario que cuenten con un correcto material que demande una baja conductividad térmica para evitar al máximo las pérdidas de calor. Este estudio se enfoca en las pérdidas de calor, pero no realiza un análisis profundo de la temperatura interior ni de la repercusión sobre la demanda energética.

Serrano et al. (2017) presentan una simulación energética con la intención de evaluar el confort térmico en un sistema de muro Trombe.

Las simulaciones se analizaron dentro de un prototipo de vivienda de interés social en el municipio Huichapan en ciudad de Puebla (México) localizado a una altura de 2170msnm en un clima templado frío, y una temperatura anual de 16°C, muy parecido a las condiciones geográficas y climáticas de la ciudad de estudio de esta tesis.

El espacio que incorpora el sistema de muro Trombe, fue una sala en un área de 15m² orientada hacia el sur. Las simulaciones energéticas se efectuaron con el programa TRYNSYS comparando las distintas configuraciones y propiedades térmicas de los materiales empleados en la construcción del modelo a analizar, ver (Tabla 2.9) y (Tabla 2.10).

Tabla 2.9: MATERIALES EMPLEADOS EN LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE SERRANO ET AL., 2017.

| MUROS | | | | |
|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|----------------|
| Material | Conductividad térmica (kJ/hmK) | Densidad (Kg/m ³) | Calor específico (kJ/kgK) | Espesor (m) |
| Mortero de concreto | 0.0282 | 1400 | 0.83716 | 0.01 |
| Ladrillo macizo | 21 | 2312.5 | 1.05 | 0.12 |
| Mortero de concreto | 0.0282 | 1400 | 0.8316 | 0.01 |
| Losa | | | | |
| Mortero de concreto | 0.0282 | 1400 | 0.83716 | 0.02 |
| Ladrillo macizo | 21 | 2312.5 | 1.05 | 0.12 |
| Piso | | | | |
| Losa de concreto | 0.03 | 1600 | 0.83716 | 0.05 |

Tabla 2.10: PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE LOS MATERIALES QUE INTEGRAN EL MURO TROMBE. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE SERRANO ET AL., 2017.

| Vidrio | | | | |
|---------------------|---|-----------------------------------|------------------------|--------------|
| Tipo de vidrio | Coefficiente global de transferencia de calor (W/m ² K) | Coefficiente de ganancia solar | Área (m ²) | Espesor (mm) |
| Vidrio claro simple | 5.73 | 0.789 | 7.702 | 6 |
| Vidrio claro simple | 5.73 | 0.789 | 1.361 | 6 |
| Vidrio claro simple | 5.73 | 0.789 | 1.361 | 6 |

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación en la (Tabla 2.11) se aprecia el incremento en la eficiencia térmica del 18.03 % en el prototipo, con un confort interno que se acercan al intervalo recomendado de 20 a 24°C. Además, se indica la variación de temperatura máxima, mínima, promedio, y de confort aplicando con la configuración en un espacio con muro y otro sin muro.

Tabla 2.11: COMPARATIVA DE TEMPERATURAS INTERNAS ALCANZADAS EN EL ESPACIO ARQUITECTÓNICO INTERIOR. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [SERRANO ET AL., 2017](#).

| | Temp. Max (°c) | Temp. Min. (°c) | Temp. Prom. (°c) | Temp. Confort (°c) | Confort (%) | Δ % |
|-----------------|----------------|-----------------|------------------|--------------------|-------------|--------------|
| Sin muro | 17.09 | 10.5 | 13.79 | 20 | 68.97 | 18.03 |
| Con muro | 20 | 14.8 | 17.4 | 20 | 87 | |

Con la incorporación del sistema de captación solar pasiva, se puede mejorar la eficiencia energética, y a la vez, se consiguen resultados mínimos. Sin embargo, las temperaturas interiores del espacio llegan a acercarse a un rango de confort. Aunque el clima de este estudio es parecido al de Cuenca, en este estudio no se han abordado variables de materiales ni morfológicas.

Con respecto al efecto del color de los materiales, [Özbalta & Kartal \(2010\)](#) emplearon el método de inutilización para determinar los efectos de tres colores en el rendimiento de un muro Trombe en la ciudad de Erzurum (Turquía).

Las configuraciones realizadas en el muro fueron; una orientación hacia el sur, la altura de 2.7m, ancho 9.10m, doble acristalamiento de 6mm, con varios colores de superficies (natural, oscuro, claro) en una pared de ladrillo (19cm), hormigón (25cm) y un muro de hormigón celular autoclavado (HCCA) de 15cm de espesor recubiertas con yeso.

Por medio de la (Tabla 2.12) el estudio reveló que anualmente la ganancia de calor varió del 26,9% y el 9,7% para el hormigón, el 20,5% y el 7,1% para ladrillo y el 13,0% al 4,3% para el hormigón celular según los colores de las superficies.

Tabla 2.12: EFECTOS DE LOS COLORES EN EL RENDIMIENTO DEL MURO SOLAR. ELABORACIÓN PROPIA CON DATOS DE [OZBALATA & KARTAL, 2010](#).

| Ganancia anual de calor solar % | | | |
|--|----------|----------|------|
| Color de la pared | Hormigón | Ladrillo | HCCA |
| Oscuro | 26.9 | 20.5 | 13.0 |
| Natural | 20.2 | 16.4 | 7.9 |
| Claro | 9.7 | 7.1 | 4.3 |

Finalmente, una simulación realizada por [Zalewski et al. \(2002\)](#) en las comunas de Trappes-Francia (longitud: 2°10'10", latitud: 48°14'60") y Carpentras-Francia (longitud: 5°10'30", latitud: 44°10'80") estudiaron los efectos de los materiales de acristalamiento en el rendimiento del sistema de muro Trombe.

Los resultados revelaron que el acristalamiento contribuye significativamente a la eficiencia del muro. El estudio demostró que el uso de doble acristalamiento de baja emisividad aumenta la energía recogida. La cantidad de este aumento fue del 159% en los MTNV, del 272% en los Trombe clásicos paredes, 233% en paredes Trombe aisladas, y

59 % en paredes compuestas (MT), figura 2.8.

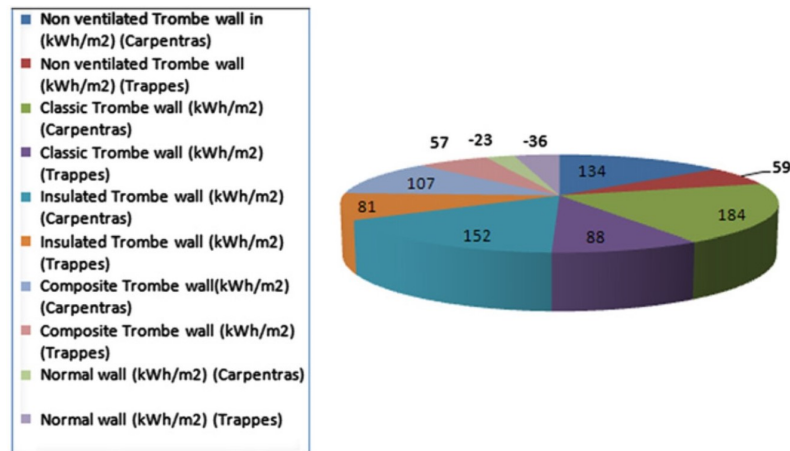


FIGURA 2.8: Energía acumulada por m^2 . Imagen tomada de [Zalewski et al., 2002](#)

Finalmente, el estudio reveló que los efectos de los materiales de acristalamiento en la eficiencia de Trombe las paredes dependen de la longitud y latitud de la ubicación de la pared. Por esta razón, Trappes mostró cambios más significativos en comparación con Carpentras.

2.4. Resumen del Capítulo

Por medio de la revisión de los estudios previos, se ha podido identificar cómo la ausencia de criterios de diseño enfocados al usuario ha repercutido en espacios interiores que no alcanzan un confort, provocando complicaciones térmicas ya sea por frío o calor.

Los estudios analizados abordan la influencia del muro Trombe ventilado y no ventilado sobre las condiciones interiores. Estos estudios principalmente conllevan análisis de manera superficial, sin analizar de manera minuciosa la influencia que pueden tener las variables materiales y morfológicas de estos tipos de sistemas.

De este modo, diversos autores evalúan de manera general el confort térmico que puede tener una vivienda con o sin muro Trombe. En otros casos, únicamente señalan los parámetros (forma, materiales) para optimizar el funcionamiento del sistema, mientras que otros autores realizan evaluaciones energéticas determinando el tiempo y niveles de confort que puede brindar la aplicación de esta estrategia bioclimática.

A través del repaso de estas investigaciones, se ha podido determinar que son muy pocos los estudios que han sido realizados en climas andinos y mucho menos en la ciudad de Cuenca, lo cual ha permitido resaltar que es necesario un estudio profundo sobre la importancia que tienen las variables ya sean morfológicas, como de materiales en un sistema de muro Trombe no ventilado en este clima. Además, estos estudios han aportado para definir las variables a estudiar como: la conductividad que poseen los diferentes tipos de materiales, el uso de pinturas, así como la aplicación de vidrios dobles. De igual manera, los estudios han sido de utilidad para definir el área del muro acumulador y del vidrio, estos en base al área que se pretende calefactar.

Análisis Mediante Simulaciones Digitales

Con el propósito de evaluar el comportamiento térmico interno del muro Trombe de estudio y el impacto de cada una de las variables morfológicas y materiales frente a las condiciones climáticas reales de la Región Andina. La metodología planteada para esta investigación son las Simulaciones Digitales.

Para llevar a cabo el proceso investigativo, el presente capítulo se ha desarrolla bajo las siguientes etapas; la configuración del Modelo de Análisis (software de simulación), configuración del Modelo de Estudio, y la definición de variables y periodos de estudio.

3.1. Configuración del Modelo de Análisis

Para llevar a cabo los cálculos de simulación se ha contemplado la utilización del software Design Builder ([DesignBuilder, 2019](#)), que integra en su entorno el motor de cálculo Energy Plus ([U.S. Department of Energy, 2020](#)), programa del Departamento de Energía de EEUU con el que se puede evaluar con precisión y detalle aspectos que afectan al desempeño térmico, energético y entre muchos otros de los edificios.

En efecto, EnergyPlus, al igual que otras herramientas informáticas de simulaciones energéticas relacionan datos de entrada con un modelo de estudio para ejecutar las simulaciones y determinar el flujo de calor a través de los elementos analizados.

En lo que respecta a la configuración del modelo de análisis en que se centra esta sección se consideran ajustes en los datos de entrada a partir del uso de datos climáticos del sector de análisis.

Es decir, los datos de entrada a graduarse se enfocan en la introducción de datos climáticos y de las características del modelo de estudio (muro Trombe) que permitan la obtención de datos a partir de la simulación.

En relación a los datos climáticos, dentro del programa se configura el archivo climático con el formato EPW (Energy Plus Weather) del clima de la región de análisis (Región Andina). Para nuestro caso la plantilla de datos climáticos se utilizará el archivo de la ciudad de Cuenca, obtenido a partir de [Climate.OneBuilding.Org \(2020\)](#).

En base al análisis de este archivo climático se han definido dos días de análisis: un día con las características climáticas frías, y otro día con las características climáticas promedio de esta ciudad.

En cuanto a los de entrada de las características del muro y del modelo de estudio en el siguiente apartado se describe a detalle estos parámetros.

3.2. Configuración del Modelo de Estudio

En lo que refiere a la caracterización del modelo de estudio, las características morfológicas se han basado en las normativas que rigen la ciudad de Cuenca, mientras que la configuración del muro Trombe se ha tomado en consideración la bibliografía previa que se realiza en este mismo clima.

La configuración del muro acumulador, ha sido mediante el sistema de Muro Trombe No Ventilado (MTNV), que en base al estudio realizado por [Guillén & Cordero \(2012\)](#), identifican que con la aplicación de este tipo de sistema en la fachada OESTE de un espacio de uso continuo (dormitorio) la temperatura que alcanza la cámara de aire es superior en relación de un Muro Trombe Ventilado (MTV) permitiendo de esa manera un mayor almacenamiento de energía durante el día para posteriormente ser liberada en horas de la noche.

Además, se considera importante el análisis en el espacio mencionado, ya que hoy en día es el ambiente arquitectónico de mayor uso continuo a diferencia del resto de espacios (sala, cocina, comedor, etc.) en donde sus usos son más inmediatos ([Guillén & Cordero, 2012](#)).

A partir de lo expuesto, dentro del modelo de estudio se establece el dimensionamiento de una habitación promedio para lo cual se considera lo descrito en la Ordenanza de la ciudad de Cuenca, en donde establece una superficie mínima de dormitorio de $8.10m^2$ con una de sus dimensiones laterales no menor a 2.70m, un área de iluminación con un porcentaje mínimo del 15 % respecto al área del piso local, un área mínima de closet $0.72m^2$ y una altura mínima de piso a cielo raso de 2.20m ([Concejo Cantonal, 2003](#)).

Para nuestro caso se establece un modelo de estudio con dimensiones laterales de $3,50m$ x $3,50m$ representando un área de $12,25m^2$, dentro de esta misma área se considera un espacio anexo de closet con $1.50m^2$. De este modo se obtiene un área neta de habitación de $10,75m^2$, con un porcentaje 16 % para iluminación y ventilación y una altura de piso a cielo raso de $2,40m$, (Tabla 3.1). De esta manera se cumple lo referenciado a la (Tabla 2.4 Dimensionamiento del Muro Trombe), del estudio de [Pomaya, 2013](#).

Tabla 3.1: MODELO DE ESTUDIO

| MODELO DE ESTUDIO | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|------|------|-----------|-------------|-----------------|--------------------|------------|
| Modelo | Dimensión (m) | | | Área | Área closet | Área Habitación | Área ilum. y vent. | Área muro |
| | X | Y | Z | (m^2) | (m^2) | (m^2) | (%) | (m^2) |
| | 3,50 | 2,40 | 3,50 | 12,25 | 1,50 | 10,75 | 16 | 6,8 |

El modelo de estudio se ha configurado dentro de un contexto real, es decir, dentro del área de una vivienda para acercar así a las condiciones más similares, figura 3.1.

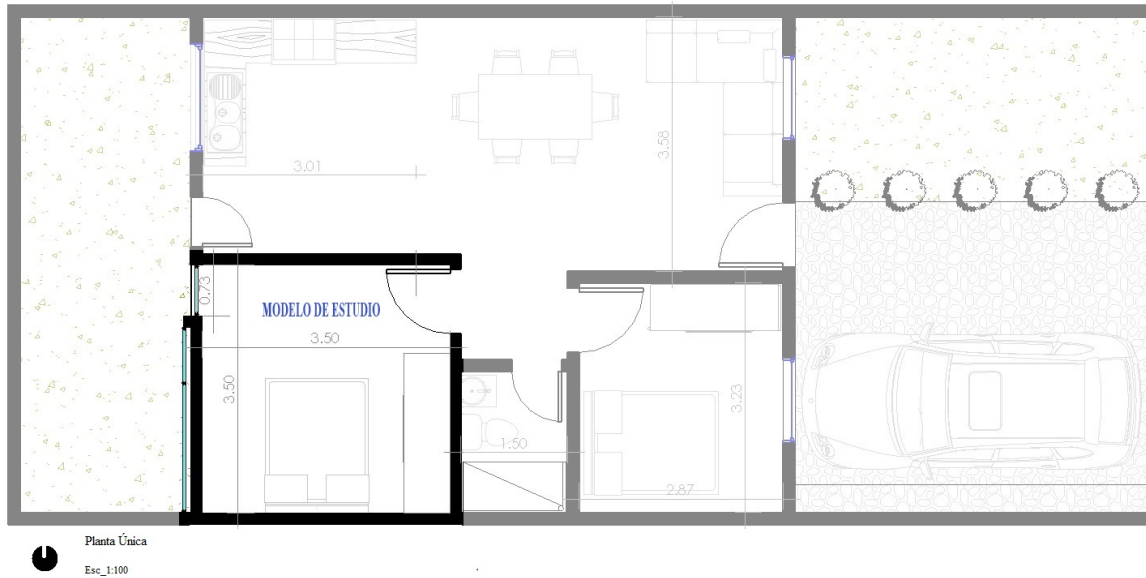


FIGURA 3.1: Dimensionamiento del modelo de estudio

En relación al medio convectivo de la (cámara de aire) que ocupará el MTNV, se ha determinado una sola variante con un ancho interior de 5cm, (ya que no es necesario la convección de aire).

Una vez definido el dimensionamiento del modelo de estudio, se establecen distintas configuraciones respecto a los materiales empleados (muro acumulador y vidrio), tomando en cuenta condiciones de sombreado y orientación con respecto al sol.

3.3. Definición de Variables

Dado que el clima de la Región Sierra del Ecuador está caracterizado por las bajas temperaturas, que al igual que otras regiones de estas latitudes las condiciones de discomfort térmico por frío interior es una permanente preocupación para los habitantes de esta zona climática.

Esta condición de discomfort interior puede incrementarse o reducirse en función de otras dos variables: la radiación solar y la velocidad del aire. La envolvente arquitectónica y en especial los muros que al ser superficies expuestas en un determinado tiempo a la radiación solar dependen del comportamiento térmico de este elemento, en específico de su temperatura interior.

Bajo este contexto, el desempeño térmico de la superficie interior del muro puede incrementar o disminuir las condiciones de discomfort térmico en el ambiente interior.

Para esta presente investigación se aborda como parámetro de referencia la temperatura del aire interior (T_{ai}) y el consumo energético (CE) del modelo de estudio con la aplicación del MTNV, y además se analiza el impacto al aplicar modificaciones en las variables que se pretenden exponer con propósito de determinar:

¿Qué tan factible es implementar un MTNV como sistema pasivo en la ciudad de Cuenca?

Conforme a la recopilación bibliográfica de los estudios analizados en el capítulo anterior, en esta investigación se han escogido el estudio de las variables más significativas tanto a nivel material como morfológico que maximicen el funcionamiento del MTNV en el contexto del clima Andino de Cuenca.

3.3.1. Variables morfológicas

Para el diseño del modelo de estudio es necesario conocer cuáles son las influencias independientes de cada una de las variables en el comportamiento térmico del MTNV.

Las variables morfológicas que se van a analizar son:

- Orientación
- Espesor

De esta manera, se presentan cada una de estas variables que cuentan con distintas configuraciones para que en el siguiente capítulo se pueda llevar a cabo la simulación.

La primera variable hace referencia a la orientación, que corresponde a las características más comunes de ubicación de las fachadas en la región Andina. De esta forma,

se considera una volumetría con fachadas orientadas hacia el ESTE y OESTE ya que maximizan la ganancia solar directa en la mañana o en la tarde (NEC, 2011).

En la segunda variable espesor, se ha definido en función de las características más comunes que existen en el mercado local, partiendo desde 15cm, 30cm hasta 45cm. Estos espesores hacen referencia al adobe, tapial y al ladrillo. El espesor y las características térmicas propias de cada material determinaran la transmitancia y capacidad térmica de cada uno de los elementos a evaluarse.

3.3.2. Variables materiales

Dentro estas variables se prevé la aplicación de aquellos materiales que constituyan una buena masa térmica, y además se analizará el impacto de la capacidad de absorción de la superficie externa (vidrio) del muro interior buscando maximizar el funcionamiento del sistema de MTNV.

De acuerdo con esto, las variables materiales que se aplicarán en el modelo de estudio son:

- Adobe
- Tapial
- Ladrillo
- Capa de pintura
- Vidrio Doble

Esta estrategia consiste en utilizar y añadir materiales tradicionales típicos de la ciudad de Cuenca, entre estos: el *adobe*, *tapial*, *ladrillo* con variantes en su espesor que anteriormente ya han sido mencionadas.

Otra variante es el *acabado o capa de pintura* que deben ser pintados con un color negro o azul, pues, este es un color que muestra un mayor coeficiente de absorción solar (Pomaya, 2013). En nuestro caso se aplicará una capa de pintura color negro.

La última variable a analizarse es *superficie acristalada (vidrio)*, que comprende de una doble lámina de vidrio transparente de espesor de 6mm separadas por una cámara de aire de 2mm. Con el espesor anteriormente indicado, el paso de la radiación solar es mayor, (Pomaya, 2013)

En la Tabla 3.2, se muestra un resumen de las variables materiales, morfológicas con sus distintas variantes y los parámetros de análisis.

Tabla 3.2: MODELO DE ESTUDIO, PARÁMETROS DE ANÁLISIS, VARIABLES MATERIALES Y MORFOLÓGICAS PARA EL SISTEMA DE MURO TROMBE NO VENTILADO.

| MODELO DE ESTUDIO | PARÁMETRO DE ANÁLISIS | VARIABLES | | |
|---------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|-------------|
| | | MATERIALES | MORFOLÓGICAS | |
| | | | Espesor (<i>cm</i>) | Orientación |
| Muro Trombe no Ventilado (MTNV) | Temperatura Interior | Adobe | 15-30-45 | E-O |
| | | Tapial | 15-30-45 | E-O |
| | Demanda Energética | Ladrillo | 15-30-45 | E-O |
| | | Vidrio doble | 0.3-1-0.3 | E-O |
| | | Capa Superficial | 0.1 | E-O |

A continuación, se representa el modelo de estudio mediante gráficos 3D aplicando las variables morfológicas y materiales que serán simuladas en el siguiente capítulo.

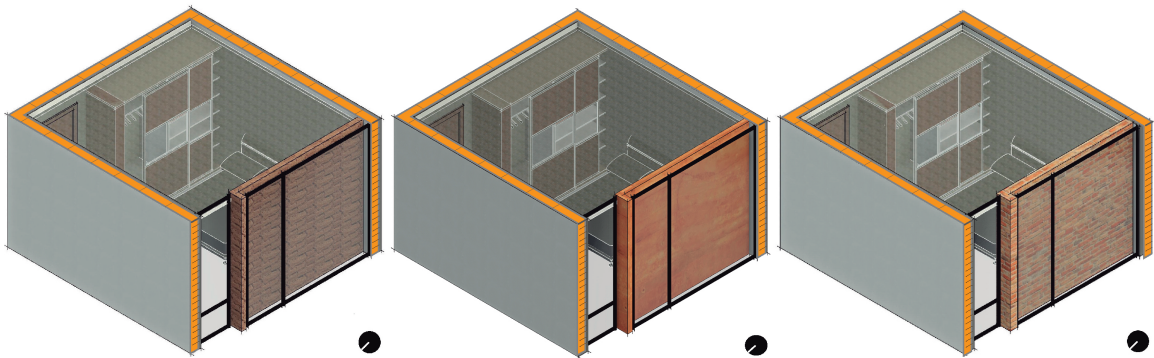


FIGURA 3.2: Modelos de estudio (adobe, tapial, ladrillo).

3.4. Definición de los periodos de estudio

Una vez establecidas los parámetros y variables de análisis, posteriormente se establecen los periodos de estudio para realizar sus debidas simulaciones. Esto, en búsqueda de profundizar los fundamentos teóricos del comportamiento térmico del MTNV que durante un periodo anual se han definido dos días tipo: un día frío y un día promedio. De acuerdo a lo mencionado, el día más frío en la ciudad es el 11 de agosto (ver anexo A1.1), mientras que el día promedio es el 9 de febrero (ver anexo A1.2).

Estos periodos de análisis se utilizarán para analizar la temperatura del aire interior (Tai), no obstante, para el análisis de la demanda energética, se realizará un análisis más global tomando en consideración un periodo anual.

A continuación, se presenta un resumen de las variables, los periodos y parámetros de análisis.

Tabla 3.3: PERIODOS Y PARÁMETROS DE ANÁLISIS.

| PERIODO DE ANÁLISIS | PARÁMETRO DE ANÁLISIS | MODELO DE ESTUDIO | VARIABLES | | |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| | | | Materiales | Espesor (cm) | Orientación |
| Día Frío | Temperatura Interior | | Adobe | 15-30-45 | E-O |
| | | | Tapial | 15-30-45 | E-O |
| | | | Ladrillo | 15-30-45 | E-O |
| | | | Vidrio doble | 0.3-1-0.3 | E |
| | | | Capa de pintura | 0.1 | E |
| Día Promedio | Temperatura Interior | Muro Trombe no Ventilado (MTNV) | Adobe | 15-30-45 | E-O |
| | | | Tapial | 15-30-45 | E-O |
| | | | Ladrillo | 15-30-45 | E-O |
| | | | Vidrio doble | 0.3-1-0.3 | E |
| | | | Capa de pintura | 0.1 | E |
| Anual | Demanda Energética | | Adobe | 15-30-45 | E-O |
| | | | Tapial | 15-30-45 | E-O |
| | | | Ladrillo | 15-30-45 | E-O |
| | | | Vidrio doble | 0.3-1-0.3 | O |
| | | | Capa de pintura | 0.1 | O |

La evaluación de estos modelos de estudio en los días de análisis (día frío y día promedio) nos permite tener un enfoque más claro sobre el comportamiento térmico interior del muro mediante las distintas configuraciones planteadas.

CAPÍTULO 4

Resultados

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas tanto en el modelo base como en los modelos de estudio, aplicando en estos cada una de las variables morfológicas y de materiales. A través de estos resultados, se podrá determinar el comportamiento térmico interior en un sistema de muro Trombe no ventilado (MTNV). Como se ha mencionado, en el capítulo previo, la temperatura interior (T_{ai}) y el consumo energético (CE) han sido considerados como los parámetros de análisis para evaluar dicho comportamiento en este sistema.

El primer parámetro, la T_{ai} , será evaluada tanto en el periodo diurno como nocturno, en un día frío y en un día promedio, esto servirá para establecer el comportamiento del modelo de estudio en un día común y en el día más desfavorable.

Mientras que, el segundo parámetro, el CE, será evaluado en un periodo anual, para establecer el consumo requerido en el modelo de estudio en este lapso de tiempo.

Como se ha explicado, se ha generado una configuración base para los modelos de estudio, la misma que será comparada con un sistema convencional usado en la ciudad de Cuenca, el cual ha sido denominado como modelo base.

A continuación, en una primera parte, serán evaluados los resultados en cuanto al parámetro de la T_{ai} , obtenidos del modelo base, para que posteriormente sean comparados con los resultados obtenidos de los modelos de estudio, con cada una de sus variables morfológicas y de materiales.

En una segunda parte, serán evaluados los resultados obtenidos con el segundo parámetro del CE, primero del modelo base, para posteriormente ser comparados con los modelos de estudio con sus diferentes variables.

4.1. Impacto en la temperatura

4.1.1. Análisis de resultados del modelo base

En este apartado se muestran los resultados del modelo de base, en donde se indica su comportamiento térmico interior. El modelo mencionado se ha configurado mediante un sistema de construcción convencional, conformado por ladrillo panelón y una capa de enlucido con mortero de cemento, tanto en el interior como en el exterior de su envolvente, figura 4.1. Esta composición de materiales para el modelo base, ha sido definido debido a que, este sistema constructivo es catalogado como el predominante en las viviendas de la ciudad de Cuenca (Guillén & Cordero, 2012).

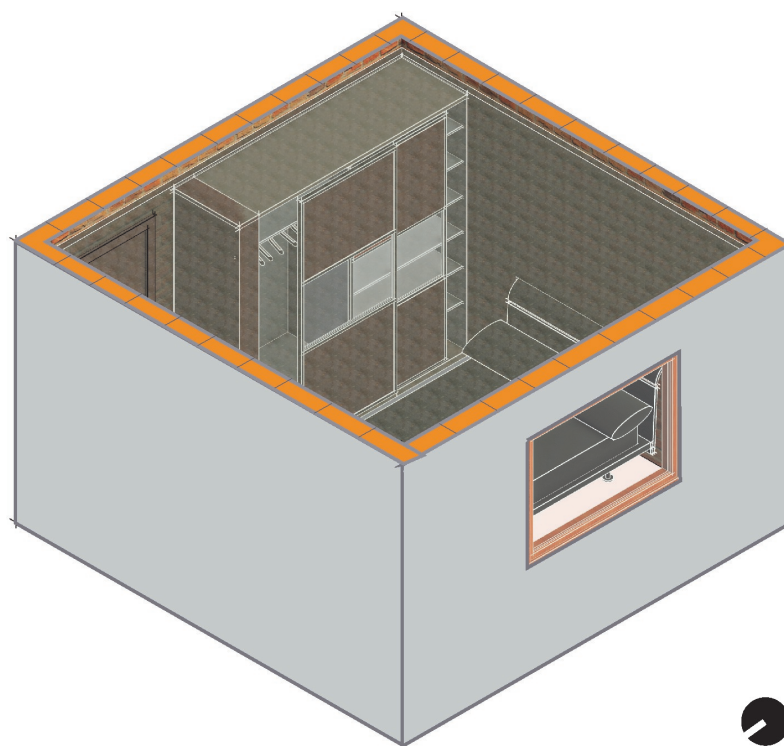


FIGURA 4.1: Modelo Base con muro de Ladrillo

Este modelo convencional, empleado en la ciudad, no cuenta con el sistema de MTNV, sin embargo, para posteriormente establecer una comparación térmica objetiva con los modelos de estudio, el modelo base se ha analizado tanto en su orientación ESTE como OESTE.

Para tener un parámetro de referencia se ha incluido dentro del análisis la temperatura del aire exterior T_a , además en esta primera evaluación se ha añadido la radiación solar de los dos días de análisis, tanto la radiación solar directa ($RS_Directa$) como la radiación solar difusa (RS_Difusa). Todos estos parámetros se muestran para entender la influencia de las condiciones climáticas sobre el comportamiento del modelo base y por ende de su espacio interior, ver anexo A2.1.

A continuación, en la figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos de la T_{ai} , tanto en el día frío, como en el día promedio del modelo base. Los resultados numéricos se muestran en los anexos A2.1.1 y A2.1.2.

En el periodo diurno, en el día frío, la temperatura del aire interior T_{ai} alcanza una máxima de 25°C y 24°C , para su orientación ESTE y OESTE respectivamente, figura 4.2a. Mientras que, en el día promedio las temperaturas máximas alcanzan los 26°C en ambas orientaciones, figura 4.2b.

Durante el periodo nocturno, en el día frío, la T_{ai} varía desde los 22°C hasta alcanzar la temperatura mínima de 15°C alrededor de las 06h00, tanto en el eje ESTE como OESTE. Mientras que, en el día promedio la T_{ai} varía desde los 25°C y desciende hasta la mínima de 18.5°C , en las dos orientaciones.

Con respecto a la temperatura del aire exterior T_a , en el periodo diurno, en el día frío y el día promedio se alcanzan valores máximos de 21°C y 22°C respectivamente. Y sus temperaturas mínimas llegan a 8°C y 13°C . De acuerdo con esto, en el día frío, la diferencia entre T_{ai} y T_a , en sus máximos de temperatura, es de 4°C y 3°C para la orientación ESTE y OESTE respectivamente, mientras que, en el día promedio la diferencia de temperaturas es de 4°C en ambas orientaciones.

En cambio, en el periodo nocturno, la diferencia entre la T_{ai} y la T_a es más marcada, alrededor de 7.5°C en el día frío y 5°C en el día promedio.

Conforme con los resultados mostrados, en el día frío, la T_{ai} del modelo base, orientada hacia el ESTE, mantiene temperaturas mayores en relación al modelo orientado al OESTE, tanto en el periodo diurno como nocturno. En relación al día promedio, la T_{ai} del modelo base orientada al ESTE presenta mejores temperaturas en el periodo diurno, mientras que, el modelo orientado hacia el OESTE presenta mejores temperaturas en el periodo nocturno.

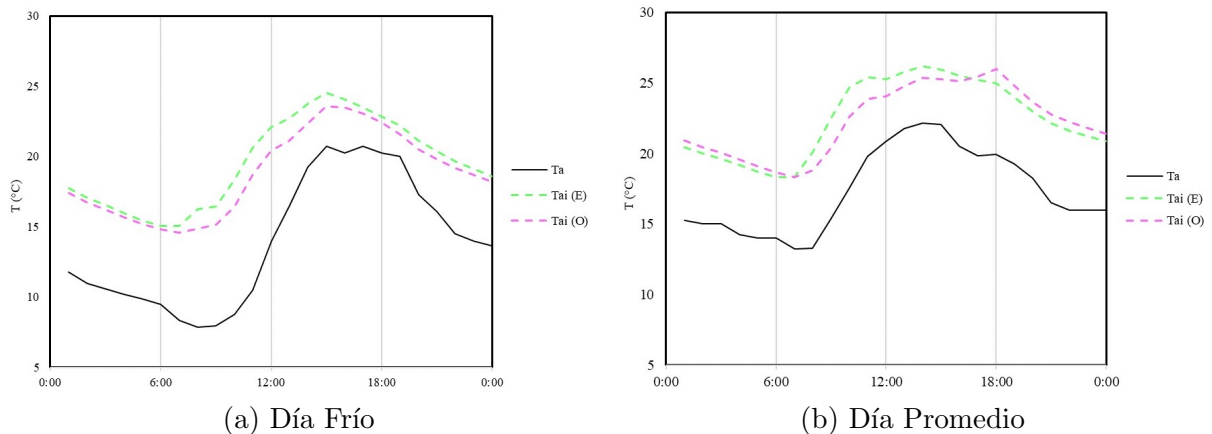


FIGURA 4.2: Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

Los resultados del modelo base de las dos orientaciones, se relacionan directamente con la radiación solar, figura 4.3. Dado que, en el día frío, la mayor radiación solar en el día sucede en la mañana, la fachada ESTE es la que mayor radiación solar recibe y por ende esta orientación tiene una ventaja sobre la orientación OESTE en los resultados de la T_{ai} .

Algo parecido sucede en el día promedio, la mayor radiación sucede en la mañana, no obstante, en la tarde se registra un pico de radiación, por lo cual la fachada OESTE tiene una mayor captación en este periodo y por ende su T_{ai} presenta ligeramente mayores valores que la ESTE en el periodo nocturno.

En definitiva, la temperatura del modelo base con orientación ESTE, posee una temperatura mayor que la orientada hacia el OESTE.

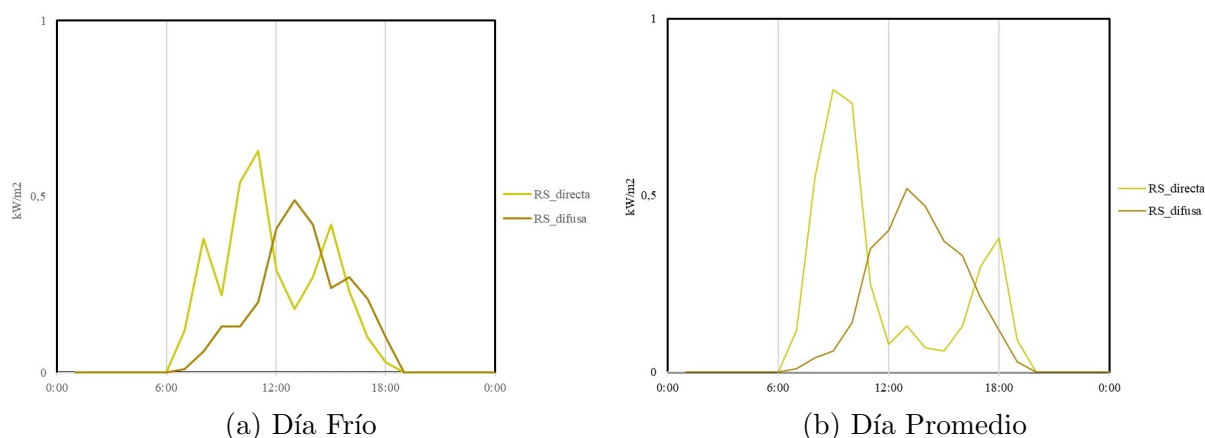


FIGURA 4.3: Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Radiación solar directa (amarillo) y difusa (marrón).

4.1.2. Análisis de variables morfológicas

Una vez especificados los resultados obtenidos en el modelo base, a continuación, serán expuestos los resultados obtenidos en cada uno de los modelos de estudio.

En este apartado, serán consideradas las variables morfológicas, referentes a la orientación (ESTE y OESTE) y espesores de (15cm , 30cm y 45cm), de los modelos de estudio, con tres tipos de materiales propuestos: adobe, tapial y ladrillo.

Este análisis permitirá establecer el comportamiento térmico que posee un sistema de MTNV con cada uno de los materiales mencionados y con la consideración de las variables morfológicas. A su vez serán comparados con el comportamiento del modelo base, para definir el sistema que mejor comportamiento térmico presenta.

ABODE

El primer material considerado en los modelos de estudio, ha sido el adobe. En la figura 4.4, se muestra la disposición del MTNV en el modelo planteado para el desarrollo de las simulaciones.

Este modelo será analizado tanto en orientación ESTE y OESTE, a su vez serán establecidos tres espesores distintos para el muro: 15cm , 30cm y 45cm . Dichas variables serán comparadas a continuación.

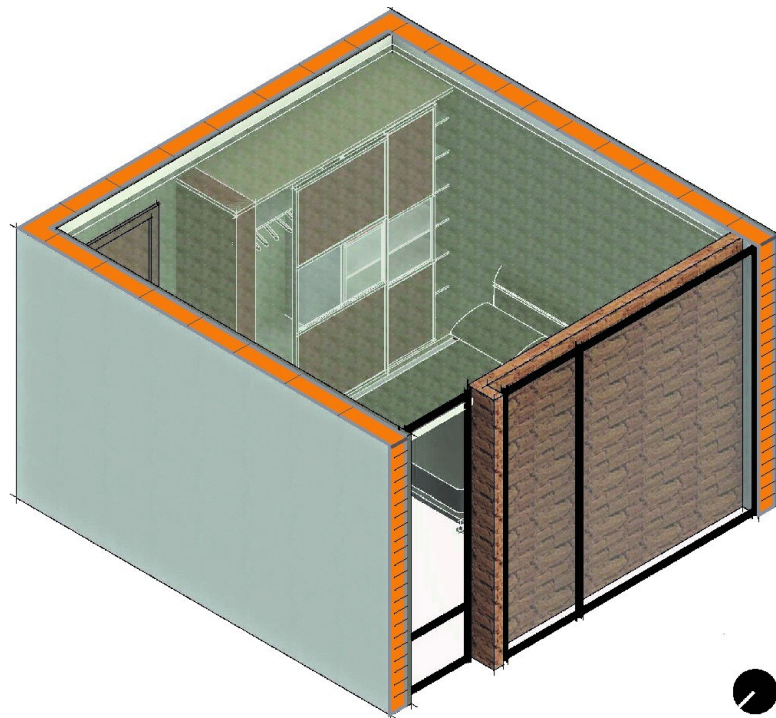


FIGURA 4.4: Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en adobe.

La figura 4.5, muestra los resultados del modelo de estudio de adobe, con orientación ESTE, con los espesores de 15cm, 30cm y 45cm, en relación con los resultados obtenidos en el modelo base en esta misma orientación. Los resultados numéricos se muestran en los anexos A2.2.1 y A2.3.1. De acuerdo con estos resultados se muestra que tanto en el día frío como en el día promedio el espesor de muro Trombe con el que se alcanza las mayores temperaturas interiores es el de 15cm. La diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm con respecto a los espesores de 30 y 45cm está alrededor de 0.80°C desde las 14h00 hasta las 22h00 aproximadamente en el día frío, mientras que en el día promedio la diferencia es superior, alrededor de 1.10°C en el mismo periodo.

La diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm con respecto a la Tai del modelo base durante las 14h00 y 22h00 es 0.90°C y 1.30°C en el día frío y promedio respectivamente. Luego de esto, desde las 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 1.20°C en el día frío y 1.45°C en el día promedio. Mientras que, la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno hasta las 22h00 con respecto al modelo base es casi nula. Incluso en el día promedio, cuando existe más radiación, la Tai del modelo base en el periodo diurno llega a ser mayor que la Tai de los muros Trombe de 30 y 45cm en ciertas horas de este día.

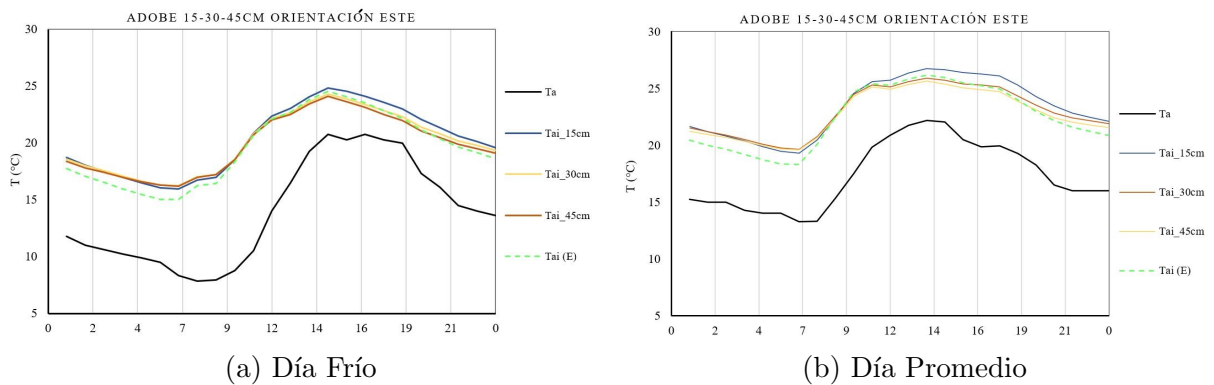


FIGURA 4.5: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

De acuerdo con esto, la radiación solar del día frío ni la del día promedio, mostrada en el apartado anterior, alcanza a calentar los muros de 30 y 45cm, debido a su espesor. La mayor influencia se da en el muro de 15 cm, no obstante, en el periodo nocturno los 3 muros, superan la temperatura del modelo base alrededor de 0.90°C y 1.30°C en el día frío y promedio respectivamente.

En cuanto a la orientación OESTE, la figura 4.6, muestra los resultados con esta orientación y los espesores de 15, 30 y 45cm. De acuerdo con estos resultados se observa que en el día frío y en el día promedio, nuevamente el espesor de 15cm es el que alcanza las mayores temperaturas interiores. La diferencia entre la T_{ai} del muro de 15cm frente al de 30 y 45cm es de aproximadamente 0.70°C desde las 14h00 hasta las 22h00 durante el día frío. Mientras que, en el día promedio la diferencia es superior, alrededor de 1°C en el mismo periodo.

La diferencia que tiene la T_{ai} del muro Trombe de 15cm frente a la T_{ai} del modelo base desde las 14h00 a 22h00 es 0.80°C y 1.20°C en el día frío y promedio respectivamente. Luego de esto, de 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 1.10°C en el día frío y 1.25°C en el día promedio. A más de esto, se evidencia que la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno y gran parte del periodo nocturno con respecto al modelo base, es mínima.

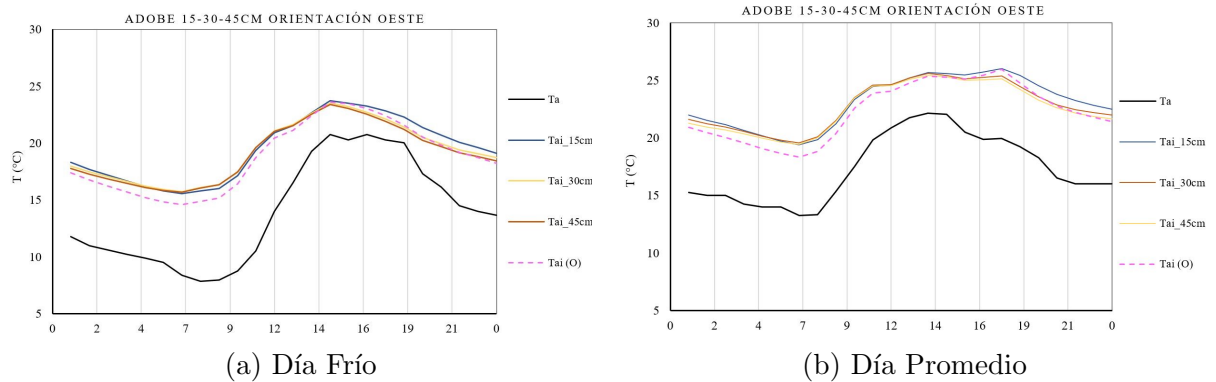


FIGURA 4.6: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

TAPIAL

El segundo material considerado en los modelos de estudio, ha sido el tapial. En la figura 4.7, se muestra la disposición del MTNV en el modelo planteado para el desarrollo de las simulaciones.

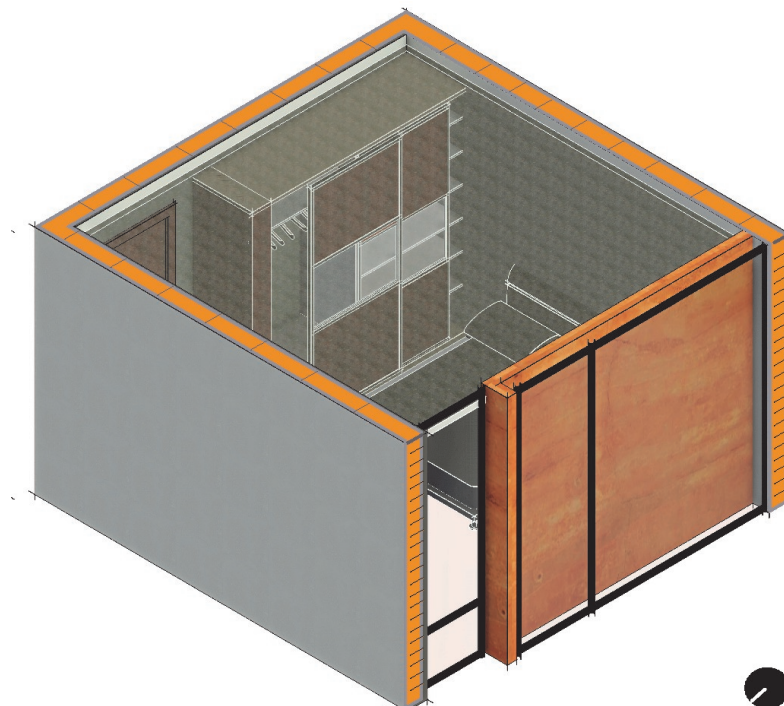


FIGURA 4.7: Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en tapial.

Este modelo será analizado tanto en orientación ESTE y OESTE, a su vez serán establecidos tres espesores distintos para el muro: 15cm, 30cm y 45cm. Dichas variables serán comparadas a continuación.

La figura 4.8, muestra los resultados del modelo de estudio de tapial, con orientación ESTE, con los espesores de 15cm, 30cm y 45cm, y se compara con los resultados obtenidos en el modelo base en esta misma orientación. Aquí se muestra que en el día frío y en el día promedio, el espesor de muro Trombe con el que se alcanza las mayores temperaturas interiores es el de 15cm. La diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm respecto a los espesores de 30 y 45cm está alrededor de 0.60°C desde las 14h00 a 22h00 en el día frío, mientras que en el día promedio la diferencia es superior, bordea 0.90°C en el mismo periodo.

La diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm con respecto a la Tai del modelo base durante las 14h00 y 22h00 es 0.70°C y 1.10°C en el día frío y promedio respectivamente. Posterior a esto, desde las 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 1°C en el día frío y 1.25°C en el día promedio. Mientras tanto que, la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno hasta las 22h00 en relación al modelo base es casi nula. Inclusive en el día promedio, cuando hay más radiación, la Tai del modelo base en el periodo diurno llega a ser mayor que la Tai de los muros Trombe de 30 y 45cm, en algunas horas de este día.

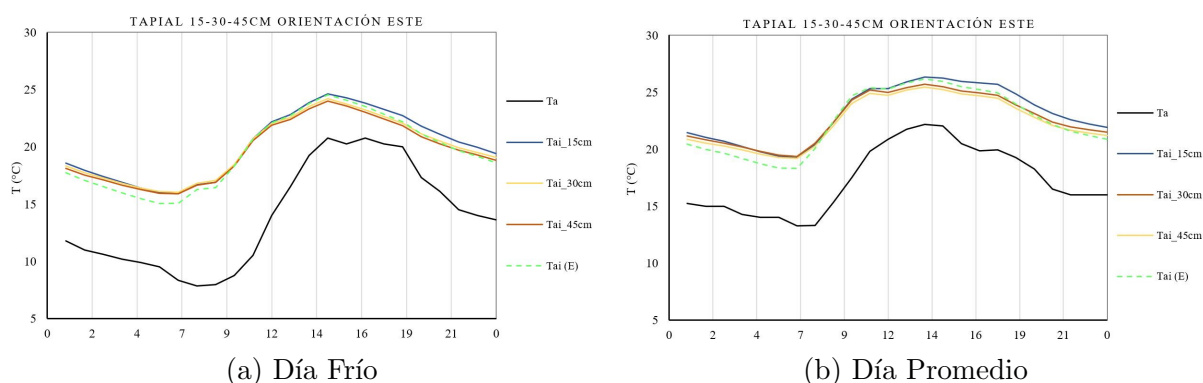


FIGURA 4.8: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

Al igual que en el caso anterior (ADOBE), ni la radiación solar del día frío ni la del día promedio, alcanzan a calentar los muros de 30 y 45cm, debido a su espesor. Las mismas influencias se dan en el muro de 15cm, a pesar de aquello, en el periodo nocturno los 3 muros, superan la temperatura del modelo base alrededor de 0.70°C en el día frío y 1.10°C en el día promedio.

Con respecto a la orientación OESTE, en la figura 4.9 se observa que en el día frío y en el día promedio, reiteradamente el espesor de 15cm es el que alcanza las mayores temperaturas interiores. Además, existe una diferencia entre la Tai del muro de 15cm frente al de 30 y 45cm con aproximadamente 0.50°C desde las 14h00 a 22h00 durante el día frío. En tanto que, en el día promedio la diferencia es superior, alrededor de 0.80°C en el mismo periodo.

Por otro lado, la diferencia que tiene la Tai del muro Trombe de 15cm frente a la Tai del modelo base desde las 14h00 a 22h00 es 0.60°C y 1.00°C en el día frío y promedio

respectivamente. Seguido de esto, desde las 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 0.90°C en el día frío y 1.15°C en el día promedio. Aparte de esto, se evidencia que la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno y en mayor parte del periodo nocturno con respecto al modelo base es mínima.

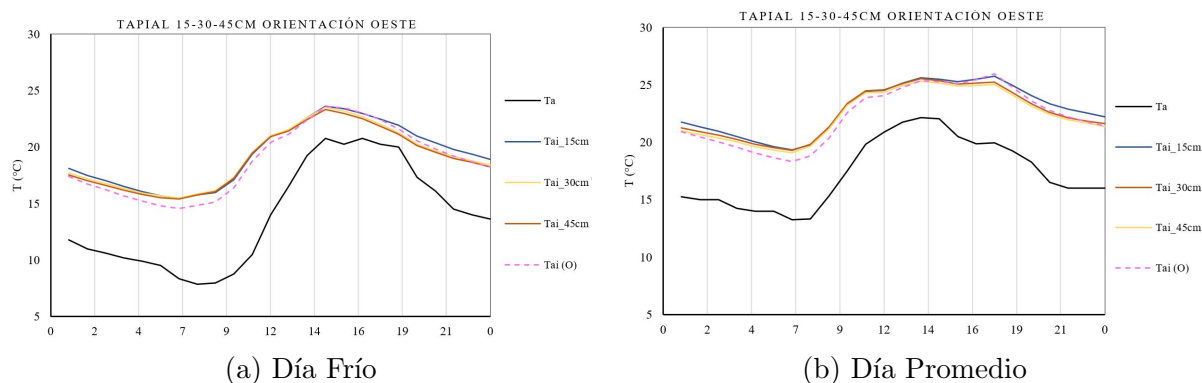


FIGURA 4.9: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

LADRILLO

El tercer material considerado en los modelos de estudio, ha sido el ladrillo. En la figura 4.10, se muestra la disposición del MTNV en el modelo planteado para el desarrollo de las simulaciones.

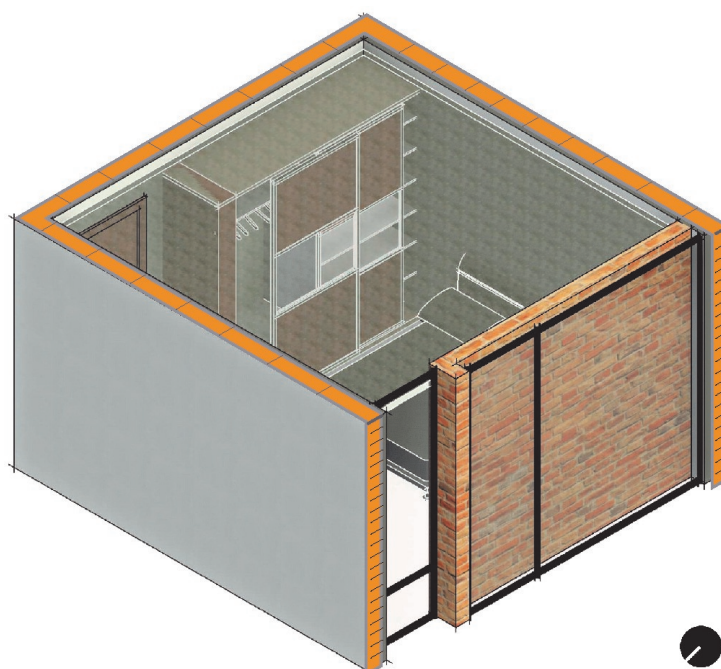


FIGURA 4.10: Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ladrillo.

Al igual que en los casos anteriores este modelo serviría para analizar las orientaciones ESTE y OESTE, y los espesores de 15,30 y 45cm.

La figura 4.11, muestra los resultados del modelo de estudio de ladrillo, orientado hacia ESTE, con los espesores de 15cm, 30cm y 45cm, en relación con los resultados obtenidos en el modelo base en esta misma orientación. Estos resultados muestran que en el día frío y en el día promedio, el espesor de muro Trombe con el que se alcanza las mayores temperaturas interiores es el de 15cm. En tanto que, la diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm respecto a los espesores de 30 y 45cm está alrededor de 0.65°C a partir de las 14h00 hasta las 22h00 en el día frío, mientras que en el día promedio la diferencia es superior, bordea 0.95°C durante el mismo periodo.

De igual forma, se observa que la diferencia de la Tai del muro Trombe de 15cm frente a la Tai del modelo base durante las 14h00 a 22h00 es 0.75°C y 1.15°C para el día frío y promedio respectivamente. Posterior a esto, desde las 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 1.05°C en el día frío y 1.30°C en el día promedio. Por otro lado, la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno hasta las 22h00 con respecto al modelo base es casi nula. Del mismo modo, como en los casos anteriores, en el día promedio, cuando existe más radiación, la Tai del modelo base en el periodo diurno llega a ser superior que la Tai de los muros Trombe de 30 y 45cm en algunas horas de este día.

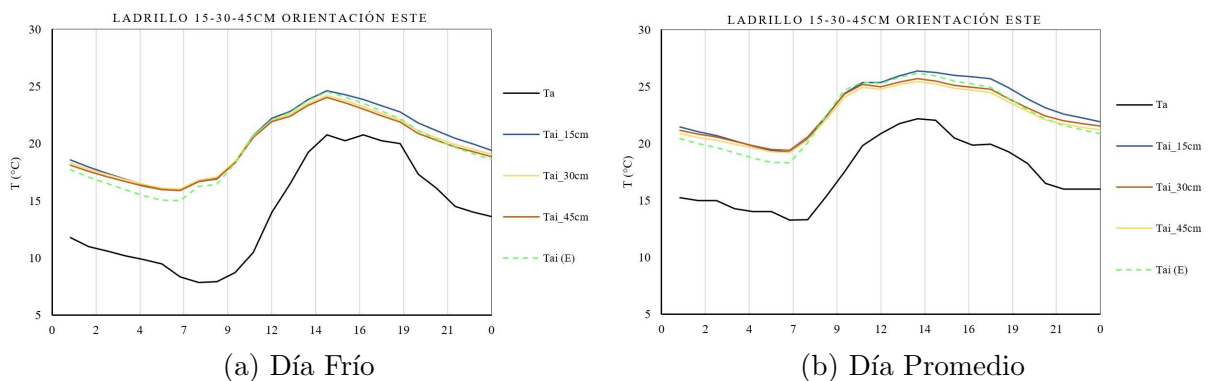


FIGURA 4.11: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

Conforme a lo descrito, y al igual que en los casos anteriores (ADOBE, TAPIAL) se recalca que ni la radiación solar del día frío ni la del día promedio, mostrada en el análisis del modelo base, alcanzan a calentar los muros de 30 y 45cm, debido a su espesor. Ante esto, se evidencia que la mayor influencia se da nuevamente en el muro de 15cm, sin embargo, en el periodo nocturno los 3 muros, superan la temperatura del modelo base alrededor de 0.75°C y 1.15°C en el día frío y promedio respectivamente.

Con respecto a la orientación OESTE, la figura 4.12, muestra los resultados con esta orientación y los espesores de 15, 30 y 45cm. Conforme a aquello, se observa que en el día frío y en el día promedio, nuevamente el espesor de 15cm es el que alcanza las mayores temperaturas interiores. Además, se aprecia que existe una diferencia entre la Tai del muro de 15cm frente al de 30 y 45cm con aproximadamente 0.55°C desde las 14h00 hasta

las 22h00 durante el día frío, y en el día promedio la diferencia es superior, alrededor de 0.85°C en el mismo periodo.

Finalmente, se menciona que la diferencia que tiene la Tai de 15cm frente a la Tai del modelo base desde las 14h00 a 22h00 es 0.65°C y 1.05°C en el día frío y promedio respectivamente. En tanto que, desde las 22h00 a 06h00 esta diferencia se incrementa a 0.95°C en el día frío y 1.20°C en el día promedio. A demás de esto, se denota que la diferencia entre los muros Trombe de 30 y 45cm en el periodo diurno y nocturno con respecto al modelo base, es mínima.

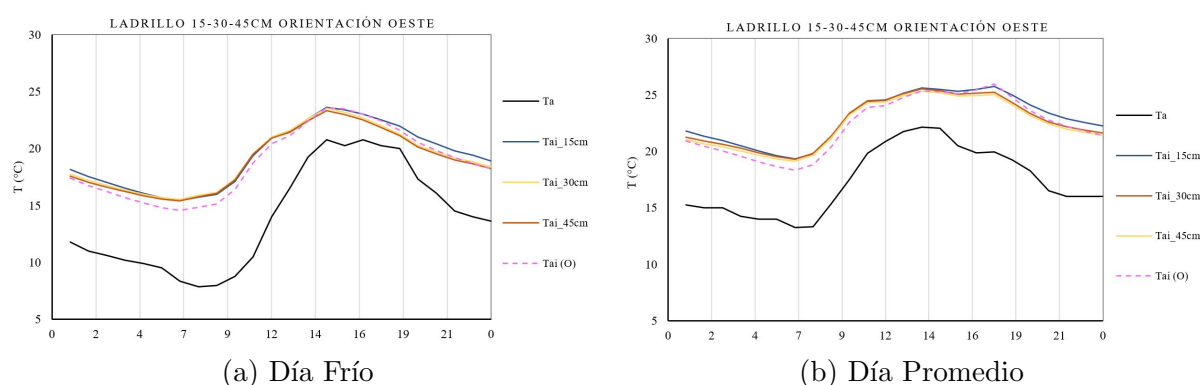


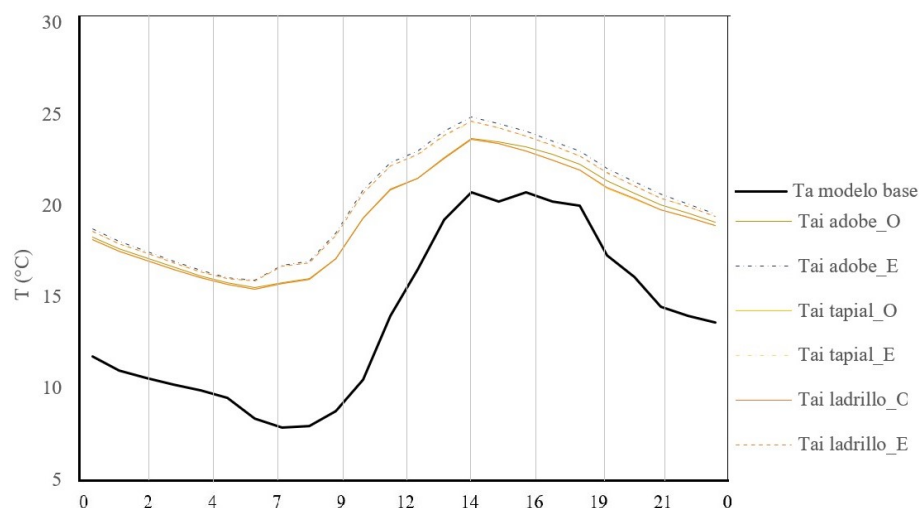
FIGURA 4.12: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de ($15,30,45\text{cm}$) en la orientación OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

De manera general, en cuanto al análisis de las variables morfológicas, se ha obtenido como resultado que el efecto del muro Trombe es más significativo en el periodo nocturno, dado que por la cámara de aire el enfriamiento de la pared y las pérdidas de calor de la habitación se reducen de manera considerable. No obstante, hay que hacer notar que el incremento de masa térmica de los muros no es significativo para reducir las pérdidas de calor en la noche, por lo cual, la diferencia de temperaturas entre los tres muros en la noche no es significativa. Así mismo, en el periodo diurno, el muro de 15 cm es el único que muestra un incremento representativo con respecto al modelo base, dado que es el que tiene menor masa y la radiación recibida alcanza a incrementar la temperatura interior del espacio que envuelve.

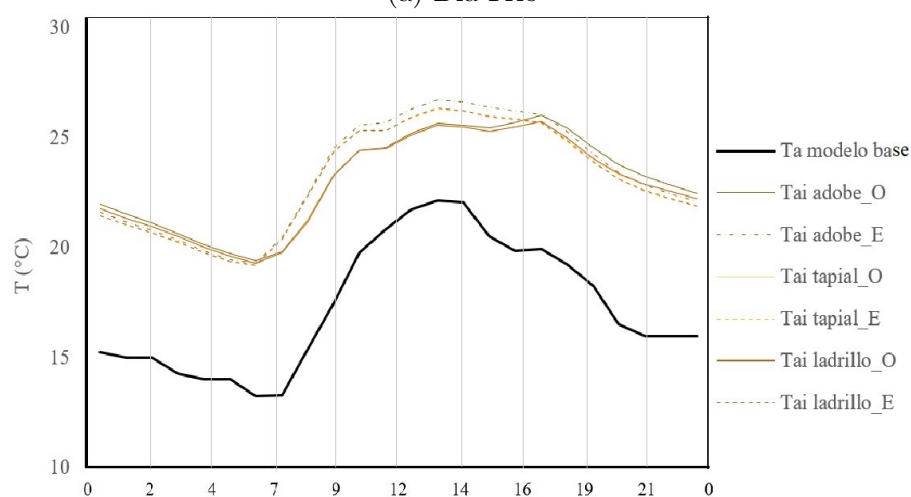
De acuerdo a los resultados obtenidos se puede ver que el uso del muro Trombe de 15 cm con orientación ESTE en cualquiera de los materiales en el periodo diurno tiene una temperatura alrededor de 1°C mayor que el modelo base en el día frío y 1.20°C en el día promedio. Esta diferencia se incrementa en el periodo nocturno, llegando a una diferencia alrededor de 1.30°C y 1.35°C en el día frío y promedio respectivamente. Conforme a esto, la ventaja que proporciona el uso del muro Trombe está alrededor de 1.25°C . Y aunque se crea que 1.25°C no es un valor representativo, térmicamente representa una gran diferencia en el confort del usuario y más aún en el consumo energético, lo cual analizaremos en apartados posteriores.

A través de la figura 4.13, se compara la temperatura interior del muro de 15cm con orientación ESTE frente al muro de orientación OESTE en cada uno de los materiales.

De esta manera se muestra que el muro de adobe, tapial y ladrillo en día frío y extremo orientados hacia el ESTE son los que alcanzan los mejores resultados respecto a la temperatura interior del modelo base, dado que en los días de análisis es en la mañana cuando hay mayor radiación.



(a) Día Frío



(b) Día Promedio

FIGURA 4.13: Resultados del MODELO BASE y los MODELOS DE ESTUDIO, con orientación ESTE y OESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

4.1.3. Análisis de variables materiales

En este apartado se analizarán las variables de materiales. Dentro de estas variables se plantea evaluar los tres materiales más usados en esta región: adobe, tapial y ladrillo. Adicionalmente se evaluará el uso de pintura negra para incrementar la absorción solar del muro acumulador, y el uso de un vidrio doble.

A través del análisis del apartado anterior, se pudo definir que el muro de 15cm con la orientación ESTE, es el que presenta los mejores resultados, por lo que, a continuación, se analizará la influencia que genera la variable de materiales en muros con el espesor y la orientación mencionada.

En una primera instancia, serán expuestos los resultados comparativos de un muro de adobe, tapial y ladrillo, con espesor de 15cm orientados al ESTE, y así poder establecer el material con el mejor comportamiento térmico interior.

Una vez definido el material con las mejores características, al modelo obtenido por un lado será adicionado una superficie de pintura de alta absorción de radiación solar (pintura negra), y por otro lado se evaluará el uso de un vidrio doble, para evaluar la influencia de estos materiales en el comportamiento del MTNV.

Adobe, Tapial y Ladrillo de 15cm con orientación ESTE

Al igual que en las variables morfológicas los materiales serán evaluados en un día frío y un día promedio, y se lo comparará con el modelo base. Los resultados numéricos se muestran en los anexos A2.4.1 y A2.5.1.

En la Figura 4.14a, se muestra que durante el día frío el muro de ladrillo frente al muro de tapial presenta una diferencia de temperatura mínima, tanto en el periodo diurno y nocturno, mientras que, el muro de adobe frente al muro de tapial y ladrillo, muestra una variación de temperatura más marcada. Desde las 15h00 a 24h00, el adobe está 0.25°C por arriba de los otros dos materiales.

Algo similar, sucede en el día promedio Figura 4.14b, el modelo con el muro de adobe es el que presenta las mayores temperaturas, con una variación desde las 12h00 a 22h00 alrededor de 0.20°C por arriba de los otros dos materiales.

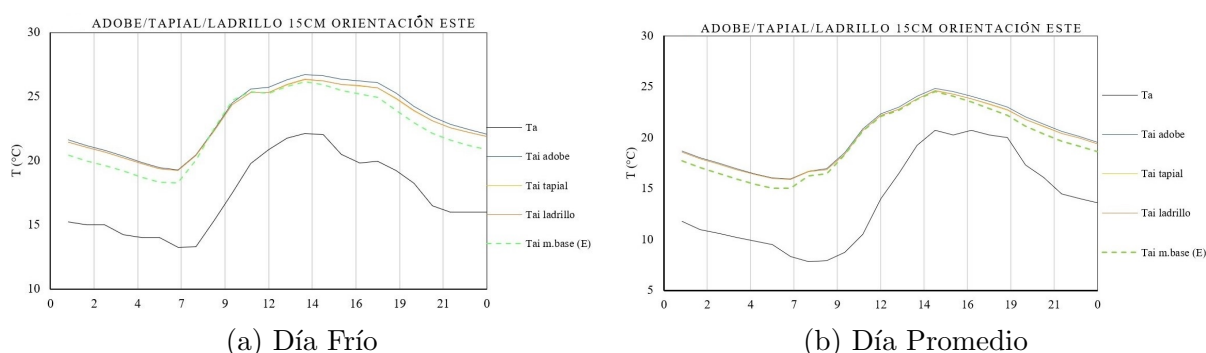


FIGURA 4.14: Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

De acuerdo a lo descrito, se ha podido definir que el adobe de 15cm es el material que presenta el mejor desempeño térmico interior dentro del sistema de MTNV. Este comportamiento responde a que el adobe de 15cm es el material con mayor masa térmica

entre los tres analizados (Tabla 4.1). Además de la mayor masa térmica que presenta el ADOBE ($161.28KJ/m^2 - k$), posee mayor conductividad térmica, lo que permite que el calor entre con mayor facilidad, es decir posee un menor aislamiento. Estos resultados resaltan que la creencia general de que a mayor aislamiento mejores condiciones interiores se tiene, no es del todo cierto, todo dependerá del caso puntual que se analice.

Tabla 4.1: MASA Y TRANSMITANCIA TÉRMICA DEL ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO.

| | Masa térmica $KJ/m^2 - K$ | Transmitancia térmica W/mk |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------|
| Adobe | 161.2800 | 1.10 |
| Tapial | 161.2800 | 0.58 |
| Ladrillo | 159.6000 | 0.69 |

Una vez definido que el muro de adobe de $15cm$, orientado hacia el ESTE presenta el mejor comportamiento térmico interior, a continuación, se evaluará el uso de una superficie negra y el uso de un vidrio doble.

Superficie color negro

Para evaluar esta variable, se comparará el muro de adobe de $15cm$ orientado hacia el ESTE obtenido de los resultados anteriores, en comparación con este mismo muro, pero con el uso de una capa de pintura negra en la parte exterior del muro para incrementar la absorción solar del mismo. Los resultados numéricos se muestran en el anexo A2.5.2.

En la figura 4.15a y figura 4.15b, se muestra que la adhesión de una capa de pintura de color negro, no genera un cambio significativo en la T_{ai} del modelo de estudio, por lo tanto, esta variable no presenta ventajas en el sistema de muro Trombe de adobe de $15cm$.

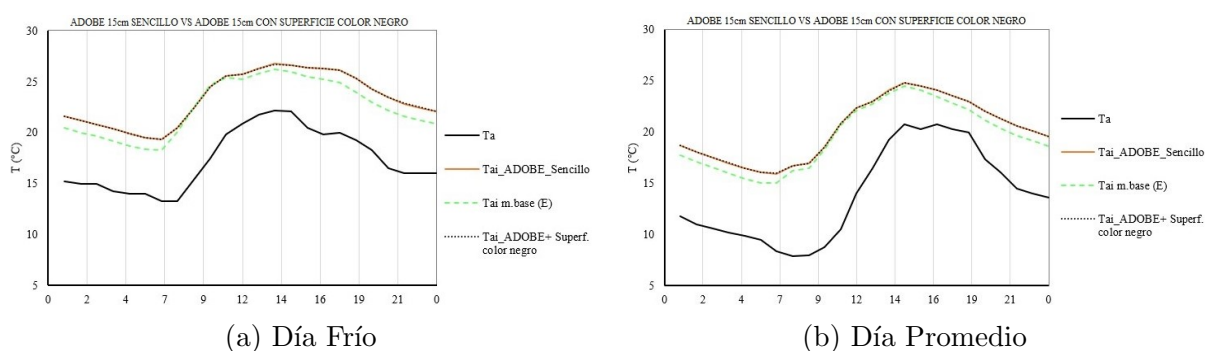


FIGURA 4.15: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de ($15cm$) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

Esta mínima variación se da porque el coeficiente de la absorción solar de pintura (0.85) no es tan diferente que el adobe (0.6), por tanto, la absorción solar no se incrementa de manera significativa.

Vidrio Doble

Para evaluar esta variable, se comparará el muro de adobe de 15cm orientado hacia el ESTE, con el cual tenía un vidrio simple, en comparación con este mismo muro, pero con el uso de un vidrio doble.

En la figura 4.16a, y la figura 4.16b, se puede observar que existe un pequeño aporte al aplicar la variable de doble vidrio. Con esta variable, se genera un ligero incremento en la temperatura interior, algo que no sucedía al aplicar la variable de la superficie color negro, los resultados numéricos se muestran en el anexo A2.5.3.

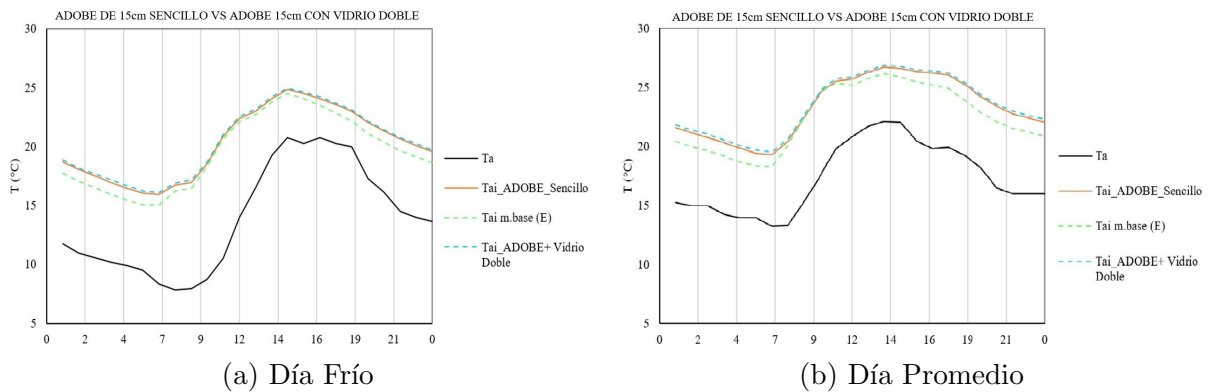


FIGURA 4.16: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el ESTE durante el día frío (a) y el día promedio (b): Temperatura exterior y la temperatura del aire interior.

Este comportamiento se debe a la reducción de transmitancia térmica que genera el uso del vidrio doble. Ya que el vidrio simple posee $5.89W/m^2K$, mientras que el vidrio doble posee $2.81W/m^2.K$. Sin embargo, la reducción de pérdidas no resulta representativa, dado que es sólo por transmisión de calor, y la mayor ventaja del muro Trombe ya se consigue por el atrapamiento radiativo que se genera por la cámara de aire y cualquier tipo de vidrio.

A lo largo del análisis de las variables de materiales, se ha podido definir que el sistema con mejor comportamiento ha sido el muro de adobe de 15cm, orientado hacia el **ESTE**. Por su parte, las variables de superficie de color negro y vidrio doble, presentan una mejoría en la temperatura interior mínima. A pesar de que el uso de vidrio doble muestra un mejor comportamiento que la capa de pintura, su uso en el sistema incrementaría costos, pero el beneficio térmico interior no sería mayor.

4.2. Impacto en la demanda energética

En este apartado se muestran los resultados de la demanda energética por sistemas activos de calefacción o refrigeración realizadas en el modelo base y en el modelo de estudio con sus respectivas variables.

El modelo base y el modelo de estudio mantienen las mismas configuraciones que se han realizado en el apartado anterior del impacto en la temperatura interior.

El consumo energético será el parámetro de análisis utilizado para evaluar las variables planteadas en este apartado. La demanda energética será la requerida tanto para calefacción, como para refrigeración si es que fuese el caso. Las especificaciones de la temperatura de ajuste de calefacción y refrigeración se han basado en estándares de confort estipulados por la NEC-11, Capítulo 13 (Eficiencia Energética en la Construcción), la cual especifica un rango de 18°C a 26°C. De acuerdo con esto, si la temperatura interior se reduce por debajo de 18°C se encenderá la calefacción, mientras que si sube por arriba de 26°C se encenderá la refrigeración.

Este análisis tiene dos objetivos, primero corroborar los resultados que se obtuvieron en el análisis anterior, en el día frío y en el día promedio, y segundo, este análisis servirá para determinar cuantitativamente el impacto del muro Trombe y las variables planteadas en el consumo energético de una vivienda en el clima de estudio.

A continuación, se evaluarán los resultados del modelo base, los mismos que servirán para evaluar la influencia frente a las variables morfológicas y materiales configuradas en el modelo de estudio del sistema de Muro Trombe No Ventilado (MTNV).

4.2.1. Análisis de resultados del modelo base

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones sobre el modelo base en la orientación ESTE y OESTE durante un año completo. Los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.1.

En primer lugar, se han evaluado los resultados de la demanda energética mes a mes a lo largo de un año, figura 4.17.

Según estos resultados, tanto en la orientación ESTE como OESTE la mayor demanda de energía se da en el mes de junio y julio, con un valor aproximado de 130kWh y 105kWh respectivamente, para la orientación ESTE, y 120kWh y 100 kWh para la orientación OESTE. Mientras que en el mes de enero se muestra la menor demanda energética con un aproximado de 55kWh para las dos orientaciones. Estos resultados muestran que la orientación ESTE tiene una mayor demanda que la orientación OESTE.

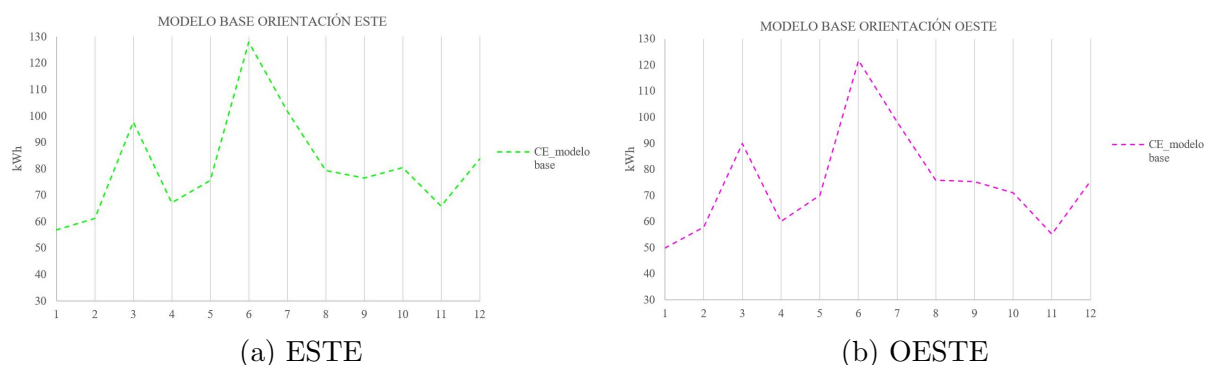


FIGURA 4.17: Resultados del Modelo Base en la orientación ESTE (verde) y OESTE (magenta), durante un año: Demanda Energética.

La demanda anual es de aproximadamente $1000kWh$ para la orientación ESTE y $900kWh$ para la OESTE, lo cual indica que la orientación OESTE tiene un mejor desempeño térmico, que la orientación ESTE, figura 4.18.

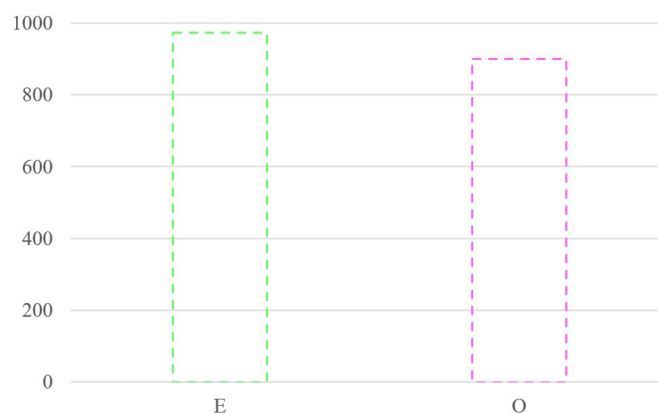


FIGURA 4.18: Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ladrillo.

Por tanto, estas simulaciones muestran una tendencia diferente a los resultados analizados en el apartado anterior. En el análisis de la temperatura, la orientación **ESTE** en los dos días de análisis fueron los que mostraban una mayor temperatura. Cabe mencionar que los resultados de la temperatura interior fueron analizados en dos días puntuales, los cuales tenían una radiación mayor en la mañana que en la tarde. Sin embargo, en este análisis anual, se ha podido hacer una evaluación más global a lo largo de un año, con lo cual se ha determinado que la mejor orientación es la **OESTE**.

4.2.2. Análisis de variables morfológicas

Una vez indicado los resultados del modelo base, en este apartado se exponen los resultados del modelo de estudio en donde se han analizado las variables morfológicas con orientación y espesor en cada uno de los materiales propuestos en el muro acumulador: el adobe, el tapial y el ladrillo.

Este proceso se realiza con el objetivo de observar la influencia que tienen los espesores de cada uno de los materiales sobre la demanda energética en el sistema de MTNV durante el periodo de un año.

ABODE

La figura 4.19, muestra que el muro de adobe de 15cm tanto en la orientación ESTE como OESTE, registra la menor demanda energética de los tres espesores analizados. La diferencia de la demanda energética entre el muro de 15cm frente a los espesores de 30 y 45cm están alrededor de 5kWh y 10kWh durante los meses de junio a octubre, mientras que, durante los meses de noviembre hacia abril esta diferencia está alrededor de 2kWh en las dos orientaciones, los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.2.1.

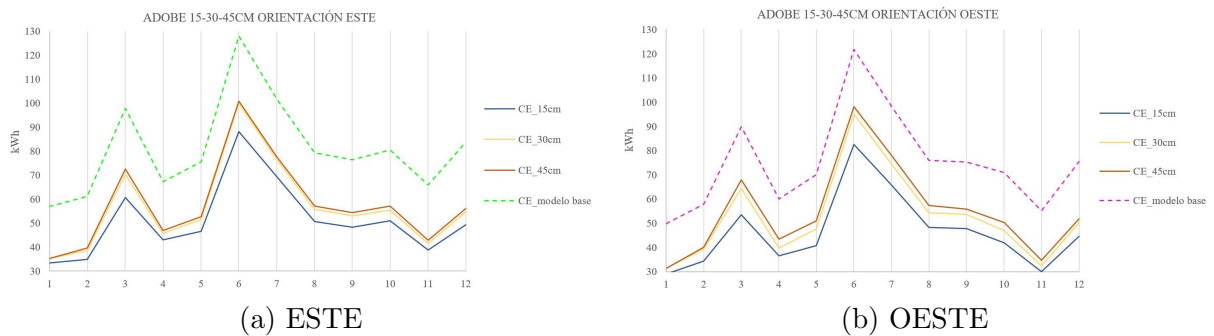


FIGURA 4.19: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética.

En tanto que la diferencia de la demanda energética del muro Trombe de 15cm, respecto al modelo base durante los meses de junio a octubre es de aproximadamente 35kWh en ambas orientaciones, mientras que en los meses restantes la diferencia es de 25kWh para la orientación ESTE y OESTE. De igual manera, la diferencia entre los muros de 30 y 45cm frente a la demanda energética del modelo base es de aproximadamente 26kWh en ambas orientaciones, durante casi todo el año.

De acuerdo con esto, el adobe de 15cm con orientación OESTE presenta la menor demanda energética, representando una demanda de energía anual de 555kWh, de este modo la reducción de energía anual con respecto al modelo base es de 345kWh, ya que el modelo base tiene una demanda de 901kWh con la misma orientación, figura 4.20.

En base a lo discutido, el sistema con muro de adobe de 15cm orientado hacia el ESTE reduce el consumo anual un 37%, mientras que el mismo muro orientado hacia el OESTE reduce un 38% el consumo de energía, en relación a un muro convencional.

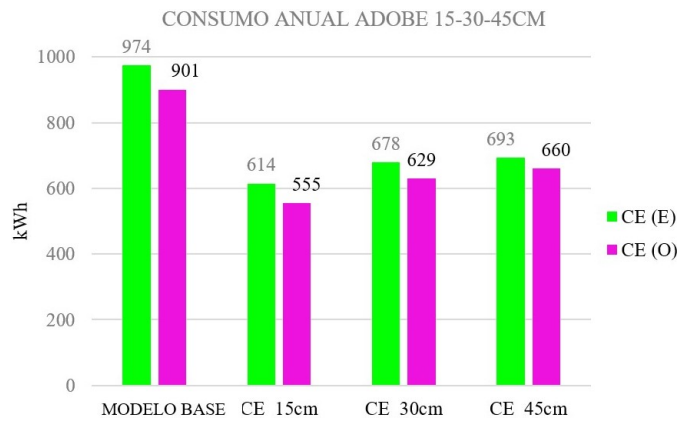


FIGURA 4.20: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en ADOBE con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual.

TAPIAL

En cuanto a los resultados del muro con tapial, en la figura 4.21, nuevamente se observa que tanto en la orientación ESTE como OESTE, entre los tres espesores analizados el espesor con el que se alcanza una menor demanda energética es el de 15cm. La diferencia de la demanda energética del muro Trombe de 15cm frente a los demás espesores de 30 y 45cm están alrededor de 10kWh y 15kWh durante los meses de junio a octubre, mientras tanto, en los meses de noviembre a abril esta diferencia es de aproximadamente 7kWh, los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.2.2.

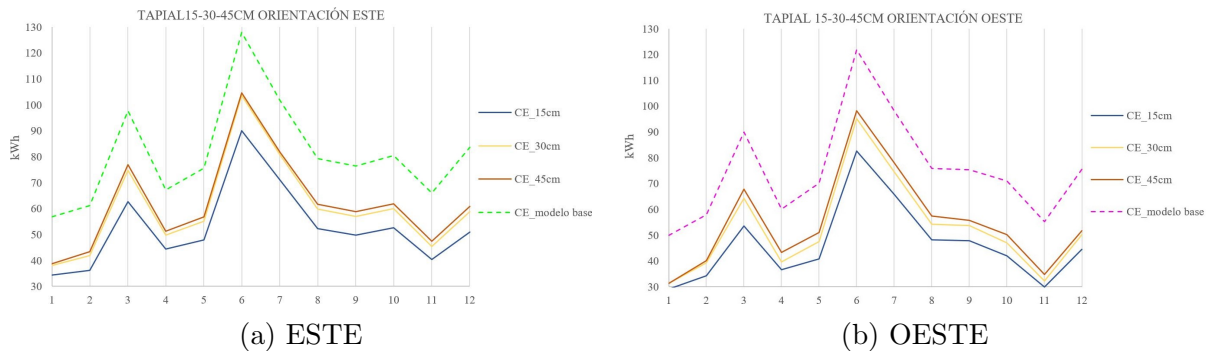


FIGURA 4.21: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética.

Así mismo, la diferencia de la demanda energética del muro Trombe de 15cm, respecto al consumo energético del modelo base durante los meses de junio a octubre es de aproximadamente 30kWh en ambas orientaciones, mientras que en los meses restantes la diferencia es de 20kWh para la orientación ESTE y OESTE. Por otro lado, la diferencia entre los muros de 30 y 45cm frente a la demanda energética del modelo base es de aproximadamente 10kWh en ambas orientaciones, durante casi todo el año.

Conforme con lo mencionado, el tapial de 15cm con orientación OESTE presenta la

menor demanda energética, el cual representa una demanda de energía anual de $585kWh$, de esta forma, la reducción de energía anual con relación al modelo base es de $315kWh$, por lo que el modelo base tiene una demanda de $901kWh$ en la misma orientación, figura 4.22.

De acuerdo a lo discutido, el sistema de tapial de $15cm$ orientado hacia el ESTE reduce el consumo anual un 35% , mientras que el mismo muro orientado hacia el OESTE reduce un 35.5% el consumo de energía, en relación a un muro convencional. A pesar de que, en este material, la diferencia no es muy marcada, se evidencia la misma tendencia, mostrada con el uso de adobe. Por lo que se define que el muro orientado hacia el OESTE presenta mejores condiciones que el que se orienta hacia el ESTE.

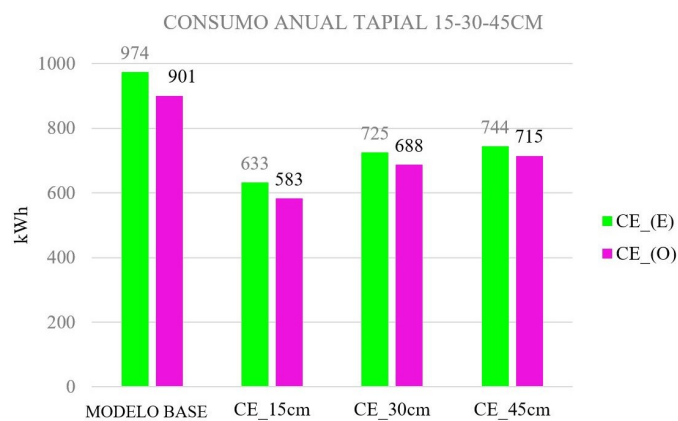


FIGURA 4.22: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en TAPIAL con espesores de ($15,30,45cm$) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual.

LADRILLO

Mediante los resultados de la Figura 4.23, se observa que el muro de ladrillo de $15cm$ en la orientación ESTE y OESTE nuevamente es el que alcanza la menor demanda energética entre los tres espesores analizados. También se aprecia que la diferencia de la demanda energética entre el muro de $15cm$ frente a los espesores de 30 y $45cm$ bordean los $7kWh$ y $12kWh$ desde el mes de junio a octubre aproximadamente, mientras que en los meses de noviembre a abril esta diferencia disminuye aproximadamente a $5kWh$, los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.2.3.

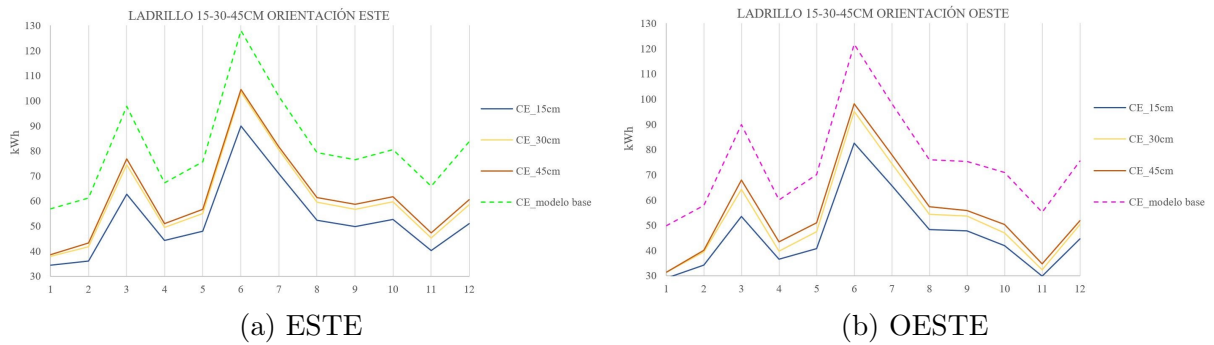


FIGURA 4.23: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE durante un año: Demanda Energética.

De la misma manera, se observa la diferencia de la demanda energética del muro Trombe de 15cm, respecto a la demanda energética del modelo base durante los meses de junio a octubre, la misma que representa aproximadamente $32kWh$ en ambas orientaciones, mientras que en los meses restantes la diferencia es de $24kWh$ para la orientación ESTE y OESTE.

Con lo mencionado, el ladrillo de 15cm con orientación OESTE presenta la menor demanda energética, con una demanda de energía anual de $581kWh$, por tal motivo la reducción de energía anual de este muro con respecto al modelo base es de $320kWh$, ya que el modelo base tiene una demanda de $901kWh$ con la misma orientación, figura 4.24.

En base a lo discutido, el sistema de ladrillo de 15cm orientado hacia el ESTE reduce el consumo anual un 35 %, mientras que el mismo muro orientado hacia el OESTE reduce un 35.50 % el consumo de energía, en relación al sistema convencional.

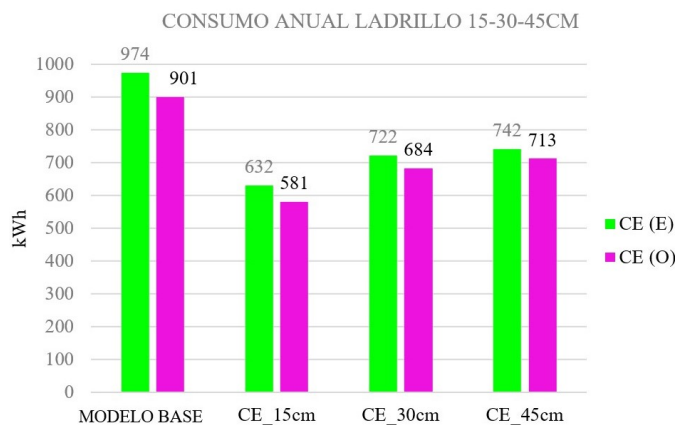


FIGURA 4.24: Resultados del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado en LADRILLO con espesores de (15,30,45cm) en la orientación ESTE y OESTE. Consumo Energético anual.

Como en los casos anteriores y con los resultados en las variables morfológicas analizadas, se ha visto que el sistema con muro de 15cm de espesor, orientado hacia el **OESTE** muestra una menor demanda de energía.

Como se explicó en el análisis de la Temperatura interior, la diferencia de 1.25°C de todos los muros de 15cm con respecto al modelo base efectivamente sí es representativa, lo cual se nota numéricamente en la demanda energética, llegando a representar reducciones de más de 400kWh anuales.

4.2.3. Análisis de variables materiales

En este apartado se analizarán las variables de materiales. Dentro de estas variables se plantea evaluar los tres materiales más usados en esta región: adobe, tapial y ladrillo. Además, se analizará el posible aporte que puede tener el uso de la pintura negra y el uso del doble vidrio.

Una vez definido que el muro de 15cm , es el que presenta los mejores resultados, a continuación, se analizará cual es la diferencia que existe entre cada una de las variables materiales.

Adobe, Tapial y Ladrillo de 15cm con Orientación OESTE

La figura 4.25, muestra la demanda energética existente entre el adobe (marrón), tapial (beige), y el ladrillo (naranja) de 15cm de espesor, durante el periodo anual. Los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.3.1.

Es claro que durante casi todo el año el muro de ladrillo y el muro de tapial mantienen entre sí una mínima diferencia en la demanda energética, mientras que, el muro de adobe frente al muro de tapial y ladrillo si muestra una diferencia marcada. Esta diferencia representa que el adobe esté 2kWh por debajo de los otros dos materiales durante la mayoría de los meses del año.

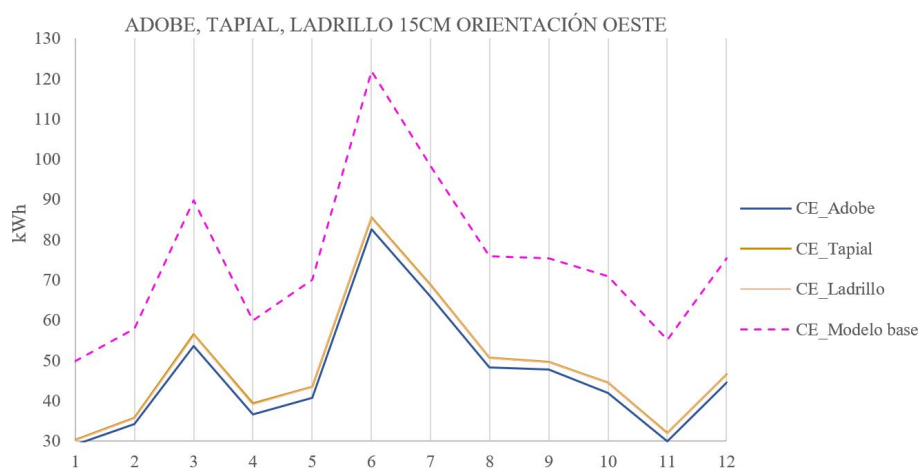


FIGURA 4.25: Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO (15 cm) con orientación OESTE durante un año: Demanda Energética.

La figura 4.26, muestra los resultados anuales de los 3 materiales en comparación

al modelo base. De acuerdo a estos resultados, se observa una reducción de energía de $345kWh$ en el adobe, $318kWh$ en el tapial y $320kWh$ en el ladrillo, respecto al modelo base. De este modo, se determina que el muro de **ADOBE** de $15cm$ con orientación **OESTE** es el que presenta la menor demanda energética. Cabe recalcar que esta variable de material y espesor coincide con los resultados vistos en el análisis de la temperatura interior T_{ai} , con la excepción de la orientación que ya se explicó previamente.

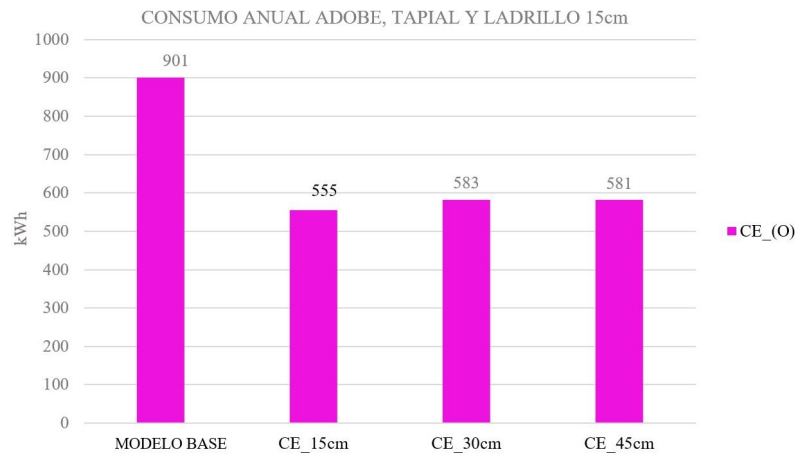


FIGURA 4.26: Resultado de los Modelos de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO (15 cm) con orientación OESTE: Consumo Energético anual.

Superficie color negro

Para proceder a evaluar esta variable, se comparará el muro de adobe de $15cm$ orientado hacia el OESTE, obtenido de los resultados anteriores, en comparación con este mismo muro, pero con el uso de una capa de pintura negra en la parte exterior del muro para incrementar la absorción solar del mismo. Los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.3.2.

Mediante la figura 4.27, se detalla que el muro de adobe de $15cm$ sencillo frente a un muro de adobe de $15cm$ con superficie color negro (pintura), muestra un pequeño aporte desde el mes de agosto hasta febrero. Esta reducción representa que la variable de superficie color negro esté $1.5kWh$ por debajo del muro sencillo.

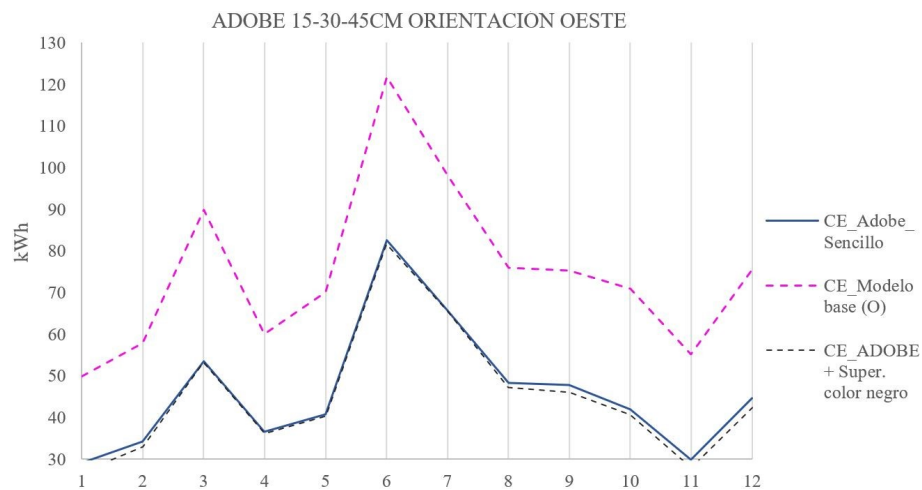


FIGURA 4.27: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el OESTE durante un año: Demanda Energética.

En la figura 4.28, se observa que la diferencia del consumo energético existente entre el adobe sencillo y el adobe con superficie de color negro representa una reducción de energía de aproximadamente $10kWh$. De tal modo, se determina que la variable de la superficie color negro aporta en la reducción del consumo energético de manera mínima.

Este resultado, coincide con los obtenidos en el análisis de la temperatura interior T_{ai} , al igual que en el apartado anterior, la adhesión de pintura muestra una ventaja muy reducida en el comportamiento térmico del sistema.

El incremento de esta superficie en el sistema, permite que se reduzca el consumo energético un 40 %, en relación al sistema convencional, es decir 2 % más en referencia al sistema de muro Trombe de 15cm, que no posee esta capa superficial.

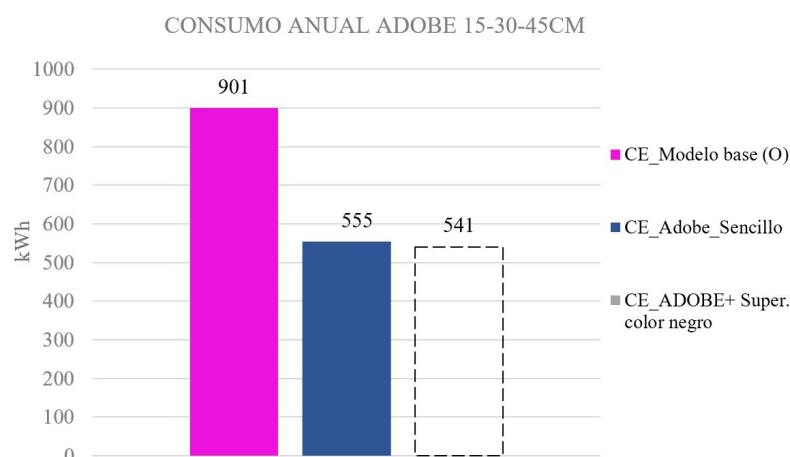


FIGURA 4.28: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON UNA CAPA DE PINTURA NEGRA orientados hacia el OESTE: Consumo Energético anual.

Vidrio Doble

También se ha analizado cual es el aporte que se presenta al aplicar la variable de un doble vidrio frente al muro de adobe sencillo que contiene un vidrio simple.

Para evaluar el impacto de esta variable se ha utilizado el muro de adobe de 15cm con un vidrio simple con orientación OESTE obtenido de los resultados anteriores, en comparación con este mismo muro, pero con el uso de un vidrio doble en la misma orientación. Los resultados numéricos se muestran en el anexo A3.3.3.

A través de la figura 4.26, se puede apreciar que durante todos los meses existe un aporte mínimo de 2.5kWh al aplicar la variable de doble vidrio. Esta reducción en la demanda de energía es un poco mayor que la superficie color negro. Además, existe una diferencia con los resultados mostrados en el análisis de la temperatura interior, esto se debe a que el uso de una doble capa de vidrio, ayuda a mejorar el aislamiento del muro Trombe, lo que no tiene mayor impacto en la temperatura interior, pero si se ve reflejado en la calefacción, ya que reduce las pérdidas del espacio calefactado y con ello la energía que se utiliza el sistema de calefacción.

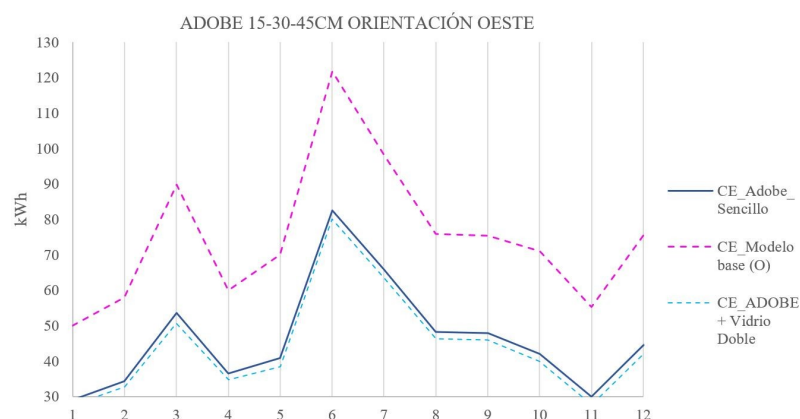


FIGURA 4.29: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el OESTE: Demanda Energética.

En la figura 4.30, se observa que la diferencia del consumo energético anual existente entre el adobe sencillo y el adobe con vidrio doble representa una reducción de energía de aproximadamente 25kWh . De esta manera, se determina que la variable de vidrio doble también aporta en la reducción del consumo energético.

El cambio del vidrio simple por vidrio doble, permite que se reduzca el consumo energético un 41 %, en relación al sistema convencional, es decir 3% más en referencia al sistema de muro Trombe de 15cm que emplea un vidrio simple.

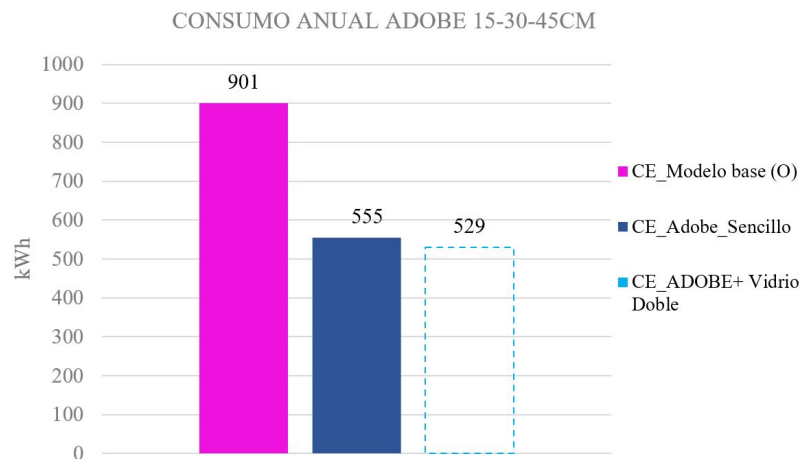


FIGURA 4.30: Resultado del Modelo de estudio de muro Trombe no ventilado de ADOBE SENCILLO de (15cm) frente a un muro Trombe no ventilado de ADOBE CON VIDRIO DOBLE orientados hacia el OESTE: Consumo Energético Anual..

Con todo lo descrito, se puede concluir que el muro de adobe sencillo de 15cm con orientación **OESTE** es el ofrece un mayor aporte en la reducción de la demanda energética. De tal modo que su consumo energético anual es de 555kWh mientras que, en el muro de tapial y ladrillo muestran un mayor consumo con 580kWh y 585kWh para cada material respectivamente.

Por último, se ha visto que con la aplicación de un doble vidrio y una capa de pintura el consumo tiende a disminuir 10kWh y 30kWh respectivamente. Sin embargo, no existe mayor diferencia con el muro de 15cm normal, por lo que, el implementar estas variables incrementaría el gasto económico, y no aportaría de mayor beneficio en el funcionamiento del sistema de MTNV.

4.3. Definición de la propuesta

En base a las simulaciones y al análisis de los resultados de cada una de las variables, se ha obtenido criterios que han sido aplicados en la propuesta de modelo de habitación que se presentará a continuación.

El modelo de dormitorio ha sido diseñado considerando dos fases: la primera parte, considera el impacto en la temperatura interior. Mediante este parámetro de referencia se ha buscado que el espacio analizado mejore las condiciones de confort en comparación con el modelo base, lo cual ha permitido determinar la orientación adecuada, el material y espesor a utilizarse. En una segunda fase se ha considerado el consumo energético, parámetro en el que, de igual manera, se ha podido definir el material y espesor adecuado con su respectiva orientación. Todo esto en busca de que el modelo de habitación mejore las condiciones de confort interior y reduzca el consumo energético.

Los resultados obtenidos han permitido determinar que el espacio que cuenta con el sistema de muro Trombe no Ventilado mejora las condiciones de confort y sobre todo minimiza el consumo de energía. En relación a un sistema convencional.

De esta manera, el modelo que se ha definido ha sido un muro de adobe de 15cm orientado hacia la OESTE, figura 4.31. Aunque los resultados de la temperatura interior T_{ai} determinan que la orientación ESTE era la más adecuada, a través del análisis de la demanda energética se pudo determinar que, en el periodo anual resulta más conveniente la orientación OESTE.

Además, los resultados mostrados con la demanda energética reflejan que el uso de una doble capa de vidrio podría reducir más el consumo anual, sin embargo, esta reducción no es representativa, mientras que la inversión de este vidrio si lo es económicamente. Algo que se puede sugerir es el uso de la pintura negra que logra reducir en algo el consumo energético y no representa una mayor inversión económica.

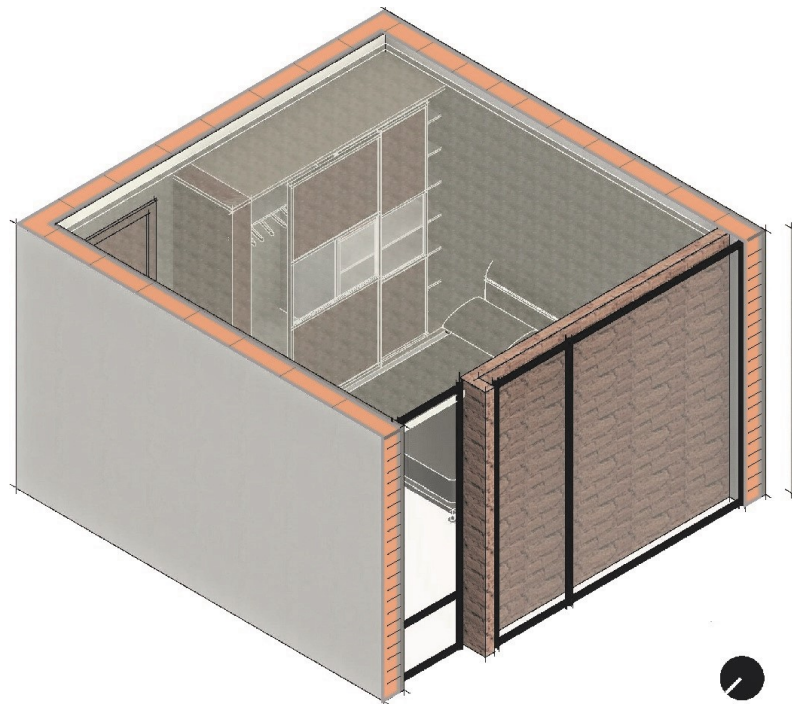


FIGURA 4.31: MODELO PROPUESTO DE SISTEMA DE MURO TROMBE NO VENTILADO DE ADOBE DE (15cm).

Finalmente, se ha realizado una comparación entre el modelo propuesto frente a los muros con los sistemas constructivos más utilizados en la ciudad de estudio.

Desde el siglo XIX, en la ciudad de Cuenca ha predominado el uso del ladrillo panelón, este material se ha hecho evidente en la mayor parte de fachadas de las viviendas de la ciudad. Sin embargo, con el paso de los años se ha empezado a utilizar materiales industrializados. Tal es el caso del bloque de pómez y del ladrillo alivianado, estos materiales, en la actualidad se emplean con mayor incidencia.

De acuerdo a lo mencionado, a continuación, serán comparados tres sistemas constructivos empleados en la ciudad, en relación al sistema a proponerse, para así establecer la demanda energética de cada uno de estos, figura 4.32.

Conforme con estos resultados el sistema de mamposterías que más energía demanda es el bloque de pómez, $1026kWh$ anualmente, seguido del ladrillo macizo (modelo base) con $900kWh$, el ladrillo alivianado con $881kWh$, y el muro Trombe propuesto con $554kWh$. El muro de ladrillo macizo (modelo base) requiere de 38 % más de energía, en relación a la propuesta de muro Trombe de adobe.

En relación al sistema constructivo que emplea ladrillo alivianado, el requerimiento de energía disminuye, en relación al sistema de ladrillo macizo en un 2%. No obstante, este sistema alivianado requiere 38 % más energía en relación al muro de adobe propuesto.

Finalmente, el sistema que emplea bloque de pómez, tiene una demanda energética 45 % mayor que el muro Trombe propuesto.

Por tanto, este parámetro de análisis hace evidente que la temperatura interior del sistema propuesto, está cerca de la zona de confort por periodos de tiempo más prolongados, en referencia a los sistemas convencionales empleados en la ciudad de Cuenca. Por este motivo, la demanda de energía del muro de adobe es menor.

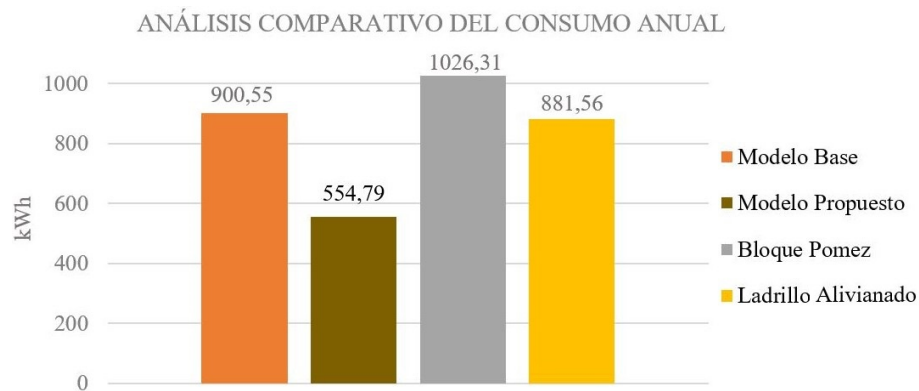


FIGURA 4.32: Análisis comparativo del Consumo Energético de los SISTEMAS CONSTRUCTIVOS (Bloque pómez, Ladrillo Alivianado) empleados en la ciudad de Cuenca, frente al MODELO PROPUESTO de muro Trombe no Ventilado de ADOBE de 15cm.

Para concluir, se determina que esta propuesta de muro Trombe no Ventilado presenta una reducción marcada de demanda de energía en comparación con los sistemas más usados en Cuenca, no obstante, requiere de una inversión económica. De acuerdo con un análisis cuantitativo, se puede estimar que el costo de la instalación del muro Trombe bordea los 45\$/m², recalcando que el valor indicado emplea el uso de un vidrio simple, mientras que, el sistema con vidrio doble el precio se incrementa a 100\$/m².

Entonces si en una habitación con un muro de 3m² se implementa este sistema, se genera un incremento de 120\$ extra, sin embargo, significaría un ahorro de 400kWh aproximadamente anualmente, lo que significa una reducción de la demanda energética de 40\$ anuales, es decir en 3 años el muro ya sería rentable. De acuerdo con este análisis se puede determinar que el uso del muro Trombe resulta una estrategia factible en el clima de la ciudad de Cuenca, tanto energéticamente como económicamente.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

El presente trabajo de titulación, se ha enfocado en el análisis de distintos parámetros que influyen en el comportamiento térmico y en la demanda energética de un sistema pasivo de muro Trombe no Ventilado.

Se ha evidenciado que el confort interior paulatinamente se ha ido reduciendo en las viviendas, esto se debe a que los sistemas de construcción, progresivamente se globalizan y los mismos materiales que se emplean en regiones cálidas, se utilizan en espacios geográficos con clima frío.

A más del cambio de sistemas constructivos, las edificaciones no consideran parámetros bioclimáticos, que pueden aportar a mejorar las condiciones térmicas interiores de un espacio.

El diseño arquitectónico se basa más en generar un efecto óptimo y deja a un lado las variables de confort. En este sentido, surgen diferentes alternativas, que, a más de mejorar el confort interior de las viviendas, pretendan disminuir el consumo energético que demandan los sistemas activos por calefacción o refrigeración.

Dentro de este contexto, esta tesis tiene como objetivo general: **Diseñar y comprobar la factibilidad de un muro Trombe como sistema pasivo de acondicionamiento térmico en la ciudad de Cuenca.**

Para lograr el mencionado objetivo general, se han establecido tres objetivos específicos. En primera instancia, realizar una recopilación bibliográfica para definir las variables que influyen en el comportamiento térmico de un muro Trombe.

En segunda instancia, determinar las características morfológicas y de materiales con mayor impacto en la reducción del consumo energético por calefacción a través de simulaciones digitales en la región Andina de Cuenca, para establecer un modelo que funcione de manera óptima.

Finalmente, comparar el funcionamiento térmico entre el modelo propuesto frente a un muro con los sistemas constructivos más utilizados en la ciudad de Cuenca, esto servirá para responder a la interrogante global de esta investigación: ¿Es factible implementar un muro Trombe como sistema de acondicionamiento pasivo en la ciudad de Cuenca?

En base al desarrollo de esta tesis es posible extraer las siguientes conclusiones:

A través de la revisión bibliográfica revisada, fue posible definir que el muro Trombe no ventilado (MTNV) tiene una mayor eficiencia en el comportamiento térmico interior en una habitación en comparación con un muro Trombe Ventilado (MTV). Además, estas revisiones han permitido establecer el ancho de 5cm de la cámara de aire, de tal modo que el almacenamiento de la temperatura sea mayor y efectivo en el espacio mencionado. También, se ha podido definir tanto el área del muro y del vidrio que compone el sistema para el espacio propuesto, y, por último, y de suma importancia, las variables con mayor influencia identificadas en otros climas como el uso de las pinturas y los vidrios dobles.

A través de las simulaciones digitales se ha podido dar respuesta al segundo objetivo, con lo cual se ha definido las variables morfológicas y de materiales más influyentes en la

reducción del discomfort térmico del espacio interior y de la demanda energética.

Así, en cuanto a la variable de orientación, la fachada OESTE resulta ser la orientación con mayor eficiencia para el muro Trombe, con lo cual se consigue una menor demanda energética anual, frente a la orientación ESTE. Esto se debe a que la mayor captación solar en el clima estudiado se da en el periodo vespertino.

En referencia al espesor del material en el sistema de MTNV, se ha definido que los muros de 15cm ofrecen el mejor desempeño térmico interior tanto en el periodo diurno como en el nocturno por encima de los muros de 30cm y 45cm. Dada la mayor conductividad térmica que presenta este muro por su espesor permite un mayor calentamiento del espacio interior, frente a los otros muros estudiados los cuales no alcanzan a calentarse con tanta facilidad con la radiación solar recibida. Y, además, dada la elevada masa térmica de los materiales analizados en el periodo nocturno el almacenamiento de calor es casi igual para los 3 espesores. Los resultados mostrados en esta tesis, complementan a las conclusiones evidenciadas en el de [Guillén & Cordero \(2012\)](#), quienes definen un espesor de 24cm para el muro Trombe analizado, no obstante, el presente estudio resalta que el uso de un muro de 15cm es el más eficiente.

En lo que se respecta a las variables de materiales, se ha podido conocer que, de los 3 materiales analizados, es el Adobe el que presenta mayores temperaturas interiores y por ende la menor demanda energética. Nuevamente, dado que este material, por un lado, tiene una mayor conductividad térmica puede transmitir un poco más de calor en el día, y, por otro lado, al tener una mayor masa térmica puede almacenar un poco más de calor y transmitirla en la noche. Aunque las diferencias son pequeñas con los otros materiales, la reducción de la demanda energética es considerable.

Así mismo, a través del análisis de las variables de materiales con mayor absorción solar y el uso de una doble capa de vidrio, se evidencia que estas estrategias no influyen significativamente en el comportamiento térmico del MTNV.

Por lo tanto, en base a este análisis de variables tanto morfológicas como de materiales, fue posible determinar que el sistema que mejor desempeño térmico posee, es el que emplea un muro de adobe de 15cm orientado hacia el OESTE. El cual logra mejorar la temperatura interior en relación al modelo base 2°C. De tal forma, la ventaja que proporciona este muro bordea unas temperaturas 17°C y 25°C en casi todas las horas del día. En cuanto a los resultados sobre la demanda energética, el muro con las variables definidas reduce un 38% la demanda de energía, en relación al modelo base. A más de ello, el uso de una superficie de color negro y el vidrio doble sobre el muro propuesto reduce tan solo un 2% y 3% respectivamente más la demanda energética.

Por otro lado, con este análisis se pudo concluir que la reducción del consumo energético que ofrece el modelo propuesto, en relación a los sistemas sencillos (sin muro Trombe) más empleados en la ciudad de estudio: ladrillo macizo, ladrillo alivianado, bloque pómez, es del 38%, 46% y 37% respectivamente.

Conforme a lo discutido, el sistema que presenta un mejor comportamiento térmico para el espacio interior analizado, tanto en el aspecto energético como térmico, es el muro

Trombe de adobe de 15cm, orientado hacia el OESTE.

En consecuencia y en relación a la interrogante planteada dentro de esta investigación, el uso de muro Trombe propuesto en el contexto de la ciudad de Cuenca es factible. Dadas las condiciones climáticas de la ciudad, el uso de masa térmica y el atrapamiento radiativo que ofrece el MTNV logrará mejorar el confort interior de los espacios y a su vez reducir la demanda energética por calefacción de manera considerable.

CAPÍTULO 6

Recomendaciones

El sistema pasivo de muro Trombe es muy poco conocido y sobre todo no desarrollado en la región Andina del Ecuador, razón por la cual es necesario impulsar el uso de este tipo de estrategia bioclimática, la misma que promueve a utilizar los factores climáticos con lo cual se puede mejorar el confort térmico interior y a su vez a reducir el consumo energético en las viviendas.

Por una parte, se recomienda el uso de este sistema como un método para reducir el discomfort interno, sobre todo en los periodos más fríos del año.

Para trabajos futuros, también se recomienda comprobar los resultados de manera experimental, primero en laboratorio y luego en un contexto real.

Además, se recomienda definir correctamente el tipo de sistema de muro Trombe a utilizar, y para lograr un eficiente funcionamiento del sistema se debe dimensionar correctamente el área de captación solar, así como los materiales de alta inercia térmica.

Referencias Bibliográficas

- Agrawal, P. C. (1989). A review of passive systems for natural heating and cooling of buildings. *Solar and Wind Technology*, 6(5), 557–567. doi: 10.1016/0741-983X(89)90091-X
- Álvarez, D. A. (2015). *Estudio de muros Trombe del tipo simple de circulación delantera y su influencia en el confort térmico mediante calefacción solar pasiva aplicado a una vivienda unifamiliar* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato.
- Arballo, B., Kuchen, E., Scientific, N., y Naranjo, Y. A. (2016). *Evaluación de modelos de confort térmico para interiores* (n.º October).
- ARCONEL. (2014). *Estadística del sector eléctrico ecuatoriano 2014*. Descargado de <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/boletines-estadisticos>
- Ashrae, A. (2004). *Standard 55-2004, Thermal environmental conditions for human occupancy, atlanta: american society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers*. Atlanta, USA.
- Assefa, G., Glaumann, M., Malmqvist, T., y Eriksson, O. (2010). Quality versus impact: Comparing the environmental efficiency of building properties using the EcoEffect tool. *Building and Environment*, 45(5), 1095–1103. doi: 10.1016/j.buildenv.2009.10.001
- Balcomb, J. D., y Mcfarland, R. D. (1978). *A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage wall type* (Inf. Téc.). Los Alamos Scientific Lab., N. Mex.(USA).
- Briga-Sá, A., Martins, A., Boaventura-Cunha, J., Lanzinha, J. C., y Paiva, A. (2014). Energy performance of Trombe walls: Adaptation of ISO 13790:2008(E) to the Portuguese reality. *Energy and Buildings*, 74, 111–119. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.01.040
- Brundtland, G. H. (1989). Nuestro futuro común. En *Ponencias y comunicaciones: Congreso internacional de tecnologías alternativas de desarrollo* (pp. 7–8).
- Carrasco, E. E. (2019). *Estudio del Disconfort Térmico en los Trabajadores del Área de Empaquetado y Despacho de la Planta de Faenamamiento Lasso de la Empresa INCUBANDINA SA* (Tesis de Grado). Universidad Tecnológica Indoamérica.
- CENTRO SUR. (2019). *Energía consumida. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable*. Descargado de <https://www.centrosur.gob.ec/energia-consumida/>
- Climate.OneBuilding.Org. (2020). *Climate OneBuilding*. Descargado 2020-

-
- 06-22, de http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/index.html#IDAZ_Azuay
- Concejo Cantonal. (2003). *Reforma actualización, complementación y codificación de la ordenanza que sanciona el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca*. Cuenca, Ecuador.
- Costa, S. (2011). *Arquitectura y eficiencia energética*. Murcia, España: Prosperous Printing Co. Ltd.
- Cuevas, G. (2008). *Análisis de la Transferencia de Calor Conjugada en un Sistema Solar Pasivo de Muro Trombe*. CENEDIT Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Departamento de Ingeniería Mecánica.
- Cuevas, S. A. (2019). *Vivienda Unifamiliar Autosustentable* (Tesis de grado). Universidad Técnica Federico Santa María.
- DesignBuilder. (2019). *DesignBuilder Software Ltd*. Descargado 2020-04-10, de <https://www.designbuilder.co.uk/>
- De Steffens, A. M. C., Piccolo, M. C., y de Ferreras, A. M. C. (2005). *El clima urbano de Bahía Blanca*. Editorial Dunken.
- Escobar, M. (2019). *Estudio de un sistema térmico pasivo de captación de energía solar: Muro Trombe* (Tesis de grado). Universitat Politècnica de Catalunya.
- Fernández, F. (1994). Clima y confortabilidad humana: aspectos metodológicos. *Serie geográfica*, 4(4), 109–126.
- Flores, W. (2018). “*Criterios Arquitectónicos para la implementación de viviendas auto-sostenibles en zonas de friaje - Caso: Mazocruz – Puno*”. Chimbote, Perú: Universidad César Vallejo.
- Galindo, J., y Baigts, J. L. (2015). Integración de la sostenibilidad a la enseñanza de la arquitectura para mitigar el cambio climático, ejemplo: aplicación de techos verdes en la colonia La Paz, Puebla, Pue. *Puebla. Recuperado el*, 12.
- Giraldo, J., y Arango, J. P. (2020). *Proceso de optimización en el diseño de sistema de calefacción solar pasivo* (Vol. 16) (n.º 2). doi: 10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.357
- González, M. R., y Molina, L. F. (2018). Envolvente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad. *Arquitecturas Visión FUA*, 1(1), 49–61. doi: 10.29097/26191709.201
- Guillén, V. F., y Cordero, A. X. (2012). *Criterios bioclimáticos para el diseño de viviendas unifamiliares en la ciudad de Cuenca* (Tesis de Grado, Universidad de Cuenca). Descargado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/595>
- Healy, J. D. (2015). Excess winter mortality in Europe: A cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 57(10), 784–789. doi: 10.1136/jech.57.10.784
- Hernández, I., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-Pérez, I., y Alvarado-Juárez, R. (2016). Thermal energy storage and losses in a room-Trombe wall system located in Mexico. *Energy*, 109, 512–524. doi: 10.1016/j.energy.2016.04.122
- Köppen, W. (1948). *Climatología: con un estudio de los climas de la tierra*. (Inf. Téc.).
- León, A. L., Morales, G. B., Moreno, R. R., y Ortega, R. G. a. (2013). *Desempeño térmico en variaciones de muro trombe en clima cálido seco extremoso* (Tesis de Grado). Universidad Nacional del Centro de Perú.
- Loaiza, D. F. (2013). *Adaptación e implementación de Sistema de calefacción susten-*
-

-
- table en el sector Andino del Ecuador* (Tesis de Grado, Universidad Internacional del Ecuador.) Descargado de <http://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2093>
- Luengo, J. E. (2018). *Proyecto De Muro Trombe Aplicado a Jardín Infantil En La Ciudad De Lebu*.
- Luna, A., Bojórquez, G., Romero, R., Gallegos, R., y Corral, M. (2014). Desempeño térmico en variaciones de muro Trombe en clima cálido seco extremoso. *Palapa, II@article*(January), 3–17.
- Manzano, D. F. (2017). *Acondicionamiento térmico de los espacios interiores en la Unidad Educativa “General Córdoba” de la ciudad de Ambato en el periodo 2017* (Tesis de grado). Universidad Técnica de Ambato.
- McMullan, R. (2018). *Environmental Science in Building* (Sixth ed.). France: Palgrave Macmillan Education. doi: 10.1057/978-1-137-60545-0
- Molina, C., y Veas, L. (2012). Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno. *Revista de la Construcción*, 11(2), 27–38. doi: 10.4067/s0718-915x2012000200004
- Morris, A. E. J., y Bernet, R. (1998). *Historia de la forma urbana :desde sus orígenes hasta la Revolución Industrial* (Vol. 6ª). Barcelona, España: Gustavo Gili Barcelona.
- NEC. (2011). *Norma Ecuatoriana De La Construcción* (Vol. Capítulo 1). Quito-Ecuador: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. Descargado de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-CG.pdf>
- Neila, J. (2014). Arquitectura Bioclimática en un entorno. *Boletín CF+ S*(14). Descargado de <http://polired.upm.es/index.php/boletincfs/article/view/2269/2351>
- Neira, A. P. (2015). *Acondicionamiento térmico en espacios interiores de viviendas, usando la energía solar* (Tesis de grado). Universidad del Azuay.
- Olaya, M. (2005). Investigación sobre el Comportamiento Térmico de Soluciones Constructivas Bioclimáticas. *PROYECTO RECONSOST*, 1, 79.
- Olgay, V. (2008). *Arquitectura y clima :manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Gustavo Gili.
- Özbalta, T. G., y Kartal, S. (2010). Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of turkey. *Scientific Research and Essays*, 5(18), 2768–2778.
- Pérez, L., Ortiz, J., y Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007
- Pomaya, J. R. (2013). *Uso del Muro Trombe para el confort térmico en un terminal terrestre para Huancaayo*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional del Centro de Perú.
- Quesada, F., y Bustillos, D. (2018). Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort standard. *Buildings*, 8(7), 90. doi: 10.3390/buildings8070090
- Real Academia Española . (2020). *Confort*. Real Academia de la Lengua Española. Descargado de www.rae.com
- RECONSOST. (2019). *Diseño solar pasivo*. Descargado de <http://www>
-

[.revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=275:diseño-solar-pasivo&catid=10&Itemid=178](http://revistatoldo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=275:diseño-solar-pasivo&catid=10&Itemid=178)

- SENER. (2017). *Balance nacional de energía 2017*. Mexico: Secretaría de Energía.
- Serra, R., y Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*, Ediciones UPC, Barcelona. Catalunya, España.
- Serrano, J., Aguilar, K. M., y Trejo, Z. (2017). Simulación energética de la sala en una vivienda social con muro trombe para evaluar el confort térmico. *Revista de Investigación y Desarrollo*, 3(9), 31–39.
- Torres, E. R., y Bucheli, J. L. (2017). *Construcción y modelación de un módulo didáctico de muro Trombe mediante CFD para fomentar los estudios de la calefacción solar pasiva*. (Tesis fin de Master, Politécnica Nacional del Ecuador). Descargado de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17509>
- U.S. Department of Energy. (2020). *EnergyPlus — EnergyPlus*. Descargado 2020-08-30, de <https://energyplus.net/>
- Zalamea, E., y Quesada, F. (2017). Criterios de integración de energía solar activa en arquitectura. Potencial tecnológico y consideraciones proyectuales. *Revista de Arquitectura*, 19(1), 65–79. doi: 10.14718/revarq.2017.19.1.1018
- Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B., y Butez, M. (2002). Study of solar walls - Validating a simulation model. *Building and Environment*, 37(1), 109–121. doi: 10.1016/S0360-1323(00)00072-X

Anexo 1: Definición de los periodos de estudio

A1.1 Determinación del mes frío

El mes de agosto, es el que presenta las temperaturas bajas, según la tabla 2. Esta tabla indica que la temperatura promedio de este mes es de 14°C. A partir de estos datos se ha simulado dicho mes para definir un día promedio, para nuestro caso el día 11 de agosto es el que se aproxima a la temperatura promedio indicada.

Tabla 6.1: DETERMINACIÓN DEL MES FRÍO

| Mes de análisis: 31 días de agosto | | | |
|---------------------------------------|-------|-----|-------|
| Material: Ladrillo panelón + enlucido | | | |
| Temperatura del aire exterior | | | |
| Día | Ta | Día | Ta |
| 1 | 12,53 | 17 | 16,02 |
| 2 | 14,17 | 18 | 15,16 |
| 3 | 14,84 | 19 | 14,69 |
| 4 | 15,67 | 20 | 14,3 |
| 5 | 14,27 | 21 | 13,23 |
| 6 | 15,36 | 22 | 14,72 |
| 7 | 15,66 | 23 | 15,28 |
| 8 | 14,55 | 24 | 14,87 |
| 9 | 14,18 | 25 | 13,73 |
| 10 | 14,52 | 26 | 14,49 |
| 11 | 13,88 | 27 | 14,67 |
| 12 | 15,36 | 28 | 14,57 |
| 13 | 15,61 | 29 | 13,06 |
| 14 | 16,04 | 30 | 14,36 |
| 15 | 15,69 | 31 | 15,27 |

A1.1.1 Definición del día promedio frío

Tabla 6.2: DEFINICIÓN DEL DÍA PROMEDIO FRÍO

| Día de análisis: 11-ago | | | |
|---------------------------------------|-------|--------------|-------|
| Material: Ladrillo panelón + enlucido | | | |
| Temperatura del aire exterior | | | |
| Hora: | Ta | Hora: | Ta |
| 1:00 | 11,77 | 13:00 | 16,5 |
| 2:00 | 10,98 | 14:00 | 19,25 |
| 3:00 | 10,6 | 15:00 | 20,75 |
| 4:00 | 10,2 | 16:00 | 20,25 |
| 5:00 | 9,88 | 17:00 | 20,75 |
| 6:00 | 9,5 | 18:00 | 20,25 |
| 7:00 | 8,35 | 19:00 | 20 |
| 8:00 | 7,85 | 20:00 | 17,3 |
| 9:00 | 7,95 | 21:00 | 16,1 |
| 10:00 | 8,75 | 22:00 | 14,5 |
| 11:00 | 10,5 | 23:00 | 14 |
| 12:00 | 14 | 23:59 | 13,63 |

A1.2 Determinación del mes promedio

El mes de febrero, es el que presenta las temperaturas máximas, según la tabla 2. Esta tabla indica que la temperatura promedio de este mes es de 17.5°C. A partir de estos datos se ha simulado dicho mes para definir un día promedio extremo, para nuestro caso el día 9 de febrero es el que se aproxima a la temperatura promedio indicada.

Tabla 6.3: DETERMINACIÓN DEL MES PROMEDIO

| Mes de análisis 28 días febrero | | | |
|---------------------------------------|-------|-----------|-------|
| Material: Ladrillo panelón + enlucido | | | |
| Temperatura del aire exterior | | | |
| Día | Ta | Día | Ta |
| 1 | 16,64 | 15 | 14,89 |
| 2 | 15,74 | 16 | 15,13 |
| 3 | 17,02 | 17 | 13,87 |
| 4 | 17,07 | 18 | 15,18 |
| 5 | 15,35 | 19 | 14,9 |
| 6 | 14,9 | 20 | 15,02 |
| 7 | 16,26 | 21 | 15,7 |
| 8 | 16,48 | 22 | 13,38 |
| 9 | 17,31 | 23 | 15,23 |
| 10 | 16,61 | 24 | 15,72 |
| 11 | 16,11 | 25 | 14,65 |
| 12 | 16,27 | 26 | 14,52 |
| 13 | 15,89 | 27 | 13,84 |
| 14 | 14,88 | 28 | 14,47 |

A1.2.1 Definición del día promedio

Tabla 6.4: DEFINICIÓN DEL DÍA PROMEDIO

| Día de análisis: 9-feb | | | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|
| Material: Ladrillo panelón + enlucido | | | |
| Temperatura del aire exterior | | | |
| Hora: | Ta | Hora: | Ta |
| 1:00 | 15,25 | 13:00 | 21,75 |
| 2:00 | 15 | 14:00 | 22,15 |
| 3:00 | 15 | 15:00 | 22,05 |
| 4:00 | 14,25 | 16:00 | 20,5 |
| 5:00 | 14 | 17:00 | 19,85 |
| 6:00 | 14 | 18:00 | 19,95 |
| 7:00 | 13,25 | 19:00 | 19,25 |
| 8:00 | 13,3 | 20:00 | 18,25 |
| 9:00 | 15,35 | 21:00 | 16,5 |
| 10:00 | 17,5 | 22:00 | 16 |
| 11:00 | 19,8 | 23:00 | 16 |
| 12:00 | 20,85 | 23:59 | 16 |

Anexo 2: Simulaciones en el impacto de la temperatura

A2.1 Simulaciones en el impacto de la temperatura en el modelo base

A2.1.1 Simulaciones en el impacto de la temperatura en el día frío

Tabla 6.5: TEMPERATURA EN EL DÍA FRÍO

| MODELO BASE | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------|-----------|--|
| Día de análisis: | 11-ago | | | | | |
| Material: | Ladrillo panelón + enlucido | | | | | |
| Hora: | Temperatura del aire exterior | Temperatura del aire interior | | Radiación Solar (kW/m2) | | |
| | Ta | Tai (E) | Tai (O) | RS_directa | RS_difusa | |
| 1:00 | 11,77 | 17,75 | 17,39 | 0 | 0 | |
| 2:00 | 10,98 | 17,07 | 16,74 | 0 | 0 | |
| 3:00 | 10,6 | 16,52 | 16,22 | 0 | 0 | |
| 4:00 | 10,2 | 15,97 | 15,69 | 0 | 0 | |
| 5:00 | 9,88 | 15,45 | 15,2 | 0 | 0 | |
| 6:00 | 9,5 | 15,05 | 14,81 | 0 | 0 | |
| 7:00 | 8,35 | 15,04 | 14,57 | 0,12 | 0,01 | |
| 8:00 | 7,85 | 16,25 | 14,86 | 0,38 | 0,06 | |
| 9:00 | 7,95 | 16,45 | 15,14 | 0,22 | 0,13 | |
| 10:00 | 8,75 | 18,32 | 16,4 | 0,54 | 0,13 | |
| 11:00 | 10,5 | 20,66 | 18,74 | 0,63 | 0,2 | |
| 12:00 | 14 | 22,11 | 20,43 | 0,29 | 0,41 | |
| 13:00 | 16,5 | 22,71 | 21,12 | 0,18 | 0,49 | |
| 14:00 | 19,25 | 23,79 | 22,39 | 0,27 | 0,42 | |
| 15:00 | 20,75 | 24,52 | 23,58 | 0,42 | 0,24 | |
| 16:00 | 20,25 | 24,07 | 23,47 | 0,23 | 0,27 | |
| 17:00 | 20,75 | 23,5 | 23,03 | 0,1 | 0,21 | |
| 18:00 | 20,25 | 22,85 | 22,42 | 0,03 | 0,1 | |
| 19:00 | 20 | 22,18 | 21,57 | 0 | 0 | |
| 20:00 | 17,3 | 21,12 | 20,53 | 0 | 0 | |
| 21:00 | 16,1 | 20,39 | 19,81 | 0 | 0 | |
| 22:00 | 14,5 | 19,66 | 19,18 | 0 | 0 | |
| 23:00 | 14 | 19,14 | 18,7 | 0 | 0 | |
| 23:59 | 13,63 | 18,62 | 18,22 | 0 | 0 | |

A2.1.2 Simulaciones en el impacto de la temperatura en el día frío

Tabla 6.6: TEMPERATURA EN EL DÍA PROMEDIO

| MODELO BASE | | | | | | |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------|-----------|--|
| Día de análisis: | 9-feb | | | | | |
| Material: | Ladrillo panelón + enlucido | | | | | |
| Hora: | Temperatura del aire exterior | Temperatura del aire interior | | Radiación Solar (kW/m2) | | |
| | Ta | Tai (E) | Tai (O) | RS_directa | RS_difusa | |
| 1:00 | 15,25 | 20,43 | 20,91 | 0 | 0 | |
| 2:00 | 15 | 19,99 | 20,44 | 0 | 0 | |
| 3:00 | 15 | 19,64 | 20,05 | 0 | 0 | |
| 4:00 | 14,25 | 19,2 | 19,57 | 0 | 0 | |
| 5:00 | 14 | 18,72 | 19,07 | 0 | 0 | |
| 6:00 | 14 | 18,34 | 18,65 | 0 | 0 | |
| 7:00 | 13,25 | 18,3 | 18,34 | 0,12 | 0,01 | |
| 8:00 | 13,3 | 20,08 | 18,81 | 0,55 | 0,04 | |
| 9:00 | 15,35 | 22,5 | 20,38 | 0,8 | 0,06 | |
| 10:00 | 17,5 | 24,7 | 22,59 | 0,76 | 0,14 | |
| 11:00 | 19,8 | 25,41 | 23,87 | 0,25 | 0,35 | |
| 12:00 | 20,85 | 25,25 | 24,05 | 0,08 | 0,4 | |
| 13:00 | 21,75 | 25,8 | 24,78 | 0,13 | 0,52 | |
| 14:00 | 22,15 | 26,17 | 25,34 | 0,07 | 0,47 | |
| 15:00 | 22,05 | 25,93 | 25,27 | 0,06 | 0,37 | |
| 16:00 | 20,5 | 25,49 | 25,12 | 0,13 | 0,33 | |
| 17:00 | 19,85 | 25,21 | 25,43 | 0,3 | 0,21 | |
| 18:00 | 19,95 | 24,95 | 25,97 | 0,38 | 0,12 | |
| 19:00 | 19,25 | 23,95 | 24,76 | 0,09 | 0,03 | |
| 20:00 | 18,25 | 22,95 | 23,6 | 0 | 0 | |
| 21:00 | 16,5 | 22,14 | 22,75 | 0 | 0 | |
| 22:00 | 16 | 21,59 | 22,2 | 0 | 0 | |
| 23:00 | 16 | 21,21 | 21,79 | 0 | 0 | |
| 23:59 | 16 | 20,87 | 21,41 | 0 | 0 | |

A2.2 Simulaciones en el impacto de la temperatura de las variables morfológicas (día frío)

A2.2.1 Simulaciones en un muro de adobe, tapial y ladrillo, con orientación ESTE y OESTE, durante un día frío.

Tabla 6.7: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ADOBE | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 18,72 | 18,58 | 18,36 | 18,31 | 17,98 | 17,75 |
| 2:00 | 18,06 | 18 | 17,81 | 17,66 | 17,45 | 17,24 |
| 3:00 | 17,52 | 17,54 | 17,39 | 17,16 | 17,03 | 16,85 |
| 4:00 | 16,98 | 17,08 | 16,97 | 16,65 | 16,61 | 16,46 |
| 5:00 | 16,48 | 16,65 | 16,57 | 16,17 | 16,21 | 16,09 |
| 6:00 | 16,07 | 16,31 | 16,27 | 15,79 | 15,9 | 15,81 |
| 7:00 | 15,94 | 16,24 | 16,21 | 15,53 | 15,72 | 15,67 |
| 8:00 | 16,73 | 17,01 | 16,96 | 15,8 | 16,07 | 16,05 |
| 9:00 | 16,97 | 17,22 | 17,2 | 16,01 | 16,34 | 16,35 |
| 10:00 | 18,52 | 18,59 | 18,54 | 17,11 | 17,44 | 17,46 |
| 11:00 | 20,86 | 20,78 | 20,7 | 19,34 | 19,6 | 19,61 |
| 12:00 | 22,37 | 22,15 | 22,03 | 20,89 | 21,06 | 21,02 |
| 13:00 | 23,02 | 22,65 | 22,51 | 21,52 | 21,61 | 21,54 |
| 14:00 | 24,07 | 23,62 | 23,43 | 22,65 | 22,62 | 22,53 |
| 15:00 | 24,85 | 24,32 | 24,09 | 23,71 | 23,52 | 23,39 |
| 16:00 | 24,52 | 23,87 | 23,64 | 23,51 | 23,2 | 23,04 |
| 17:00 | 24,1 | 23,38 | 23,11 | 23,23 | 22,72 | 22,55 |
| 18:00 | 23,57 | 22,82 | 22,52 | 22,83 | 22,1 | 21,91 |
| 19:00 | 23,01 | 22,3 | 21,99 | 22,3 | 21,42 | 21,19 |
| 20:00 | 22,05 | 21,38 | 21,06 | 21,36 | 20,47 | 20,22 |
| 21:00 | 21,33 | 20,78 | 20,47 | 20,7 | 19,93 | 19,67 |
| 22:00 | 20,63 | 20,19 | 19,89 | 20,06 | 19,41 | 19,15 |
| 23:00 | 20,11 | 19,78 | 19,5 | 19,61 | 19,06 | 18,8 |
| 23:59 | 19,58 | 19,35 | 19,1 | 19,11 | 18,7 | 18,44 |

Tabla 6.8: SIMULACIONES EN UN MURO DE TAPIAL.

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TAPIAL | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 18,59 | 18,3 | 18,09 | 18,13 | 17,71 | 17,54 |
| 2:00 | 17,93 | 17,72 | 17,53 | 17,5 | 17,17 | 17,01 |
| 3:00 | 17,41 | 17,28 | 17,1 | 17,02 | 16,76 | 16,61 |
| 4:00 | 16,89 | 16,83 | 16,66 | 16,53 | 16,35 | 16,19 |
| 5:00 | 16,4 | 16,4 | 16,25 | 16,06 | 15,95 | 15,81 |
| 6:00 | 16 | 16,08 | 15,95 | 15,7 | 15,66 | 15,53 |
| 7:00 | 15,89 | 16,02 | 15,9 | 15,46 | 15,49 | 15,38 |
| 8:00 | 16,69 | 16,82 | 16,65 | 15,75 | 15,85 | 15,75 |
| 9:00 | 16,89 | 17,06 | 16,91 | 15,96 | 16,13 | 16,05 |
| 10:00 | 18,4 | 18,46 | 18,3 | 17,1 | 17,31 | 17,23 |
| 11:00 | 20,71 | 20,69 | 20,53 | 19,35 | 19,55 | 19,47 |
| 12:00 | 22,19 | 22,06 | 21,9 | 20,9 | 21,01 | 20,91 |
| 13:00 | 22,8 | 22,56 | 22,39 | 21,52 | 21,56 | 21,44 |
| 14:00 | 23,84 | 23,51 | 23,33 | 22,61 | 22,6 | 22,44 |
| 15:00 | 24,61 | 24,19 | 24 | 23,63 | 23,51 | 23,33 |
| 16:00 | 24,26 | 23,74 | 23,55 | 23,39 | 23,18 | 22,99 |
| 17:00 | 23,82 | 23,21 | 23,02 | 22,99 | 22,68 | 22,5 |
| 18:00 | 23,28 | 22,62 | 22,41 | 22,49 | 22,01 | 21,85 |
| 19:00 | 22,73 | 22,07 | 21,86 | 21,94 | 21,26 | 21,12 |
| 20:00 | 21,78 | 21,12 | 20,89 | 20,98 | 20,25 | 20,12 |
| 21:00 | 21,1 | 20,5 | 20,27 | 20,37 | 19,68 | 19,54 |
| 22:00 | 20,43 | 19,9 | 19,69 | 19,78 | 19,14 | 18,99 |
| 23:00 | 19,95 | 19,48 | 19,27 | 19,37 | 18,79 | 18,64 |
| 23:59 | 19,42 | 19,06 | 18,84 | 18,91 | 18,41 | 18,24 |

Tabla 6.9: SIMULACIONES EN UN MURO DE LADRILLO,

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| LADRILLO | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 18,59 | 18,32 | 18,11 | 18,14 | 17,72 | 17,55 |
| 2:00 | 17,94 | 17,74 | 17,55 | 17,51 | 17,19 | 17,02 |
| 3:00 | 17,42 | 17,3 | 17,11 | 17,03 | 16,78 | 16,62 |
| 4:00 | 16,89 | 16,84 | 16,68 | 16,53 | 16,36 | 16,21 |
| 5:00 | 16,4 | 16,42 | 16,27 | 16,07 | 15,97 | 15,83 |
| 6:00 | 16 | 16,09 | 15,97 | 15,7 | 15,67 | 15,54 |
| 7:00 | 15,89 | 16,03 | 15,91 | 15,46 | 15,51 | 15,39 |
| 8:00 | 16,68 | 16,83 | 16,67 | 15,74 | 15,87 | 15,77 |
| 9:00 | 16,89 | 17,07 | 16,93 | 15,98 | 16,15 | 16,06 |
| 10:00 | 18,4 | 18,47 | 18,31 | 17,1 | 17,32 | 17,24 |
| 11:00 | 20,71 | 20,69 | 20,53 | 19,35 | 19,55 | 19,48 |
| 12:00 | 22,2 | 22,06 | 21,91 | 20,9 | 21,02 | 20,91 |
| 13:00 | 22,81 | 22,56 | 22,4 | 21,51 | 21,57 | 21,44 |
| 14:00 | 23,85 | 23,51 | 23,34 | 22,61 | 22,6 | 22,44 |
| 15:00 | 24,63 | 24,2 | 24,01 | 23,63 | 23,51 | 23,33 |
| 16:00 | 24,28 | 23,75 | 23,56 | 23,4 | 23,18 | 22,99 |
| 17:00 | 23,84 | 23,21 | 23,02 | 23 | 22,68 | 22,5 |
| 18:00 | 23,31 | 22,62 | 22,41 | 22,52 | 22,01 | 21,86 |
| 19:00 | 22,75 | 22,07 | 21,87 | 21,96 | 21,26 | 21,12 |
| 20:00 | 21,81 | 21,14 | 20,9 | 21,01 | 20,26 | 20,12 |
| 21:00 | 21,12 | 20,51 | 20,28 | 20,4 | 19,69 | 19,55 |
| 22:00 | 20,44 | 19,92 | 19,7 | 19,8 | 19,15 | 19 |
| 23:00 | 19,96 | 19,5 | 19,28 | 19,39 | 18,81 | 18,65 |
| 23:59 | 19,43 | 19,08 | 18,86 | 18,92 | 18,42 | 18,25 |

A2.3 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables morfológicas (día promedio)

A2.3.1 Simulaciones en un muro de adobe, tapial y ladrillo, con orientación ESTE y OESTE, durante un día promedio

Tabla 6.10: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ADOBE | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 21,62 | 21,52 | 21,22 | 22 | 21,59 | 21,28 |
| 2:00 | 21,18 | 21,16 | 20,91 | 21,52 | 21,24 | 20,94 |
| 3:00 | 20,8 | 20,88 | 20,66 | 21,13 | 20,94 | 20,68 |
| 4:00 | 20,36 | 20,5 | 20,33 | 20,65 | 20,57 | 20,34 |
| 5:00 | 19,87 | 20,09 | 19,96 | 20,16 | 20,15 | 19,96 |
| 6:00 | 19,46 | 19,75 | 19,66 | 19,73 | 19,8 | 19,65 |
| 7:00 | 19,3 | 19,63 | 19,57 | 19,41 | 19,56 | 19,43 |
| 8:00 | 20,46 | 20,76 | 20,65 | 19,82 | 20,08 | 19,99 |
| 9:00 | 22,43 | 22,56 | 22,39 | 21,23 | 21,52 | 21,45 |
| 10:00 | 24,54 | 24,45 | 24,26 | 23,33 | 23,51 | 23,43 |
| 11:00 | 25,59 | 25,28 | 25,1 | 24,45 | 24,58 | 24,48 |
| 12:00 | 25,72 | 25,11 | 24,92 | 24,56 | 24,62 | 24,52 |
| 13:00 | 26,32 | 25,57 | 25,34 | 25,2 | 25,2 | 25,08 |
| 14:00 | 26,74 | 25,9 | 25,62 | 25,67 | 25,58 | 25,45 |
| 15:00 | 26,64 | 25,72 | 25,39 | 25,6 | 25,42 | 25,28 |
| 16:00 | 26,38 | 25,39 | 25,02 | 25,47 | 25,14 | 24,99 |
| 17:00 | 26,25 | 25,27 | 24,86 | 25,72 | 25,24 | 25,05 |
| 18:00 | 26,09 | 25,13 | 24,68 | 26,03 | 25,36 | 25,12 |
| 19:00 | 25,28 | 24,33 | 23,86 | 25,44 | 24,47 | 24,22 |
| 20:00 | 24,27 | 23,53 | 23,1 | 24,54 | 23,56 | 23,3 |
| 21:00 | 23,42 | 22,81 | 22,4 | 23,8 | 22,87 | 22,59 |
| 22:00 | 22,83 | 22,38 | 22 | 23,25 | 22,46 | 22,16 |
| 23:00 | 22,44 | 22,12 | 21,76 | 22,84 | 22,19 | 21,87 |
| 23:59 | 22,09 | 21,89 | 21,56 | 22,48 | 21,96 | 21,64 |

Tabla 6.11: SIMULACIONES EN UN MURO DE TAPIAL

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| TAPIAL | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 21,45 | 21,14 | 20,84 | 21,77 | 21,24 | 21,01 |
| 2:00 | 21,03 | 20,8 | 20,51 | 21,32 | 20,89 | 20,66 |
| 3:00 | 20,68 | 20,54 | 20,26 | 20,96 | 20,61 | 20,38 |
| 4:00 | 20,24 | 20,18 | 19,93 | 20,51 | 20,25 | 20,02 |
| 5:00 | 19,77 | 19,79 | 19,56 | 20,02 | 19,84 | 19,62 |
| 6:00 | 19,38 | 19,46 | 19,26 | 19,61 | 19,51 | 19,3 |
| 7:00 | 19,23 | 19,37 | 19,17 | 19,31 | 19,28 | 19,09 |
| 8:00 | 20,41 | 20,53 | 20,28 | 19,77 | 19,82 | 19,64 |
| 9:00 | 22,37 | 22,39 | 22,09 | 21,19 | 21,32 | 21,15 |
| 10:00 | 24,4 | 24,32 | 24,02 | 23,31 | 23,37 | 23,2 |
| 11:00 | 25,32 | 25,17 | 24,9 | 24,44 | 24,46 | 24,29 |
| 12:00 | 25,32 | 24,97 | 24,74 | 24,53 | 24,54 | 24,36 |
| 13:00 | 25,91 | 25,4 | 25,17 | 25,15 | 25,12 | 24,94 |
| 14:00 | 26,33 | 25,69 | 25,45 | 25,6 | 25,52 | 25,32 |
| 15:00 | 26,22 | 25,47 | 25,22 | 25,49 | 25,35 | 25,16 |
| 16:00 | 25,94 | 25,09 | 24,84 | 25,29 | 25,06 | 24,88 |
| 17:00 | 25,82 | 24,92 | 24,66 | 25,49 | 25,14 | 24,94 |
| 18:00 | 25,67 | 24,74 | 24,46 | 25,73 | 25,25 | 25,02 |
| 19:00 | 24,85 | 23,9 | 23,59 | 24,95 | 24,3 | 24,1 |
| 20:00 | 23,9 | 23,11 | 22,81 | 24,04 | 23,33 | 23,15 |
| 21:00 | 23,11 | 22,38 | 22,08 | 23,34 | 22,59 | 22,42 |
| 22:00 | 22,57 | 21,97 | 21,66 | 22,87 | 22,14 | 21,96 |
| 23:00 | 22,21 | 21,71 | 21,4 | 22,54 | 21,85 | 21,65 |
| 23:59 | 21,89 | 21,49 | 21,19 | 22,22 | 21,61 | 21,39 |

Tabla 6.12: SIMULACIONES EN UN MURO DE LADRILLO.

| VARIABLES MORFOLÓGICAS | | | | | | |
|------------------------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| LADRILLO | | | | | | |
| Hora | Orientación | | | | | |
| | ESTE | | | OESTE | | |
| | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm | Tai_15cm | Tai_30cm | Tai_45cm |
| 1:00 | 21,46 | 21,17 | 20,86 | 21,79 | 21,26 | 21,02 |
| 2:00 | 21,04 | 20,83 | 20,53 | 21,34 | 20,91 | 20,67 |
| 3:00 | 20,68 | 20,56 | 20,28 | 20,97 | 20,63 | 20,39 |
| 4:00 | 20,25 | 20,2 | 19,95 | 20,51 | 20,27 | 20,04 |
| 5:00 | 19,77 | 19,81 | 19,58 | 20,03 | 19,86 | 19,64 |
| 6:00 | 19,38 | 19,48 | 19,28 | 19,62 | 19,53 | 19,32 |
| 7:00 | 19,23 | 19,38 | 19,19 | 19,31 | 19,29 | 19,11 |
| 8:00 | 20,41 | 20,55 | 20,3 | 19,77 | 19,84 | 19,66 |
| 9:00 | 22,36 | 22,4 | 22,1 | 21,18 | 21,33 | 21,17 |
| 10:00 | 24,4 | 24,33 | 24,03 | 23,31 | 23,38 | 23,21 |
| 11:00 | 25,34 | 25,17 | 24,91 | 24,43 | 24,47 | 24,3 |
| 12:00 | 25,34 | 24,97 | 24,75 | 24,53 | 24,54 | 24,37 |
| 13:00 | 25,94 | 25,41 | 25,18 | 25,15 | 25,12 | 24,95 |
| 14:00 | 26,36 | 25,7 | 25,46 | 25,6 | 25,52 | 25,33 |
| 15:00 | 26,25 | 25,48 | 25,23 | 25,49 | 25,35 | 25,17 |
| 16:00 | 25,97 | 25,11 | 24,85 | 25,3 | 25,06 | 24,88 |
| 17:00 | 25,85 | 24,94 | 24,67 | 25,5 | 25,14 | 24,95 |
| 18:00 | 25,7 | 24,76 | 24,47 | 25,75 | 25,25 | 25,03 |
| 19:00 | 24,89 | 23,93 | 23,61 | 24,99 | 24,3 | 24,11 |
| 20:00 | 23,92 | 23,14 | 22,83 | 24,08 | 23,34 | 23,16 |
| 21:00 | 23,13 | 22,41 | 22,09 | 23,37 | 22,6 | 22,43 |
| 22:00 | 22,59 | 21,99 | 21,68 | 22,9 | 22,16 | 21,97 |
| 23:00 | 22,23 | 21,73 | 21,42 | 22,56 | 21,87 | 21,66 |
| 23:59 | 21,91 | 21,52 | 21,21 | 22,24 | 21,63 | 21,41 |

A2.4 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables materiales (día frío)

A2.4.1 Simulaciones en el adobe, tapial y ladrillo de 15cm con orientación ESTE, durante un día frío

Tabla 6.13: SIMULACIONES EN EL ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO

| VARIABLES MATERIALES | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Hora | Orientación | | |
| | ESTE | | |
| | Tai_Adobe | Tai_Tapial | Tai_Ladrillo |
| 1:00 | 18,72 | 18,59 | 18,59 |
| 2:00 | 18,06 | 17,93 | 17,94 |
| 3:00 | 17,52 | 17,41 | 17,42 |
| 4:00 | 16,98 | 16,89 | 16,89 |
| 5:00 | 16,48 | 16,4 | 16,4 |
| 6:00 | 16,07 | 16 | 16 |
| 7:00 | 15,94 | 15,89 | 15,89 |
| 8:00 | 16,73 | 16,69 | 16,68 |
| 9:00 | 16,97 | 16,89 | 16,89 |
| 10:00 | 18,52 | 18,4 | 18,4 |
| 11:00 | 20,86 | 20,71 | 20,71 |
| 12:00 | 22,37 | 22,19 | 22,2 |
| 13:00 | 23,02 | 22,8 | 22,81 |
| 14:00 | 24,07 | 23,84 | 23,85 |
| 15:00 | 24,85 | 24,61 | 24,63 |
| 16:00 | 24,52 | 24,26 | 24,28 |
| 17:00 | 24,1 | 23,82 | 23,84 |
| 18:00 | 23,57 | 23,28 | 23,31 |
| 19:00 | 23,01 | 22,73 | 22,75 |
| 20:00 | 22,05 | 21,78 | 21,81 |
| 21:00 | 21,33 | 21,1 | 21,12 |
| 22:00 | 20,63 | 20,43 | 20,44 |
| 23:00 | 20,11 | 19,95 | 19,96 |
| 23:59 | 19,58 | 19,42 | 19,43 |

A2.5 Simulaciones del impacto de la temperatura de las variables materiales (día promedio)

A2.5.1 Simulaciones en un muro de adobe, tapial y ladrillo de 15cm con orientación ESTE, durante un día promedio

Tabla 6.14: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO DE 15CM

| VARIABLES MATERIALES | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
| Hora | Orientación | | |
| | ESTE | | |
| | Tai_Adobe | Tai_Tapial | Tai_Ladrillo |
| 1:00 | 21,62 | 21,45 | 21,46 |
| 2:00 | 21,18 | 21,03 | 21,04 |
| 3:00 | 20,8 | 20,68 | 20,68 |
| 4:00 | 20,36 | 20,24 | 20,25 |
| 5:00 | 19,87 | 19,77 | 19,77 |
| 6:00 | 19,46 | 19,38 | 19,38 |
| 7:00 | 19,3 | 19,23 | 19,23 |
| 8:00 | 20,46 | 20,41 | 20,41 |
| 9:00 | 22,43 | 22,37 | 22,36 |
| 10:00 | 24,54 | 24,4 | 24,4 |
| 11:00 | 25,59 | 25,32 | 25,34 |
| 12:00 | 25,72 | 25,32 | 25,34 |
| 13:00 | 26,32 | 25,91 | 25,94 |
| 14:00 | 26,74 | 26,33 | 26,36 |
| 15:00 | 26,64 | 26,22 | 26,25 |
| 16:00 | 26,38 | 25,94 | 25,97 |
| 17:00 | 26,25 | 25,82 | 25,85 |
| 18:00 | 26,09 | 25,67 | 25,7 |
| 19:00 | 25,28 | 24,85 | 24,89 |
| 20:00 | 24,27 | 23,9 | 23,92 |
| 21:00 | 23,42 | 23,11 | 23,13 |
| 22:00 | 22,83 | 22,57 | 22,59 |
| 23:00 | 22,44 | 22,21 | 22,23 |
| 23:59 | 22,09 | 21,89 | 21,91 |

A2.5.2 Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm de superficie color negro con orientación ESTE, durante un día frío y promedio

Tabla 6.15: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE SENCILLO DE 15CM VS UN MURO DE ADOBE DE 15CM

| VARIABLES MATERIALES | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Hora | Orientación (ESTE) | | | |
| | Día Frío | | Día Promedio | |
| | Tai_Adobe_Sencillo | Tai_Adobe + Sup. Color Negro | Tai_Adobe_Sencillo | Tai_Adobe + Sup. Color Negro |
| 1:00 | 18,72 | 18,73 | 21,62 | 21,63 |
| 2:00 | 18,06 | 18,07 | 21,18 | 21,19 |
| 3:00 | 17,52 | 17,53 | 20,8 | 20,82 |
| 4:00 | 16,98 | 17 | 20,36 | 20,37 |
| 5:00 | 16,48 | 16,49 | 19,87 | 19,88 |
| 6:00 | 16,07 | 16,08 | 19,46 | 19,47 |
| 7:00 | 15,94 | 15,95 | 19,3 | 19,31 |
| 8:00 | 16,73 | 16,73 | 20,46 | 20,46 |
| 9:00 | 16,97 | 16,97 | 22,43 | 22,41 |
| 10:00 | 18,52 | 18,5 | 24,54 | 24,51 |
| 11:00 | 20,86 | 20,83 | 25,59 | 25,56 |
| 12:00 | 22,37 | 22,34 | 25,72 | 25,69 |
| 13:00 | 23,02 | 23 | 26,32 | 26,3 |
| 14:00 | 24,07 | 24,05 | 26,74 | 26,72 |
| 15:00 | 24,85 | 24,83 | 26,64 | 26,63 |
| 16:00 | 24,52 | 24,51 | 26,38 | 26,37 |
| 17:00 | 24,1 | 24,09 | 26,25 | 26,25 |
| 18:00 | 23,57 | 23,57 | 26,09 | 26,09 |
| 19:00 | 23,01 | 23,02 | 25,28 | 25,29 |
| 20:00 | 22,05 | 22,06 | 24,27 | 24,28 |
| 21:00 | 21,33 | 21,34 | 23,42 | 23,44 |
| 22:00 | 20,63 | 20,64 | 22,83 | 22,85 |
| 23:00 | 20,11 | 20,14 | 22,44 | 22,45 |
| 23:59 | 19,58 | 19,59 | 22,09 | 22,1 |

A2.5.3 Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm de vidrio doble con orientación ESTE, durante un día frío y promedio

Tabla 6.16: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE SENCILLO DE 15CM VS UN MURO DE ADOBE DE 15CM DE VIDRIO DOBLE

| VARIABLES MATERIALES | | | | |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Orientación (ESTE) | | | | |
| Hora | Día Frío | | Día Promedio | |
| | Tai_Adobe_Sencillo | Tai_Adobe + Vidrio Doble | Tai_Adobe_Sencillo | Tai_Adobe + Vidrio Doble |
| 1:00 | 18,72 | 18,85 | 21,62 | 21,84 |
| 2:00 | 18,06 | 18,2 | 21,18 | 21,4 |
| 3:00 | 17,52 | 17,67 | 20,8 | 21,04 |
| 4:00 | 16,98 | 17,14 | 20,36 | 20,58 |
| 5:00 | 16,48 | 16,64 | 19,87 | 20,1 |
| 6:00 | 16,07 | 16,24 | 19,46 | 19,69 |
| 7:00 | 15,94 | 16,12 | 19,3 | 19,53 |
| 8:00 | 16,73 | 16,91 | 20,46 | 20,69 |
| 9:00 | 16,97 | 17,16 | 22,43 | 22,65 |
| 10:00 | 18,52 | 18,69 | 24,54 | 24,73 |
| 11:00 | 20,86 | 21,03 | 25,59 | 25,78 |
| 12:00 | 22,37 | 22,52 | 25,72 | 25,89 |
| 13:00 | 23,02 | 23,14 | 26,32 | 26,49 |
| 14:00 | 24,07 | 24,19 | 26,74 | 26,91 |
| 15:00 | 24,85 | 24,94 | 26,64 | 26,8 |
| 16:00 | 24,52 | 24,6 | 26,38 | 26,54 |
| 17:00 | 24,1 | 24,18 | 26,25 | 26,41 |
| 18:00 | 23,57 | 23,65 | 26,09 | 26,25 |
| 19:00 | 23,01 | 23,09 | 25,28 | 25,47 |
| 20:00 | 22,05 | 22,13 | 24,27 | 24,45 |
| 21:00 | 21,33 | 21,42 | 23,42 | 23,59 |
| 22:00 | 20,63 | 20,73 | 22,83 | 23,04 |
| 23:00 | 20,11 | 20,22 | 22,44 | 22,65 |
| 23:59 | 19,58 | 19,7 | 22,09 | 22,31 |

Anexo 3: Simulaciones en la demanda energética

A3.1 Simulaciones de la demanda energética en el modelo base, con orientación ESTE y OESTE, durante un año

Tabla 6.17: SIMULACIONES DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN EL MODELO BASE

| MODELO BASE | | |
|----------------------------|--------|--------|
| Periodo de análisis: ANUAL | | |
| Mes: | CE (E) | CE (O) |
| Enero | 56,89 | 49,89 |
| Febrero | 61,16 | 57,86 |
| Marzo | 97,78 | 89,86 |
| Abril | 67,18 | 60,01 |
| Mayo | 75,59 | 70,07 |
| Junio | 127,91 | 121,8 |
| Julio | 101,8 | 98,21 |
| Agosto | 79,32 | 75,92 |
| Septiembre | 76,42 | 75,33 |
| Octubre | 80,49 | 70,94 |
| Noviembre | 65,96 | 55,2 |
| Diciembre | 83,64 | 75,46 |

A3.2 Simulaciones de la demanda energética de las variables morfológicas (periodo anual)

A3.2.1 Simulaciones de la demanda energética en un muro de adobe de 15cm, con orientación ESTE y OESTE, durante un año.

Tabla 6.18: SIMULACIONES DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN MURO DE ADOBE DE 15CM, CON ORIENTACIÓN ESTE Y OESTE

| ADOBE | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| Periodo de análisis: ANUAL | | | | | | |
| MES | ESTE | | | OESTE | | |
| | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm |
| Enero | 33,36 | 35,28 | 35,29 | 29,09 | 31,3 | 31,36 |
| Febrero | 34,78 | 38,66 | 39,58 | 34,26 | 39,33 | 40,12 |
| Marzo | 60,7 | 70,24 | 72,59 | 53,53 | 64,28 | 67,86 |
| Abril | 43,07 | 45,77 | 46,84 | 36,53 | 39,68 | 43,36 |
| Mayo | 46,51 | 51,45 | 52,69 | 40,74 | 47,51 | 51 |
| Junio | 88,2 | 100,07 | 100,9 | 82,55 | 95,14 | 98,16 |
| Julio | 69,42 | 76,65 | 77,8 | 65,75 | 74,46 | 78,03 |
| Agosto | 50,59 | 55,69 | 57,05 | 48,2 | 54,24 | 57,35 |
| Septiembre | 48,33 | 52,96 | 54,34 | 47,8 | 53,64 | 55,77 |
| Octubre | 50,91 | 55,46 | 57,13 | 41,92 | 46,98 | 50,24 |
| Noviembre | 38,84 | 41,42 | 42,8 | 29,9 | 32,31 | 34,76 |
| Diciembre | 49,36 | 54,63 | 56,06 | 44,52 | 50,26 | 51,77 |

A3.2.1 Simulaciones de la demanda energética en un muro de adobe de 15cm, con orientación ESTE y OESTE, durante un año.

Tabla 6.19: SIMULACIONES DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN MURO DE TAPIAL DE 15CM, CON ORIENTACIÓN ESTE Y OESTE

| TAPIAL | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|---------|---------|--------------|---------|---------|
| Periodo de análisis: ANUAL | | | | | | |
| MES | ESTE | | | OESTE | | |
| | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm |
| Enero | 34,39 | 38,11 | 38,7 | 30,22 | 33,97 | 34,38 |
| Febrero | 36,15 | 41,91 | 43,39 | 35,67 | 42,03 | 42,89 |
| Marzo | 62,75 | 74,67 | 76,99 | 56,44 | 69,51 | 72,5 |
| Abril | 44,35 | 49,71 | 51,2 | 39,3 | 46,12 | 49,18 |
| Mayo | 47,97 | 55,2 | 56,83 | 43,46 | 52,93 | 55,87 |
| Junio | 89,99 | 103,61 | 104,66 | 85,53 | 100,52 | 103,23 |
| Julio | 70,98 | 80,71 | 81,87 | 68,74 | 80,65 | 83,18 |
| Agosto | 52,32 | 59,79 | 61,65 | 50,72 | 59,62 | 62,53 |
| Septiembre | 49,77 | 56,89 | 58,85 | 49,65 | 58,05 | 60,01 |
| Octubre | 52,62 | 59,95 | 61,9 | 44,48 | 52,64 | 55,63 |
| Noviembre | 40,3 | 45,45 | 47,46 | 31,96 | 37,2 | 39,8 |
| Diciembre | 50,96 | 58,74 | 60,82 | 46,5 | 54,29 | 55,91 |

A3.2.3 Simulaciones de la demanda energética en un muro de ladrillo de 15cm, con orientación ESTE y OESTE, durante un año.

Tabla 6.20: SIMULACIONES DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN MURO DE LADRILLO DE 15CM, CON ORIENTACIÓN ESTE Y OESTE

| LADRILLO | | | | | | |
|----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Periodo de análisis: ANUAL | | | | | | |
| MES | ESTE | | | OESTE | | |
| | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm | CE.15cm | CE.30cm | CE.45cm |
| Enero | 34,37 | 37,95 | 38,54 | 30,18 | 33,83 | 34,25 |
| Febrero | 36,1 | 41,71 | 43,21 | 35,6 | 41,89 | 42,78 |
| Marzo | 62,65 | 74,41 | 76,78 | 56,28 | 69,23 | 72,28 |
| Abril | 44,31 | 49,45 | 50,97 | 39,15 | 45,72 | 48,9 |
| Mayo | 47,91 | 54,98 | 56,63 | 43,31 | 52,63 | 55,65 |
| Junio | 89,92 | 103,42 | 104,49 | 85,38 | 100,22 | 103 |
| Julio | 70,92 | 80,46 | 81,67 | 68,56 | 80,29 | 82,94 |
| Agosto | 52,26 | 59,55 | 61,42 | 50,58 | 59,31 | 62,29 |
| Septiembre | 49,73 | 56,63 | 58,61 | 49,57 | 57,78 | 59,81 |
| Octubre | 52,56 | 59,69 | 61,67 | 44,34 | 52,3 | 55,37 |
| Noviembre | 40,26 | 45,2 | 47,23 | 31,87 | 36,92 | 39,56 |
| Diciembre | 50,91 | 58,51 | 60,59 | 46,4 | 54,07 | 55,73 |

A3.3 Simulaciones de la demanda energética de las variables materiales (periodo anual)

A3.3.1 Simulaciones de la demanda energética en un muro de adobe, tapial y ladrillo de 15cm con orientación OESTE, durante un periodo anual

Tabla 6.21: SIMULACIONES DE LA DEMANDA ENERGÉTICA EN UN MURO DE ADOBE, TAPIAL Y LADRILLO DE 15CM CON ORIENTACIÓN OESTE

| VARIABLES MATERIALES | | | |
|-----------------------------|--------------------|-----------|-------------|
| MES | Orientación | | |
| | OESTE | | |
| | CE_Adobe | CE_Tapial | CE_Ladrillo |
| Enero | 29,09 | 30,22 | 30,18 |
| Febrero | 34,26 | 35,67 | 35,6 |
| Marzo | 53,53 | 56,44 | 56,28 |
| Abril | 36,53 | 39,3 | 39,15 |
| Mayo | 40,74 | 43,46 | 43,31 |
| Junio | 82,55 | 85,53 | 85,38 |
| Julio | 65,75 | 68,74 | 68,56 |
| Agosto | 48,2 | 50,72 | 50,58 |
| Septiembre | 47,8 | 49,65 | 49,57 |
| Octubre | 41,92 | 44,48 | 44,34 |
| Noviembre | 29,9 | 31,96 | 31,87 |
| Diciembre | 44,52 | 46,5 | 46,4 |

A3.3.2 Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm de superficie color negro con orientación OESTE, durante un periodo anual

Tabla 6.22: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE SENCILLO DE 15CM VS UN MURO DE ADOBE DE 15CM

| VARIABLES MATERIALES | | |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| MES | Orientación (OESTE) | |
| | CE_Adobe_Sencillo | CE_Adobe + Sup. Color Negro |
| Enero | 29,09 | 26,82 |
| Febrero | 34,26 | 33 |
| Marzo | 53,53 | 53,25 |
| Abril | 36,53 | 36,11 |
| Mayo | 40,74 | 40,29 |
| Junio | 82,55 | 81,64 |
| Julio | 65,75 | 65,48 |
| Agosto | 48,2 | 47,21 |
| Septiembre | 47,8 | 45,98 |
| Octubre | 41,92 | 40,71 |
| Noviembre | 29,9 | 27,96 |
| Diciembre | 44,52 | 42,36 |

A3.3.3 Simulaciones en un muro de adobe sencillo de 15cm vs un muro de adobe de 15cm de vidrio doble con orientación OESTE, durante un periodo anual

Tabla 6.23: SIMULACIONES EN UN MURO DE ADOBE SENCILLO DE 15CM VS UN MURO DE ADOBE DE 15CM

| VARIABLES MATERIALES | | |
|----------------------|---------------------|-------------------------|
| MES | Orientación (OESTE) | |
| | CE_Adobe_Sencillo | CE_Adobe + Vidrio Doble |
| Enero | 29,09 | 27,54 |
| Febrero | 34,26 | 32,62 |
| Marzo | 53,53 | 50,63 |
| Abril | 36,53 | 34,74 |
| Mayo | 40,74 | 38,31 |
| Junio | 82,55 | 80,13 |
| Julio | 65,75 | 63,62 |
| Agosto | 48,2 | 46,2 |
| Septiembre | 47,8 | 45,97 |
| Octubre | 41,92 | 39,91 |
| Noviembre | 29,9 | 27,69 |
| Diciembre | 44,52 | 41,83 |

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, **Henry Marcelo Tenesaca Lojano** portador de la cédula de ciudadanía N°0106823552. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“SISTEMA PASIVO DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO: Evaluación morfológica y de materialidad mediante simulaciones digitales de un muro Trombe para la ciudad de Cuenca”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 04 de enero de 2021



F:
Henry Marcelo Tenesaca Lojano
0106823552