

**ENVOLVENTE VERTICAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
CONFORT TÉRMICO EN CLIMA CÁLIDO.
CASO: VIVIENDA SOCIAL EN CALI.**

Tesis presentada por:
HUGO FERNANDO ALEGRÍA LENIS

Ante la
Facultad de Artes Integradas
Maestría en Arquitectura y Urbanismo
Universidad del Valle

Para acceder al grado académico de:
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA Y URBANISMO

Dirección de tesis:
Doctor Arq. Walter Giraldo Castañeda

Santiago de Cali, 25 de febrero de 2022.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a:

A mis padres Álvaro y María, quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de voluntad y perseverancia. Motivándome para alcanzar mis anhelos. Mis hermanas Silvia Juliana y Mayra Alejandra por su cariño y comprensión, durante este proceso, por estar conmigo en todo momento, gracias. A mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas. A Jorge Alegría, quien apoyo con su espíritu alentador, contribuyo de forma incondicional a buscar y a lograr mis objetivos. Finalmente, quiero dedicar esta tesis a mis amigos, por apoyarme, por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias.

Agradecimientos

A la universidad del Valle, a la MAU que brindo el escenario para que estas inquietudes y búsquedas personales se manifestaran en este trabajo. A sus directivas, funcionarios y profesores de quienes recibí siempre un trato amable, así como una excelente formación académica.

A mi director de tesis Walter Giraldo Castañeda cuyo informe de investigación doctoral fue inspiración de la presente tesis, por las contribuciones y observaciones a mi trabajo, los cuales pudieron llevarlo a buen término.

A mis amigos, colegas y compañeros de maestría quienes siempre me impulsaron a dar lo mejor de mí mediante su ejemplo.

Resumen

La vivienda de interés social en Colombia, en especial la tipología multifamiliar se ha caracterizado por tener diseños inadecuados para las condiciones climáticas del Trópico Cálido. Como en la ciudad de Santiago de Cali en donde se ha documentado problemas de ventilación y de altas temperaturas interiores; producto de la distribución espacial, dimensiones reducidas, así como del diseño y materialidad de sus envolventes. Lo cual vuelve a estas viviendas térmicamente ineficientes.

Esta falta de confort térmico debido al excesivo calor al interior de las viviendas, deriva en un alto consumo energético a causa de la utilización de medios de climatización activa como los sistemas de aire acondicionado, afectando la economía de sus habitantes e incidiendo en el aumento de su huella de carbono con la producción de gases de efecto invernadero.

En la búsqueda de una solución a esta problemática, se planteó como objetivo el aumento de comodidad térmica en la vivienda social multifamiliar por medio de un prototipo de envolvente vertical para el clima cálido tropical, que permita un control pasivo de las ganancias térmicas en sus superficies, optimizando las condiciones internas de confort térmico en las viviendas en altura sin el uso de la climatización activa.

La investigación se dividió en dos partes; la primera en donde se propone una configuración de muro y la segunda en donde la propuesta es simulada dentro de un edificio multifamiliar estableciendo como métrica el porcentaje de mejora en confort térmico, su impacto económico y la huella de carbono durante su vida útil.

Usando la metodología simulación-experimental; se diseñaron y se construyeron las respectivas probetas mediante impresión 3D que posteriormente fueron probadas en cajas adiabáticas monitoreadas expuestas al ambiente y bajo el método de caja caliente conociendo su transmitancia térmica, la cual alimento la simulación computacional de un apartamento típico de interés social (VIS) en Santiago de Cali, también se elaboraron las líneas base conformadas por los tres sistemas constructivos más utilizados en la construcción de cerramientos este tipo

de viviendas como; la mampostería confinada (MC), la mampostería estructural (ME) y los sistemas industrializados de construcción en concreto (SI).

Al hacer una comparación entre la envolvente propuesta y las líneas base mencionadas se encontró que la envolvente disminuye en un 39.24% el porcentaje de personas insatisfechas PPD, tiene un retorno económico del 305% del valor de su implementación inicial en su vida útil en ahorros energéticos asociados al uso de sistemas de climatización activa y una reducción al partir del 60% de emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂.

Se recomiendan como estudios futuros seguir indagando en envolventes que hagan uso del plástico y de su empleo en una segunda vida un componente principal además de explorar las variables que no fueron tenidas en la presente investigación en cuenta cómo; la reflectancia solar, el comportamiento estructural, su mantenimiento, así como también como la acción del envejecimiento y pérdida de color en condiciones de ambiente exterior.

Palabras clave: trópico, Vivienda, Envolvente vertical, confort térmico, impresión

3d.

Contenido

Introducción	8
Antecedentes	12
Planteamiento Del Problema	15
Preguntas de Investigación	22
Hipótesis	23
Objetivos	24
Justificación.....	27
Alcances.....	34
Limitaciones	34
Marco Teórico	35
Estado Del Arte	42
Investigaciones Internacionales	42
Investigaciones Locales	46
Metodología	50
Capítulo I. Diseño de la Envolvente Opaca	57
Conceptualización	58
<i>La Idea</i>	60
Componentes de la Envolvente	64
Auto Sombreado (AS).....	65
Enfriamiento Evaporativo con Hidrogel	69
Aislamiento Reflectivo.....	71
Soporte	74
Fabricación Digital.....	76
Capítulo II. Ensayos Experimentales de Transmitancia Térmica Sobre un prototipo de Envolvente Opaca.....	81
Determinación de la Transmitancia Térmica del Prototipo: Método Caja Caliente	82
Objetivos de la Prueba.....	82
Diseño del Experimento	82
Capítulo III. Optimización del Confort Térmico en una Envolvente Vertical	91
Metodología	93
Software	94
Líneas Base	95
La Resolución 0549 de 2015.....	95
Doe/Ashare 55.....	97
Observaciones y Línea Base Propuesta	99

Datos Climáticos	105
Resultados de las líneas Base	109
Vivienda de Interés Social VIS.....	110
<i>Mampostería Estructural (ME)</i>	112
Discusión de Resultados.....	115
Observaciones	118
Capítulo IV. Análisis Económico e Impacto Ambiental	119
Análisis Costo Beneficio.....	120
Costos de Implementación.....	126
Impacto Ambiental.....	131
Análisis ACV	131
Resultados del ACV.....	133
Capítulo V. Conclusiones.....	136
En Relación a los Objetivos.....	137
<i>Objetivo principal: Desarrollar y evaluar un Prototipo de Envolvente para la optimización del confort térmico en la vivienda Social del clima cálido.</i>	137
<i>Objetivo Específico 1: Diseñar y Fabricar un Prototipo de Envolvente Opaca para el Clima Cálido Tropical.</i>	138
<i>Objetivo Específico 2: Determinar el Confort Térmico que un espacio (VIS) puede alcanzar con el prototipo de envolvente desarrollado.</i>	139
<i>Objetivo Específico 3: Evaluar la Relación Costo-Beneficio e Impacto Ambiental de la Solución Planteada Versus las Líneas Base y un Sistema de Climatización Activa</i>	140
Respuestas a las Preguntas de Investigación	141
En Relación a la Hipótesis.....	143
Aportes a la Disciplina	144
Trabajos Futuros	144
Bibliografía.....	147
Ilustraciones	163
ANEXOS	172
Anexo 1	172

Introducción

La presente tesis de investigación titulada Prototipo De Envolvente Opaca Para El Clima Cálido Tropical, se suscribe en el grupo de investigación AMSESTRA (Ambiente, Seguridad y Trabajo) del departamento de Tecnología de la Escuela de Arquitectura de la Universidad del Valle, Facultad de Artes Integradas en la línea de sustentabilidad, que forma parte de una de las seis líneas de exploración de este grupo académico.

La sostenibilidad en la arquitectura ha dejado de ser una estética, moda o lujo para convertirse en necesaria para nuestra permanencia frente al cambio climático, en especial en todo lo relacionado con la producción de gases de efecto invernadero impulsado por la actividad del hombre y la industria de la construcción. Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014), dicha industria aporta anualmente el 31 % de todas las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), de las cuales una gran parte se generan por el posterior uso de calefacción y refrigeración en espacios habitables, de manera que se hace imperativo garantizar una industria de baja huella de carbono.

Una de las estrategias para reducir los GEI es mejorar las condiciones de confort térmico en los espacios habitables por medios pasivos como el tratamiento de la envolvente (fachadas) en diseño y materialidad. Para alcanzar un mayor impacto es necesario llevar estas tecnologías a la vivienda social cuya tendencia de gasto energético se viene elevando con el paso de los años. De ahí que el enfoque de la presente tesis sea brindar una alternativa adicional de envolvente apostando a reducir la huella de carbono en este tipo de edificios.

La elaboración de la presente investigación surgió del interés personal por la intervención en la envolvente como estrategia bioclimática, y ahondar en los sistemas constructivos que vienen de la prefabricación y ensamblaje entre componentes. Durante el transcurso de la Maestría en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad del Valle, se ha desarrollado un especial interés en investigaciones sobre temas relacionados con la tecnología,

el confort térmico y la envolvente arquitectónica en relación con la vivienda social, la cual ha venido decayendo en calidad técnica y diseño en los últimos años, fortaleciendo la brecha de desigualdad.

Como herramienta auxiliar se propone la impresión 3D, como metodología en la construcción de los prototipos para la investigación. Primeramente, por curiosidad e interés en los métodos de fabricación aditiva, sus procesos, posibilidades y limitaciones. Así como también en la elaboración de prototipos de los cuales se pueda extraer información para realizar análisis energéticos más cercanos a la realidad.

En primer lugar, la investigación usa el aislamiento reflectivo (AR) como el núcleo del diseño de la envolvente y principal componente misma, y adicionalmente se tienen en cuenta trabajos como el de Giraldo C. 2018, que destaca las ventajas de este tipo de estrategias para climas tropicales como el de la ciudad de Cali, de altas humedades y temperaturas. Al combinar estos dos intereses; el aislamiento reflectivo como estrategia bioclimática en envolventes y la construcción de prototipos en escala real, como medio para obtener información mucho más detallada acerca del proceso de diseño de una envolvente, que responda a situaciones geográficas, económicas, climáticas, culturales, y tecnológicas, se persigue mejorar las condiciones de habitabilidad de los usuarios de las viviendas en un futuro.

Así que bajo la premisa de que toda persona tiene derecho a un buen diseño, a sentirse cómoda en el lugar que habita y al mismo tiempo contribuir a reducir los aportes de GEI (gases de efecto invernadero), se ha desarrollado el presente trabajo titulado Envolvente Vertical Para la optimización del confort térmico en clima cálido. caso: vivienda social en Cali. Este estudio se encuentra dividido en tres etapas; la primera etapa de diseño y construcción, la segunda etapa de pruebas en campo y simulación, y una tercera donde se corrobora su viabilidad económica y ambiental.

En esta introducción se presenta un índice comentado, seguidamente del marco teórico, y el planteamiento del problema de la insatisfacción térmica en la vivienda social, se continúa

con la hipótesis y preguntas de investigación, los objetivos, la justificación, el alcance, en donde se declara los aspectos que logrará la investigación en su delimitación espacial, conceptual y temporal, y finalmente describe de forma breve el estado del arte y la metodología propuesta.

En el primer capítulo titulado Diseño de la Envolvente Opaca, se describe la conceptualización, diseño y elaboración de la envolvente, identificando primero los requerimientos básicos que estas deben cumplir para alcanzar el confort térmico y se culmina con la fabricación del prototipo.

El segundo y tercer capítulo están orientados a obtener los datos de mejora de confort térmico que tendría este prototipo al aplicarse a un apartamento de 60 m² en la peor orientación solar posible. En el segundo capítulo se obtienen los datos experimentales de transmitancia y comportamiento térmico, mientras que en el tercer capítulo estos datos junto con la proyección del comportamiento climático en los próximos 60 años calibrarán la simulación computacional con lo que se obtendrán los datos de mejora en la comodidad térmica durante la vida útil de la edificación.

En el cuarto y último capítulo se lleva a cabo el análisis económico y ambiental, el cual se divide en dos partes; la primera en donde el prototipo y las líneas base se analizan bajo el análisis costo- beneficio en donde los costos asociados a su implementación y ahorros son llevados a valor presente neto, y una segunda parte en donde el prototipo y las líneas base son comparadas bajo un análisis de ciclo de vida con el fin de conocer su huella de carbono y consumo energético asociado. Esto con el fin de demostrar la pertinencia de la propuesta.

El cuerpo de la tesis es completado con las conclusiones, en donde se revisa nuevamente el proceso empleado y se sintetiza los resultados comparándolos con los objetivos buscados, así como también las limitaciones encontradas y se recomiendan los trabajos futuros.

Finalmente, la tesis termina con la bibliografía consultada, se encuentra con la sección de apéndices y referencias que se separa en 4 partes; la primera concierne a la bibliografía, la segunda es un índice de tablas, la tercera un índice de figuras y una cuarta de anexos.

Antecedentes

Las amenazas ambientales derivadas de la rápida urbanización y la escasez de energía asociada a los impactos negativos del cambio climático en la vida y la salud, han llevado a sectores gubernamentales y varios organismos profesionales enfocados en la construcción a reconocer la necesidad de desarrollar estrategias que conciban edificios resilientes al cambio climático. Como resultado, se ha observado un interés creciente en el desarrollo de soluciones efectivas para mejorar el rendimiento energético sostenible de la edificación.

Para alcanzar este equilibrio el clima desempeña un papel vital, ya que su comprensión es un elemento determinante en el proceso de diseño y en la búsqueda de las mejores condiciones de comodidad térmica. A su vez, es uno de los factores que inciden en el consumo energético, lo cual es especialmente importante en zonas como el trópico, que concentra más de la mitad de la población mundial, en donde según la ONU la proporción de población urbana que vive en barrios vulnerables es mayor que en otras latitudes.

Entre las principales características y desafíos del trópico de acuerdo Wong & Yu (2008) se encuentran su alta radiación solar, en especial la radiación difusa debido a la alta nubosidad de la zona, las humedades y temperaturas relativamente altas. Si bien estas condiciones pueden ser cambiantes con la topografía y la altitud, son estos ambientes los que predominan. Por último, sus dos estaciones; una seca en donde se pueden presentar sequías y una lluviosa en donde se presentan grandes precipitaciones, suelen ser un problema en las áreas pobladas debido a su baja permeabilidad y abundancia de zonas duras.

Sin embargo, alberga el 70 % de la biodiversidad de la tierra, ocupa el 20 % de la tierra emergida, representando el 40 % de tierra útil para el ser humano, esto sumado a su humedad y relación con el sol que logra mantener una temperatura media entre los 18 °C y los 38 °C, la convierten en la región más agradable para vivir. Para el año 2050 la ONU espera que en los trópicos vivan la mayor parte de la población del planeta y 2 tercios de la población infantil.

Considerando lo anteriormente mencionado y teniendo en cuenta que la variabilidad climática del trópico se da en función de la altitud, puede afirmarse que sus habitantes son más susceptibles al cambio climático, y como lo afirma Mora et al. (2013) será esta zona la que primero experimente las consecuencias, superando los límites históricos de temperaturas máximas. En el mismo sentido, en el Informe sobre el Estado de los Trópicos (2014) argumenta que el cambio climático y la acidificación de los océanos podrán derivar en la extinción masiva de especies y el colapso de ecosistemas, así como la presencia de mayor aridez que tendrá un impacto indudable en los recursos hídricos y económicos de las comunidades que habiten esas áreas.

Esto es especialmente cierto para el país, como lo indican Rubiano Martín (2016) y CVC et al. (2016), ya que Colombia posee un 80 % de su territorio en estas condiciones cálidas con temperaturas promedio superiores a 24 °C, específicamente un 60.54 % que corresponde al clima cálido húmedo, el cual es un tipo de clima proclive a favorecer un mayor consumo de energía por la climatización activa de edificios.

Una de las medidas del Ministerio de Vivienda de Colombia para la mitigación del cambio climático son la construcción sostenible. Normativamente, estas construcciones se rigen bajo el Decreto 1285 de 2015, la Resolución 0549 de 2015 y el Anexo 1 de dicha resolución, que presenta una guía para el ahorro de agua y energía sostenible en edificaciones. Si bien el Estado colombiano ha realizado esfuerzos en exenciones de impuestos y alianzas público-privadas con líneas de crédito especiales, no son lo suficientemente contundentes en lo que refiere a la vivienda social.

Desde el 2011 estudios como los de Gamboa, Posillo, Herrera, Lopez, & Iglesias, subrayan las deficiencias de comodidad térmica en las viviendas en la ciudad de Cali con datos tomados en sitio y con la realización de encuestas entre sus habitantes. Giraldo, Bedoya, & Alonso (2015) en su ponencia demuestran que la vivienda social en altura presenta durante 10 meses temperaturas que se encuentran fuera de la zona de confort. Sin embargo, es posible

mejorar la eficiencia energética de la misma por medio de pequeñas modificaciones a su fachada y cubiertas.

Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2018) evaluaron y sugirieron materiales para la envolvente consecuente con el cambio climático, y con las condiciones de confort térmico y lumínico en la vivienda social en Soacha. Su trabajo condujo a que los materiales tradicionales se comportaban bien para las condiciones de frío, sin embargo, recomendaban su revisión para los climas calurosos. Giraldo C. (2018) plantea la mejora de la comodidad térmica con intervención en la envolvente vertical, no sin antes concluir que al igual que la bibliografía estudiada, sus evaluaciones en campo arrojaron que la vivienda social para el caso de la ciudad de Cali es inconfortable.

Serje Martínez (2018) por su parte evaluó en términos de eficiencia energética un caso de vivienda social en Barranquilla en donde concluye que en lo que respecta a la eficiencia del diseño se obtienen temperaturas interiores por encima del clima exterior, señala además que esto es una desventaja de la VIS, que se debe a la alta conductividad de los materiales de la envolvente, la falta de planificación en la ventilación en su estructura, las ganancias de calor por infiltración, y el desprovisto control solar.

Latha, Darshana, & Venugopal (2015) hacen una revisión de la literatura acerca de la importancia de la materialidad en la comodidad térmica en climas tropicales, concluyendo la necesidad de incursionar en nuevas ideas en el uso de los materiales de construcción para mitigar los riesgos que las condiciones térmicas producto del cambio climático puedan tener sobre la comunidad. Aksamija (2015) analiza los métodos de diseño para fachadas de alto desempeño energético, diferenciados por tipo de clima, así como los diferentes tipos de análisis computacional que asisten este proceso como el modelado energético, el estudio solar, el análisis de transferencia de calor y los modelos de confort térmico.

Los antecedentes presentados muestran la importancia de la envolvente como tema de estudio y ofrecen un contexto general al siguiente apartado. En donde se desarrolla el planteamiento del problema que sirve como punto de partida y guía sobre la solución propuesta.

Planteamiento Del Problema

La insatisfacción térmica en la vivienda de interés social ha sido documentada en trabajos como los de Giraldo C. (2018) en donde expone que la VIS¹ no brinda un adecuado confort térmico a sus habitantes, teniendo como una de las principales causas la falta de recursos económicos de sus promotores y propietarios finales, o Varini (2016), quien pone en manifiesto que este problema se presenta en el 80% del territorio colombiano, en donde las humedades y altas temperaturas son el común denominador.

El presente trabajo pretende contribuir a la discusión sobre el desarrollo de envolventes y sistemas constructivos que sean acordes con las condiciones climáticas y ambientales del trópico. En este caso específico para la ciudad de Santiago de Cali, que presenta climas calurosos durante todo el año o gran parte de él.

De acuerdo a C. Giraldo et al. (2015) en la vivienda social se ha priorizado la masificación sobre el confort térmico y la sostenibilidad a lo largo de su vida útil (ver ilustración 1). Bodach & Hamhaber (2010) Por su parte, lo atribuyen a la falta de la disponibilidad en la inversión adicional necesaria para la implementación de medidas de eficiencia energética, coincidiendo con Serje Martínez (2018), cuando enfatiza la escasa implementación de estrategias para la mitigación de la radiación en la vivienda social, lo cual según el autor le confieren desventajas como alta conductividad de los materiales en su envolvente, la falta de planificación en la ventilación de su estructura y el desprovisto control solar.

¹ *Vivienda de Interés Social.*



Ilustración 1. La vivienda social se ha priorizado la masificación sobre el confort térmico y la sostenibilidad a lo largo de su vida útil. Sistemas industrializados en concreto. Fuente: iStock.

Todos los aspectos mencionados minimizan el confort y las condiciones de salubridad de las viviendas, impactando en la calidad de vida de sus habitantes. Campbell-Lendrum & Corvalán (2007) insisten en que el rápido desarrollo económico y la urbanización en las ciudades hacen que las personas que habiten viviendas serán vulnerables a riesgos en su salud derivados del cambio climático y al mismo tiempo contribuirán a la problemática, cuando incrementen el gasto energético para satisfacer su demanda de comodidad térmica. Por lo que es necesario un nuevo modelo de vivienda, en palabras de Arturo & Gonz (2017) que se caracterice por minimizar los riesgos futuros de eventos naturales conservando la capacidad de responder al cambio climático.

Como segunda problemática Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2019) demuestra que la vivienda social en Colombia presenta deficiencias asociadas a la selección y el uso de materialidades para la envolvente consecuente con el cambio climático y las condiciones de confort térmico y lumínico (ver ilustración 2). A pesar que la envolvente, como afirma Alonso, Oteiza, & Navarro (2009) hace parte del 10-50% del costo total de la construcción, aporta el 14-17% de la masa total del material y el 20-30% de la ganancia total de calor. Y que según Utama & Gheewala (2009) y Giraldo C. (2018), la envolvente vertical para la vivienda multifamiliar en altura en climas tropicales sigue sin indagarse a profundidad.



Ilustración 2. Imágenes térmicas del interior de una VIS construida con sistema industrializado en concreto, en donde se puede apreciar las ganancias de calor en la fachada. Fuente Barona (2016).

De acuerdo con CEED (2019) el censo de edificaciones de las viviendas en Colombia, cuya gráfica se aprecia en la ilustración 3. El sistema constructivo más empleado para VIS y No VIS es la mampostería confinada, especialmente en las ciudades de Bogotá, Medellín y Bucaramanga, donde representa un 71.52 %, seguida por el sistema industrializado y la mampostería estructural respectivamente. Los autores Wong & Yu (2008) hablan de la poca importancia que le han dado la ingeniería y la arquitectura al clima extremo que se puede dar

en los trópicos, usando sistemas constructivos que no tienen en cuenta la ubicación geográfica o las condiciones climáticas en donde se emplaza.



Ilustración 3. Sistemas constructivos en el mercado de Vivienda en 2019. Fuente: tomado de Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE (2019).

Como consecuencia, una falta de confort producto de una alta ganancia térmica al interior de esas viviendas. Investigaciones como las de W. Giraldo & Herrera (2017) demostraron a través de la simulación experimental que una habitación típica de vivienda de interés social (VIS) en nuestro clima ecuatorial cálido seco no alcanza las condiciones mínimas de confort térmico; y que, además al mediodía son prácticamente inhabitables. Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2019) por su parte concluyen que los materiales de la VIS en Colombia que aportan al comportamiento térmico y lumínico deben indagarse en condiciones de clima caluroso.

Estos autores no fueron los únicos en corroborar estas ganancias de calor al interior de la vivienda, autores como Barona (2016), en estudios sobre lugares como Candelaria y Jamundí, aledaños a Cali y que comparten características climáticas, estimaron que un 95.3% de los ocupantes de las viviendas monitoreadas se encuentran en insatisfacción térmica. Varini (2016a) por su parte descubrió que este malestar ni siquiera podría ser mitigado por la ventilación natural, provocando una condición permanente de ausencia de comodidad térmica, especialmente en horas de la tarde, afectando su calidad de vida y productividad.

Como tercera y última problemática está el crecimiento en las unidades de vivienda, el DANE (2020) en el primer trimestre de 2019 censó un total de 19.471.068 m² entre las modalidades de vivienda unifamiliar y multifamiliar (ver ilustración 4), de los cuales un 90% fueron en apartamentos y el 10 % en casas. Lo cual indica dos cosas; la primera una prevalencia de edificios sobre viviendas de un piso o dos y la segunda como indican C. Giraldo, Bedoya, & Alonso (2015) derivara en un consumo intenso de materiales y energía para la generación de viviendas, además del consumo de recursos durante la vida útil de estos inmuebles.

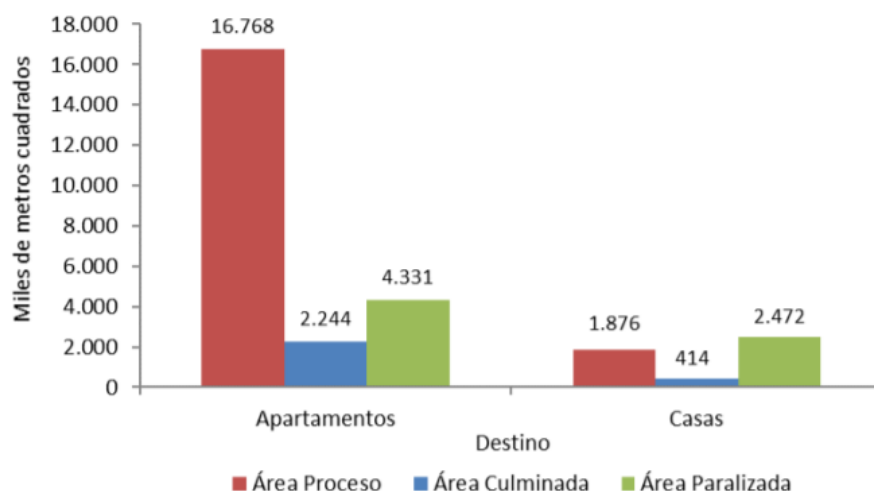


Ilustración 4. Metros cuadrados de Vivienda en Colombia en 2019. Fuente: tomado de Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas DANE (2020).

Es debido a la gran capacidad de ganancia de calor en sus fachadas, que los edificios en altura en especial los de viviendas que no cuentan con estrategias apropiadas para mitigar esta condición, que las envolventes verticales son un actor más a considerar en la creación de islas de calor, ya que su materialidad está avocada a retener el calor (ver ilustración 5). Los estudios Vásquez & Molina-Prieto (2018) demuestran una gran variación hasta de tres grados centígrados en la temperatura del aire de los espacios urbanos, y hasta de doce a partir de los materiales de la envolvente arquitectónica y urbana.

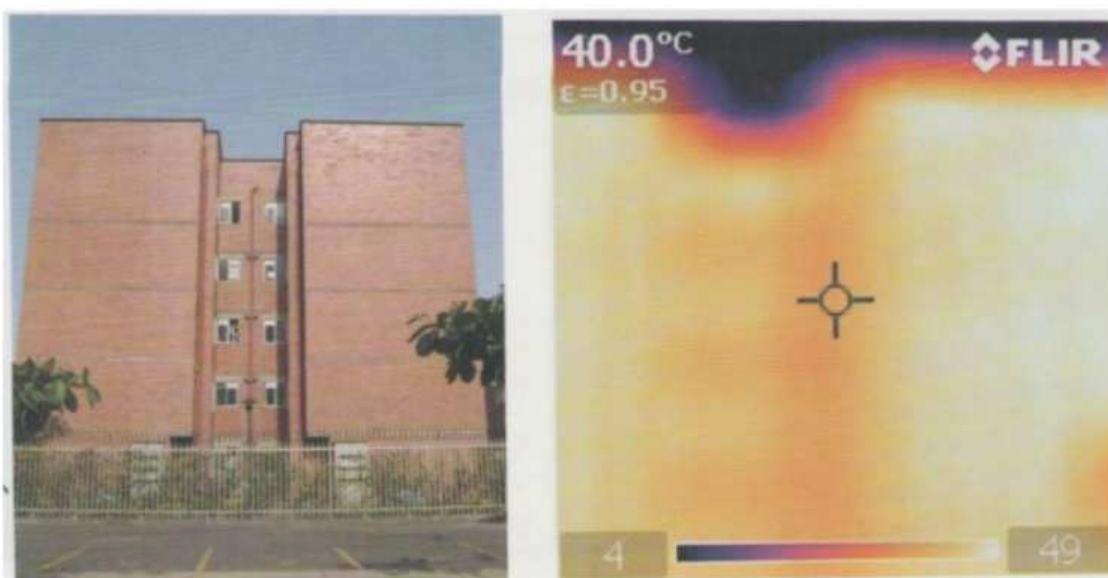


Ilustración 5. Efecto de los materiales en la envolvente, Fotografía e imagen térmica de la fachada oeste del conjunto Calicanto en Cali a las 2 pm. Tomado de Gamboa, Rosillo, Herrera, López & Iglesias (2011).

Velasco (2012) afirma que este gasto energético es común a todas construcciones ubicadas en el trópico, compuesto por países en su mayoría en desarrollo donde la demanda de energía y por consiguiente las emisiones de CO₂ son cada vez mayores. Por este motivo se infiere que el mayor consumo de energía provendrá de satisfacer las necesidades de confort térmico en los edificios. Igualmente, lo expresan las investigaciones de Kwong, Adam, & Sahari (2014) sobre el consumo de energía en climatización en el trópico, y por su parte la

International Energy Agency (2018) proyectó en su informe, que las emisiones de gases de efecto invernadero por este concepto podrían duplicarse para el 2050.

Bedoya Montoya (2011) señala que un importante porcentaje de los ingresos de viviendas vulnerables se va en el pago de servicios públicos como energía, acueducto y alcantarillado, que son siempre pensados en un flujo lineal, lo cual escapa a la realidad financiera de una familia. En esa misma línea Bodach & Hamhaber (2010) afirman que la priorización de un menor costo de inversión en contraste con la reducción de los costos del ciclo de vida sigue siendo una práctica actual y obstaculiza la mejora de la eficiencia de los edificios, no dejándoles otra alternativa como apuntan Haddad et al. (2020), que la de aumentar la capacidad de adaptación por medios activos de climatización para mejorar la comodidad térmica de los espacios conforme aumentan las temperaturas.

En conclusión, los problemas ya expuestos para la vivienda tropical, en el caso concreto la vivienda de interés social (VIS) y la vivienda de interés prioritario (VIP) en Colombia para climas cálidos es sumamente insostenible. En particular, lo que refiere a la sostenibilidad ambiental a causa de la insatisfacción térmica de la vivienda social en el clima tropical cálido, es un problema que se presenta en el 65 % de la extensión del país en alturas inferiores o iguales a 1000 msnm y temperaturas superiores a 23 °C, esto sumado en mayor medida la falta de planificación en la ventilación de su estructura, la falta de control solar y la alta conductividad de los materiales de la fachada. En definitiva, a los materiales usados en su envolvente y la falta de implementación de estrategias que garanticen el confort higrotérmico.

A continuación, el árbol de problemas (ilustración 6) con el cual se identificó el problema central que radica en la insatisfacción térmica en la vivienda social en el clima cálido y los factores identificados como sub-problemas desencadenantes en una relación de causa efecto.



Ilustración 6. Árbol de problemas, causas y efectos que derivan en la insatisfacción térmica en la vivienda social en altura. Fuente: elaboración propia.

Preguntas de Investigación

De acuerdo a lo encontrado en el árbol de problemas se evidencia la necesidad de explorar y evaluar distintas alternativas de mejora en la vivienda social con las que se pueda optimizar el confort térmico y a la vez tenga en cuenta el contexto socioeconómico y tecnológico de los habitantes de la VIS, por medio de la intervención en su envolvente, surgiendo las siguientes preguntas:

¿Cómo puede estar compuesta una envolvente vertical para VIS de formato multifamiliar que haga uso de múltiples estrategias bioclimáticas para mejorar el problema de insatisfacción térmica en la vivienda social en altura?

¿Qué tan sustancialmente se puede impactar el confort térmico interior de una VIS al cambiar el sistema constructivo y geometría en la envolvente vertical?

¿Qué tan viable económica y ambientalmente puede ser una envolvente opaca diseñada para el trópico utilizando impresión digital y tecnologías bioclimáticas como el auto sombreado, hidrogel, y barrera radiante?

Hipótesis

Teniendo en cuenta los planteamientos de los antecedentes, el árbol de problemas y las preguntas de investigación, se proyecta a continuación la hipótesis, la cual se usó como punto de partida para negar o confirmar el impacto de la envolvente diseñada.

Hipótesis; la mejora de la vivienda de interés social a través de la implementación de una envolvente diseñada especialmente para el clima cálido permite alcanzar los niveles mínimos de confort térmico, es decir, un PPD² del 20%.

² El índice PPD conocido como porcentaje estimado de satisfechos hace parte de la ISO 7730 para la estimación del confort térmico, este índice proporciona una predicción en porcentaje sobre el número de personas insatisfechas en determinado espacio.

Objetivos

Objetivo Principal. Desarrollar y evaluar un prototipo de envolvente para la optimización del confort térmico en la vivienda social del clima cálido.

El producto esperado de esta investigación es el desarrollo de una envolvente vertical opaca que mejore el confort térmico de una vivienda social (VIS) en altura para el clima cálido tropical, la cual es la más susceptible a los costos económicos y ambientales asociados al cambio climático, tomando como caso de estudio Santiago de Cali cuya temperatura máxima se sitúa en los 29 °C y mínima en los 19 °C.

Con el fin de aumentar los beneficios ambientales de este objetivo se ha propuesto la utilización del plástico reutilizado como materia prima principal en su construcción, por su aporte a la reducción de los residuos que este genera ofreciendo una alternativa que incremente las posibilidades del material en elementos constructivos de larga vida útil.

Objetivo Específico 1. Diseñar una Envolvente que Integre Múltiples Estrategias Bioclimáticas

Como primer objetivo se plantea un diseño que integre múltiples estrategias bioclimáticas en un solo sistema con el fin de obtener el máximo desempeño energético que una fachada pueda dar a una vivienda de interés social (VIS) en altura, ya que la envolvente vertical es la que aporta mayor ganancia térmica en los hogares, además de ensayar el alcance y combinación de cada una de las estrategias en las envolventes opacas. Bien lo señala Saavedra (2014) al indicar que la envolvente, por ser un sistema que interviene principalmente

en el confort y energía, es susceptible de lograr importantes ahorros energéticos con la aplicación de las estrategias adecuadas.

Trabajos como los de AmmarTaher (2019) que integran sistemas de ventilación en muros de arcilla impresos en 3D o investigaciones como las de Sarakinioti, Turrin, Konstantinou, Tenpierik, & Knaack (2018) que usan la impresión 3D en la creación de prototipos de cerramiento a la vez que integran una variedad de estrategias bioclimáticas. Son un ejemplo de exploración válido en la combinación de diferentes sistemas en un único cerramiento, además de una herramienta de uso extendido para la construcción de elementos reciclados de plástico.

Objetivo Especifico 2. Determinar el Confort Térmico que un espacio (VIS) puede alcanzar con el prototipo de envolvente desarrollado.

Como segundo objetivo se propone determinar el aporte de la envolvente propuesta al confort térmico en un apartamento de interés social en la ciudad de Cali. Para lograrlo es necesario crear una simulación de una vivienda (VIS) en donde las condiciones de la envolvente y el clima cálido tropical sean los más cercanos a la realidad.

Obtener datos más precisos sobre la transmitancia térmica del elemento propuesto ayudará a fidelizar las simulaciones computacionales realizadas sobre un apartamento VIS típico. Autores como Marinosci, Semprini y Morini (2014) y Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2018) recomiendan disminuir la incertidumbre en la simulación con el ingreso de los datos obtenidos de forma práctica, aumentando así la confiabilidad de las simulaciones finales, y probando un camino válido para evaluar y mejorar el comportamiento de una envolvente.

Objetivo Especifico 3. Evaluar el Costo-Beneficio de la Envolvente

Propuesta Comparada con las Existentes y con el Uso de Sistemas de Climatización Activas

Con el fin de determinar la pertinencia de la envolvente propuesta en favor de reducir los costos económicos y ambientales, producto de la insatisfacción térmica en la VIS. Se hace necesario establecer una comparación económica y ambiental entre las envolventes que se usan actualmente y la propuesta. Como bien fue señalado por Bedoya (2012) se comete el error de pensar en los gastos energéticos producto de la insatisfacción térmica como un flujo lineal, lo cual atenta contra la sustentabilidad económica de esos hogares a largo plazo. Por lo cual, se debe tener en cuenta la variación del dinero en el tiempo para este tipo de análisis.

Los autores Rosillo & Herrera (2019) afirman en ese sentido que un proyecto cuyo objetivo sea alcanzar el confort térmico, no puede considerarse completo si no se cuenta con toda la información disponible sobre costos y gastos que deban realizarse, ya sea como un insumo y herramienta al compararse con otros. Giraldo C. (2018) por su parte, menciona que el valor económico es un factor relevante en todo tipo de edificación, pero sin duda lo es más en el nivel socioeconómico de los propietarios o habitantes de una vivienda de interés social.

A continuación, en la ilustración 7 el árbol de objetivos propuesto de acuerdo a la problemática planteada, que nos lleva a investigar las cualidades y las capacidades de la envolvente en las viviendas tipo VIS en altura, existentes. Se analizan las propiedades de la materialidad propuesta en función del confort térmico con el propósito de entender su impacto y aportar soluciones a través de la construcción y del diseño sostenible, mejorando las condiciones higrotérmicas en la VIS en un clima tropical cálido como el de Santiago de Cali, ayudando a superar el problema principal identificado.

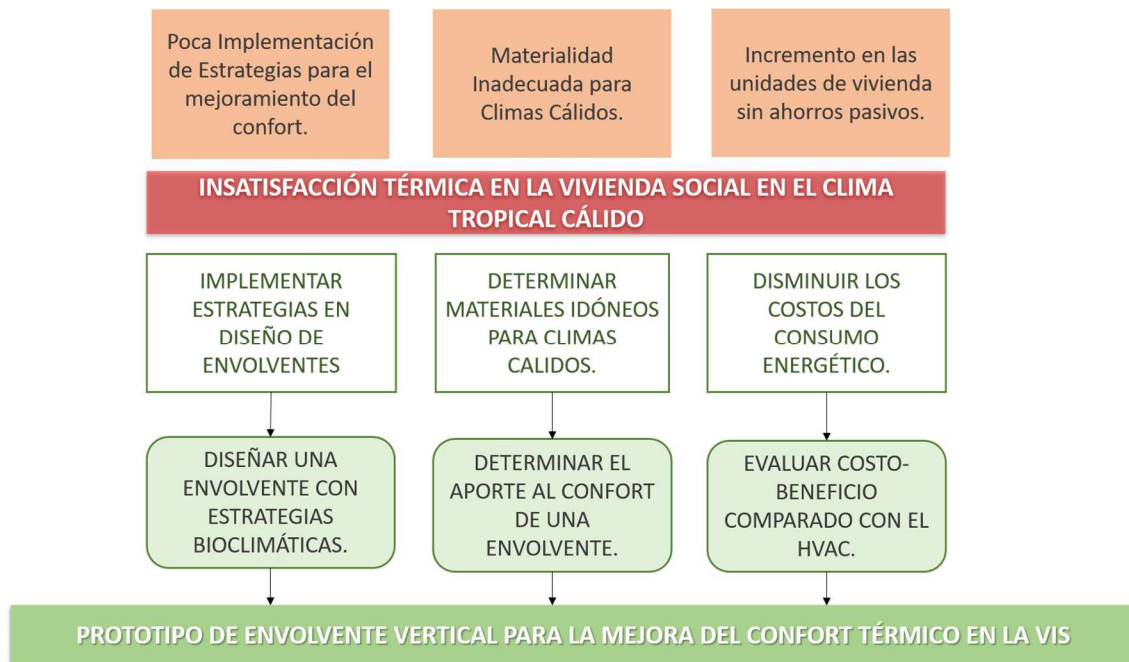


Ilustración 7. Árbol de objetivos propuesto. Fuente: elaboración propia.

Justificación

Según el Banco Mundial (2018) en las últimas tres décadas más de mil millones de personas salieron de la pobreza extrema, y esta se ha reducido en un 3% en casi la mitad de los países del mundo, eso significa una población cada vez con mayor capacidad de adquirir bienes y servicios, muchos de ellos orientados a satisfacer la demanda de comodidad térmica en sus viviendas. Sumado a que la ONU calcula que para el año 2050 en los trópicos vivirá la mayor parte de los habitantes del planeta y en concreto, casi dos tercios de la población infantil.

El trópico es sumamente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático, según un estudio del BID la región podría incurrir en costos de hasta 100 millones de dólares anuales para poder adaptarse a estos cambios hacia el 2050. La CEPAL (2016) coincide al describir la región como vulnerable, ya que gran parte de su área está localizada dentro de la franja de huracanes, posee numerosos estados insulares y zonas costeras bajas, así como también depende de los deshielos andinos para el suministro de agua para las zonas urbanas y agrícolas, y además está expuesta a inundaciones e incendios forestales.

El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la ONU prevé que el 68 % de la población vivirá en zonas urbanas para el año 2050, con un acentuado crecimiento en los países de ingresos bajos y medios. Los nuevos edificios, de seguir las tendencias actuales representarán un tercio de la totalidad de las emisiones de gases de efecto invernadero, de forma que son un objetivo principal para establecer estrategias que reduzcan su gasto energético; en especial en lo que respecta a la vivienda en el trópico, ya que al incluir criterios de diseño y estrategias pasivas permitirá mejorar el comportamiento energético de las edificaciones, reduciendo las emisiones y obteniendo una mayor capacidad de adaptarse al cambio climático

Las emisiones GEI en Colombia corresponden al 0.4% del total de emisiones mundiales, según datos del Instituto de Recursos Mundiales el país se sitúa en el puesto 5 de emisiones GEI entre 32 países de Latinoamérica y el Caribe; en donde Brasil, México y Argentina son los principales emisores de este grupo. Según el inventario de gases de efecto invernadero en Colombia realizado por el IDEAM (2015) el país presentaba un consolidado de 258.8 Mt de CO₂ para el 2012, de los cuales 5.4% están relacionados con la habitabilidad y la construcción, debiéndose principalmente al consumo de gas natural y al crecimiento de HFCs (gases refrigerantes) en los últimos años. El informe indica que el crecimiento general de las emisiones de GEI de este sector se relaciona principalmente con el crecimiento poblacional.

Los paneles de trabajo alrededor de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 2019 (COP25) han destacado la importancia de la ciudad y de la edificación en el alcance de las metas de reducción de CO₂. De acuerdo con la agencia europea de medio ambiente (AEMA), la vivienda y la construcción aportan el 56% de las emisiones frente a un 13% de los automóviles en los 28 países de la unión europea. La ONU advirtió que deben multiplicarse por cinco los esfuerzos globales si se quiere lograr que el aumento de la temperatura se quede por debajo de los 1.5 grados, y multiplicarse por tres si se quiere que ese incremento no supere los 2 grados. De lo contrario, entraremos en un ciclo sin

retorno para la vida en la tierra en relación con los ecosistemas y el aumento de intensidad de fenómenos naturales como los huracanes, enfermedades, inundaciones y sequías.

De acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) en el 2019, y por tercer año consecutivo, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero volvieron a aumentar y se situaron en un máximo histórico. Según el reporte anual de este organismo, la crisis del COVID-19 ralentizó temporalmente las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera en 2020. Sin embargo, el mundo todavía está en camino a un aumento catastrófico de temperatura superior a los 3 grados centígrados sobre los niveles preindustriales para este siglo.

La IEA³ revela en su informe de 2020 que la industria de la construcción, como se muestra en la ilustración 8 fue responsable del 38% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, y del 35% del consumo total de energía global. Por su parte, las Naciones Unidas sostienen que, a pesar de la mayor eficiencia energética y la disminución en el coste de producción de energía baja en carbono, las emisiones siguen incrementándose en los países con el propósito de cubrir sus necesidades de desarrollo. Si lo que se busca es reducir entre el 30 y 40% del consumo mundial de energía y así alcanzar el objetivo de la COP25⁴ en relación con el aumento global de la temperatura, se requiere un cambio de modelo energético donde el tema clave sea la vivienda y la ciudad.

³ *International Energy Association.*

⁴ *Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático de 2019.*

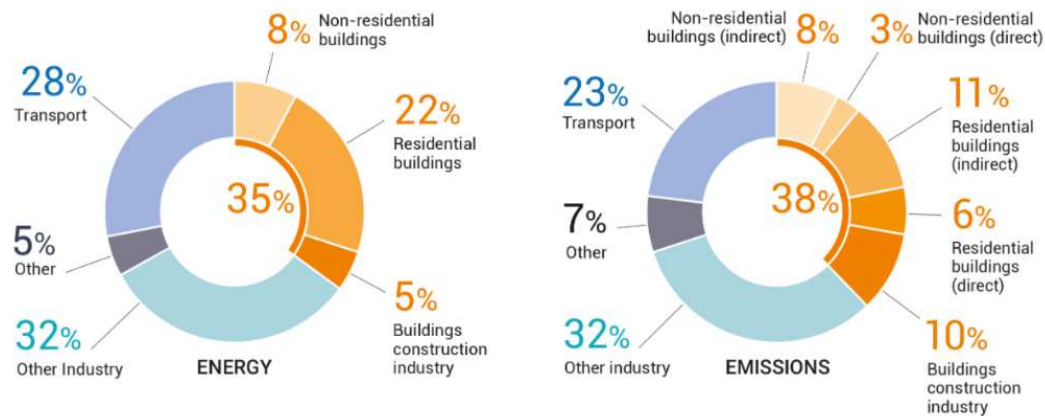


Ilustración 8. Porcentaje de consumo energético y emisiones por industria. Fuente: "IEA Word Energy Statistics and Balances" y "Energy Technology Perspectives"

De los componentes de la edificación, la fachada y la cubierta, conocidos en su conjunto como envoltente; es el elemento que tiene mayor incidencia en el consumo energético y en la satisfacción de la comodidad en las personas, lo cual es especialmente cierto en el trópico. Autores como Katili et al. (2015) afirman que el consumo típico en los edificios, como se aprecia en la ilustración 9 para esta ubicación geográfica, puede destinar más del 50% de su energía en la producción de confort por medios activos como el aire acondicionado, donde los autores prevén que este porcentaje puede ir incrementándose hasta en 80% en los picos máximos de consumo.

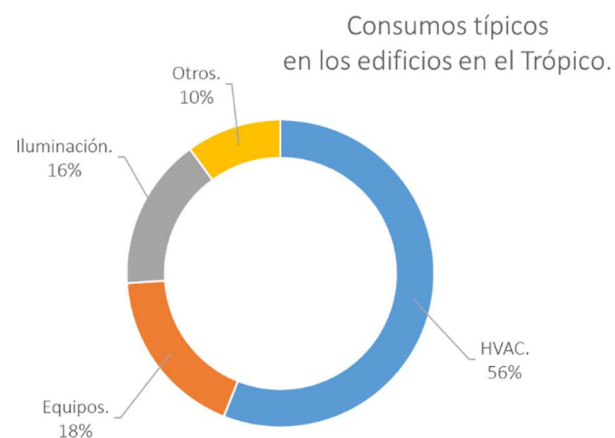


Ilustración 9. Porcentaje de consumos estimados para edificios en el trópico. Fuente: Katili et al., (2015).

La mayor área expuesta a las ganancias energéticas en una edificación de uno a dos pisos o en el último piso de un edificio multifamiliar, es la cubierta, como se aprecia en la gráfica de la ilustración 10. A diferencia de un edificio multifamiliar, en el cual las mayores ganancias en todos sus pisos a excepción del último piso están dadas por la envolvente vertical. Giraldo C. (2018) halló vacíos en las evaluaciones de confort, así como en la exploración de mejoras en la envolvente vertical para la vivienda multifamiliar; lo cual es especialmente crítico en ciudades tropicales como Cali, en donde las temperaturas de la superficie de las paredes internas expuestas al sol en la VIS multifamiliar, se encuentran entre los 40 °C y 50 °C de acuerdo al autor, aportando en gran medida a la falta de satisfacción térmica en este tipo de viviendas.

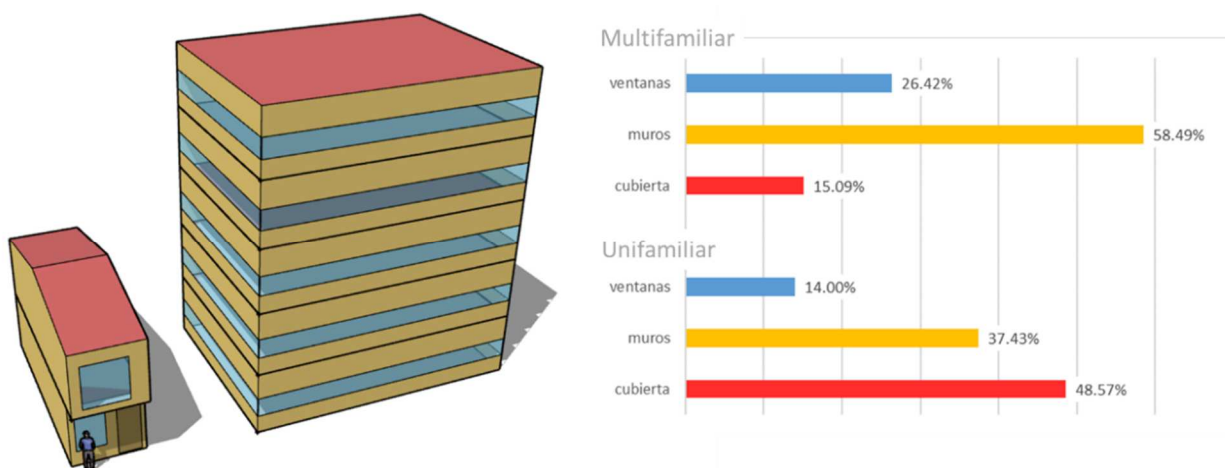


Ilustración 10. Comparación entre el porcentaje de envolventes entre tipologías unifamiliar y multifamiliar para un área habitable de 57.6m², con una WWR de 31% y una altura entre pisos de 2.7m. Fuente: elaboración propia.

Una forma de intervenir sobre las ganancias energéticas y la producción de gases de efecto invernadero es con la utilización del plástico reciclado. El reciclaje de plásticos para crear materiales de construcción trae múltiples beneficios como la creación de empleos, la reducción de polución tanto de plástico como gases producto de su incineración, además presentan ventajas en relación con su durabilidad, aislamiento térmico, acústico y de acuerdo con su configuración resistencia al fuego.

Ya que la contaminación por plástico es uno de los grandes problemas medioambientales de nuestro tiempo, teniendo efectos negativos sobre los ecosistemas, la economía y la salud humana, su producción creciente y uso insostenible hace que sea imposible mitigar sus efectos negativos, ya que a diferencia de los plásticos naturales como el caucho o la seda estos se encuentran “diseñados” para ignorar los procesos naturales de descomposición. De acuerdo a Hopewell, 2009 un gran porcentaje del plástico producido cada año es utilizado una sola vez, en elementos de empaque desechable o productos de máximo un año de duración.

Es debido a su degradación lenta y a su gran acumulación que es un problema mayor en fuentes de aguas y mares, según datos del Programa de la ONU para el Medioambiente (PNUMA) 8 millones de toneladas de plástico terminan en los océanos cada año lo que equivale a vaciar un camión de basura lleno de plásticos cada minuto. De estos macro-plásticos que son las estructuras de fácil identificación se derivan en parte los micro-plásticos con tamaños muy pequeños y microscópicos que pueden ser ingeridas por la fauna marina y ser transmitido a los humanos por la cadena alimenticia como lo exponen Vethaak & Leslie, (2016).

Según datos de la Procuraduría General de la Nación del 2019 cada persona en el país produce 24 kilos de plástico al año, con 45 millones de habitantes Colombia produce un millón de toneladas de este residuo, la misma entidad afirma que esa cantidad solo se alcanza a reciclar cerca del 7% dejando el resto del 93% en rellenos sanitarios o dispersos en ríos o montañas (ver ilustración 11). Por lo que re-aprovechar este material en uso de larga duración como la envolvente puede ayudar a contribuir a disminuir los impactos negativos de los plásticos.

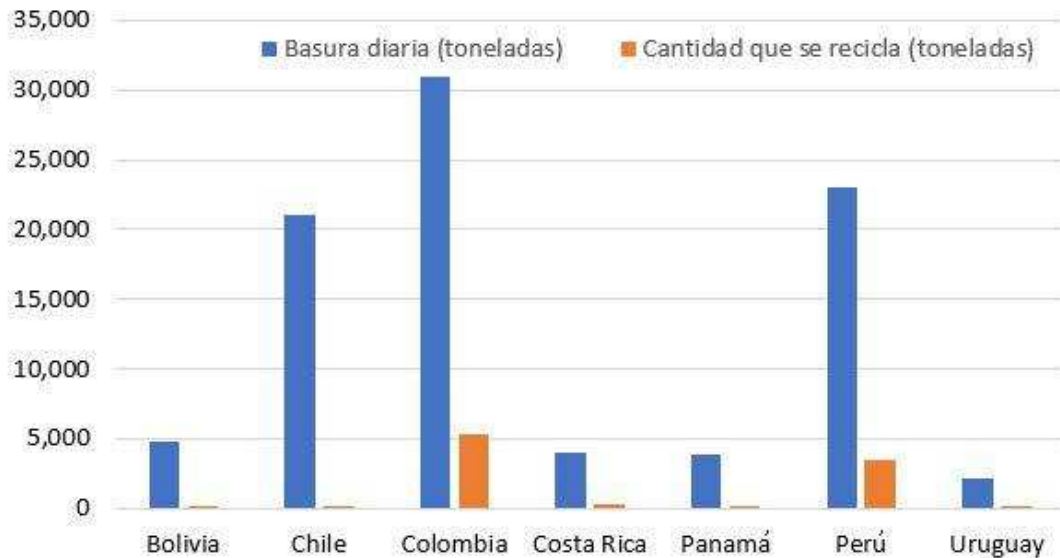


Ilustración 11. Cantidad de basura que se recicla en siete países en América Latina tomado de (Erika, n.d.) Consejo para la Defensa de Recursos Naturales.

Intervenir sobre el edificio es necesario, pero es prioritario hacerlo sobre la vivienda social que constituye la mayor masa de edificación, que está sujeta a modificaciones constantes por parte de sus habitantes y la cual es susceptible a incluir sistemas de ventilación mecánica, volviéndola vulnerable a un mayor consumo energético que puede ser evitado al incluir criterios de diseño de eficiencia energética y estrategias pasivas. Así que influir sobre su envolvente es clave, ya que es por medio de ella que el edificio presenta las mayores ganancias o pérdidas de energía.

Por otro lado, abordar este tipo de investigación es oportuno, puesto que aporta a la discusión mayores elementos sobre el desarrollo de sistemas constructivos o de fachada especialmente adaptados a las condiciones climáticas presentes y futuras del trópico con compuestos plásticos, no solo aprovechando su larga vida y propiedades térmicas, sino también alejándolos de los rellenos sanitarios y fuentes de agua.

El arquitecto no debería estar limitado a tomar nada más lo que el mercado pueda darle en cuestión de elementos de cerramiento, sino que también puede jugar un papel activo en el

desarrollo de este tipo de productos, o como mínimo conocer los efectos que las propiedades físicas y térmicas que estos puedan aportar al espacio.

Alcances

- En este apartado se declaran los aspectos que alcanzará la investigación en su delimitación espacial y conceptual.
- El tipo de investigación es exploratoria y los métodos a utilizar serán principalmente la simulación y la experimentación.
- Este trabajo se enfocará directamente al diseño de la envolvente opaca y su impacto en el confort térmico, en lo económico y ambiental.
- El fin de la propuesta es el mejoramiento en las condiciones de confort térmico de la vivienda social en altura.
- El diseño de la envolvente en esta fase es la combinación de múltiples estrategias bioclimáticas dentro del espacio limitado del espesor de un muro de 15 cm.

Limitaciones

- El estudio no abarca el diseño de un sistema constructivo completo, especificaciones de anclaje o montaje.
- El uso de la impresión 3D se limita a ser una herramienta de construcción física de las probetas. Se deja por fuera la variabilidad y el ajuste de diversos prototipos impresos, así como las diversas ventajas que ofrece la impresión 3D para objetos de forma libre y única.
- La investigación se encuentra dentro del clima cálido tropical, tomando como caso de estudio la ciudad de Santiago de Cali.

- Debido al acceso restringido a los laboratorios de la Universidad del Valle durante la pandemia, la prueba de transmitancia térmica se realizó bajo un método alternativo, tomando como guía pruebas similares encontradas en la literatura.

Marco Teórico

La sostenibilidad es el término que ha sido definido como necesario para que la sociedad conviva y se relacione con el entorno. De manera que, ser “sostenible” implica un cambio de enfoque en la forma como producimos y consumimos energía, un balance entre la sostenibilidad económica, la sostenibilidad social/ política, y la ambiental como se aprecia en la ilustración 12 es especialmente relevante en el habitar y en el construir humano, cuyo impacto ambiental según las investigaciones y literatura es el mayor comparado con las demás industrias.

La sostenibilidad como termino nace a principios de la década de los años 80 en la *Estrategia Mundial para la Conservación* (World Conservation Strategy, UICN, 1980, primera estrategia global de Desarrollo Sostenible) y en el conocido como *Informe Brundtland* (Our Common Future, CMMAD, 1988). Esta definición nos da un enfoque crítico sobre la sostenibilidad de los asentamientos humanos y anima a buscar soluciones a los problemas que aquejan a la sociedad sin comprometer su capacidad de resolver sus necesidades futuras.

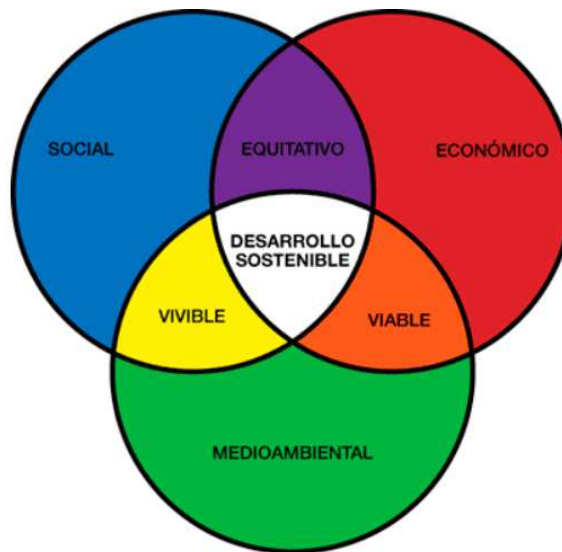


Ilustración 12. Tomado de *¿Qué Es El Desarrollo Sostenible? - ¡Cuidemos El Planeta!*, n.d.

Dentro de este concepto se enmarca la *arquitectura sostenible*, la cual según la sociedad española para la calidad (AEC) es aquella que tiene en cuenta el impacto que va a tener durante todo su ciclo de vida, diseño, ejecución, construcción, mantenimiento y desmantelamiento o demolición, considera los recursos a utilizar en estas fases, así como su desperdicio, abogando por la eficiencia energética, el confort y la salud de los usuarios, relaciona de forma armónica las aplicaciones tecnológicas, los aspectos funcionales y estéticos y la vinculación con el entorno natural o urbano, para lograr hábitats que respondan a las necesidades humanas en condiciones saludables, sostenibles e integradoras.

En otras palabras, la arquitectura sostenible habla de la práctica arquitectónica en las tres esferas de la sostenibilidad; económica, social y ambiental. Por su parte, la arquitectura está ligada estrechamente a la esfera ambiental, ya que esta se enfoca particularmente en la mejora de los valores de bienestar termo fisiológico del ser humano, empleando preferiblemente las energías pasivas en favor de lograr una reducción del consumo de energía y de los impactos negativos sobre el medio ambiente.

La arquitectura bioclimática o bioconstrucción como saber ha estado con la humanidad casi desde sus comienzos, era la forma natural e intuitiva que ha tenido el hombre de habitar los espacios, siempre aprovechando la tecnología constructiva disponible en el momento. Sin embargo, le fue puesto como nombre a raíz de la reflexión producto de la crisis del petróleo del 70, en donde fue necesario repensar la manera en cómo se consumían los recursos en ese momento, de ahí que la arquitectura bioclimática actual tenga un fuerte énfasis hacia el ahorro en el consumo energético.

Uno de sus principales precursores fue Víctor Olgyay quien estudio la relación entre el edificio y el medio natural que lo rodea, así como la dependencia entre el ser humano y el clima. Él sostenía que por medio de la arquitectura podía alcanzarse un equilibrio biológico, en donde el ser humano requiriera un esfuerzo mínimo para adaptarse al clima, satisfaciendo el confort térmico. Además, determinó que dicho confort podía alcanzarse por medio de la modificación de sus principales características como la temperatura del aire (T_{air}), la radiación, la velocidad del aire (m/s) y la humedad (HR), transformando el medio natural para acercarse a las condiciones óptimas de habitabilidad.

La envolvente es un término matemático adoptado en la arquitectura para referirnos a todos aquellos elementos que en el edificio funcionan como mediadores entre el interior y el exterior, se trata entonces de un elemento tridimensional que recubre los objetos arquitectónicos e incluso urbanos, que participa activamente en los intercambios de energía por convección, radiación y conducción, pero su función no es únicamente térmica, también es lumínica, acústica y estética. Son, de acuerdo a María & Parra, n.d. acciones determinadas por la relación entre el edificio y su contexto en respuesta a las actividades o programas al interior de este.

Para Aksamija (2015) la envolvente no se debe considerar únicamente como una barrera que separa el interior y exterior, sino como elementos que conforman un sistema del edificio que emplea la mínima cantidad de energía para mantener el confort interior, en lo que

la autora define como “High-performance sustainable facades”, las cuales promueven la salud y productividad de sus habitantes. La envolvente-sustentable desde su punto de vista crea espacios confortables que responden activamente al ambiente exterior, y reducen a su vez el consumo energético.

Varini (2016a) también coincide en tratar a la envolvente como un sistema, en donde todas sus partes interactúan entre sí. Así como también las renombra para distinguirlas de las fachadas tradicionales agregando el sufijo “eco” describiendo la vocación de estas eco-envolventes en reducir los consumos energéticos y los impactos ambientales, como las emisiones de gases efecto invernadero suministrando confort térmico a los usuarios del edificio en climas tropicales.

Las envolventes de acuerdo a Aksamija (2015) están divididas en dos; las envolventes traslúcidas y las opacas. Las primeras se encargan de proveer confort lumínico y ventilación natural por medio de elementos traslúcidos como las ventanas, las segundas se refieren a elementos como cubiertas, suelos, y muros exteriores. De la correcta definición de ambos tipos de envolventes dependerá en gran medida el comportamiento energético del inmueble.

La capacidad de una envolvente para permitir o restringir el paso de calor depende de su transmitancia, también conocida como valor U, un parámetro dado a partir del espesor y la conductividad térmica de cada una de las capas que la componen, así como la naturaleza y disposición en la que se encuentre el cerramiento, ya que de este dependerá la resistencia térmica de su superficie exterior e interior. Su unidad más habitual es el $W/m^2 \cdot K$ la resistencia térmica no es más que su inversa, pero reflejan el mismo concepto como la capacidad de oponerse al paso de la temperatura.

Sobre el comportamiento térmico de las envolventes también inciden factores como; la relación ventana pared WWR (window to wall ratio) que es la proporción en porcentaje que resulta de dividir el área total de acristalamiento entre el área total del muro, y propiedades propias del acristalamiento como el Solar Heat Gain Coefficient (SHGCC) relaciona la ganancia

de calor que ingresa al recinto a través de la ventana por la radiación solar, expresándose como un número entre 0 y 1, en donde 0 significa que no se admite radiación y 1 significa que no se bloquea ninguna. Y la reflectancia solar es la relación de radiación solar reflejada del material de la superficie relativa a la radiación solar incidente sobre esta.

En conclusión la envolvente como sistema es el actor principal en proveer el confort térmico, definido por la ISO 7730 como “una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico”.

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHARE), en su Estándar 55 normaliza las condiciones térmicas aceptables para los ocupantes de la edificación de acuerdo a un conjunto de factores asociados al ambiente interior, este estándar incluye dos aproximaciones a la definición de las condiciones de confort en el edificio. El modelo predictivo y el adaptativo.

Para edificios ventilados naturalmente la norma ASRHAE 55 propone a partir de las investigaciones de De Dear y Brager, un modelo de evaluación del confort térmico. Frente al modelo Fanger (1973) de confort térmico, el modelo adaptativo las personas juegan un papel instrumental creando sus propias preferencias térmicas a través del modo en el que ellos interactúan con el ambiente, modifican su propio comportamiento o gradualmente adaptan sus expectativas en función del ambiente térmico en el que se encuentren. El modelo de confort adaptativo es el ideal para la lectura de la situación de comodidad térmica en las viviendas sociales en el clima tropical cálido ya que desde su concepción plantean estrategias pasivas. Ofreciendo condiciones mucho más variables en este tipo de edificios que en edificios aclimatados mecánicamente.

Las viviendas sociales en Colombia son conocidas como; (VIS) vivienda de interés social y (VIP) vivienda de interés social prioritario, estas según la definición dada por el Ministerio de Vivienda; son aquellas que reúnen los elementos que aseguran su habitabilidad, estándares de calidad en diseño urbanístico, arquitectónico y de construcción cuyo valor

máximo es de ciento treinta y cinco salarios mínimos legales mensuales vigentes (135 SMLM) o \$34,439 USD para la VIS y (70 SMLM) para la vivienda VIP o \$17,857 USD al cambio en diciembre de 2020 para el peso colombiano.

Las diversas teorías y fundamentos mencionados fueron tomados como referencia para la elaboración del presente trabajo, el orden de los temas tratados, así como las relaciones entre estos y la ubicación de la investigación realizada dentro del mismo, están esquematizadas en la ilustración 13.

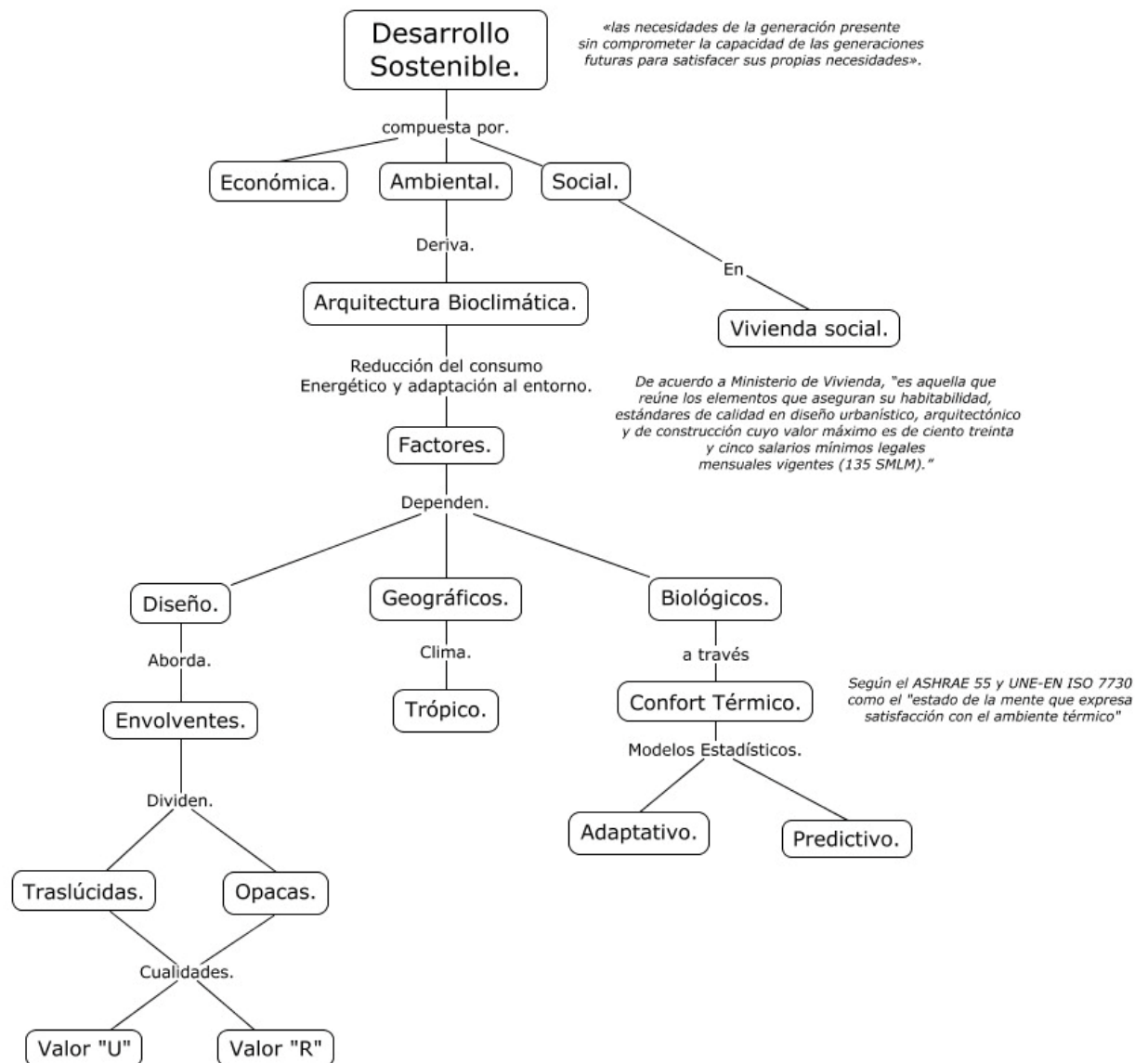


Ilustración 13. Mapa conceptual del marco teórico propuesto para la investigación en diseño de envoltentes. Fuente: elaboración propia

Estado Del Arte

De acuerdo a la literatura, la envolvente siempre ha tenido una especial importancia como tema de investigación, en especial la envolvente vertical, por esta razón se encontró abundante información sobre su base teórica, metodología, y recomendaciones. Sin embargo, se ha indagado poco sobre su diseño en un contexto tropical y en especial a la mejora del confort térmico en las viviendas en altura. A continuación, algunos antecedentes relacionados con el tema que mayormente influenciaron esta investigación, realizados en torno al diseño y construcción de envolventes verticales, los cuales se han dividido en:

- a) Internacionales, diseño y construcción de envolventes.
- b) Investigaciones locales en el contexto tropical.

Investigaciones Internacionales

Developing and Integrated 3d-Printed Façade with Complex Geometries for Active Temperature Control.

Los autores Sarakinoti et al. (2018) ofrecen en su artículo una visión general del desarrollo de una fachada que implementa las ventajas de la manufactura aditiva como la complejidad, materialidad y libertad de formas, describiendo los retos y características térmicas que impulsaron las iteraciones y pruebas de diseño; las cuales fueron determinantes en la geometría y la selección de la tecnología de impresión haciendo una demostración de la potencialidad en la tecnología y la necesidad de nuevos desarrollos a partir de ella.

Palabras clave: manufactura aditiva, complejidad, fachada, diseño.

Para el desarrollo de esta fachada, se produjeron inicialmente muestras de elementos impresos en 3D a partir de estructuras celulares simétricas, de las cuales se ensayaron sus propiedades térmicas y se evaluaron sus características de impresión como; el calibre del extrusor, la cantidad de material y tiempo. A partir de estos resultados se probó una

optimización para formas de impresión en estructuras alargadas y asimétricas, llevándose a cabo una amplia gama de mediciones de flujo de calor, para encontrar sus conductividades y encontrar así la mejor forma de impresión. Después, esta se complementó con un sistema de irrigación interna; en la que el agua se integró en una red de vasos comunicantes como forma al diseño final impreso, no sin antes validar pruebas con la circulación y estanqueidad del líquido. Finalmente, este diseño se amplió en un prototipo final de mayor tamaño.

Los autores demuestran la integración de múltiples funciones para optimizar el rendimiento térmico y crear estructuras de un solo material, lo cual solo es posible mediante el uso de la tecnología de impresión en 3D. En lo que respecta al comportamiento térmico se comprobó que se puede conseguir una baja conductividad térmica mediante la manipulación del tamaño y la geometría de los elementos interiores, y resalta la importancia de la elección del material como un parámetro importante dentro de la conductividad térmica final.

El aporte de Sarakinioti et al. (2018), además de la inclusión de varias estrategias al tiempo en una sola envolvente, así como el empleo dado a la impresión 3D, radica en las bondades encontradas en la impresión con PETg para este tipo de búsquedas. Ya que su durabilidad, estabilidad en su color frente a la radiación, su resistencia térmica a los impactos y a la corrosión química, hacen de este material el ideal para la búsqueda de envolventes verticales con el uso de la manufactura aditiva.

3D Printing Clay Facade Walls: Integrating Ventilation Systems into Printing Process.

Ibrahim (2019) teoriza que el uso de la impresión 3D y de materiales tradicionales como la arcilla podría conducir a un enfoque más sostenible para la materialización de elementos complejos, entonces explora la realización de un muro impreso en manufactura aditiva en arcilla junto con un sistema de climatización pasiva. Esta investigación cubre desde la elección del compuesto y la plasticidad idónea de arcilla para ser extruida, la simulación CFD de las corrientes de aire con el fin de proveer los recambios de aire conforme a la normativa, hasta la exploración del diseño de impresión y fabricación.

Palabras clave: impresión 3D, arcilla, ventilación pasiva, muro.

El autor comienza a desarrollar esta investigación eligiendo el material de impresión de acuerdo a la revisión de literatura, y después realizando ensayos en donde combinó esta materialidad inicial con otros materiales orgánicos para obtener el comportamiento plástico buscado en la impresión de elementos de gran escala. Adicionalmente con la integración al flujo de trabajo de software de modelación en CFD⁵, Grasshopper y Rhinoceros, logró ejecutar un modelo de muro que respondiera a las calidades de ventilación natural y térmicas que se buscaban, seguidamente calibró el brazo robótico, así como el dispositivo de extrusión para obtener el acabado esperado.

Ibrahim (2019) concluye que es posible alcanzar el rendimiento térmico y de recambios de aire requeridos en el contexto climático seleccionado de Sevilla, España. Obtuvo entre sus resultados dos hallazgos principales; el primero es que la composición arcilla, yeso y chamota, es la ideal para la impresión 3D, y la segunda que es posible mediante la impresión de elementos complejos insertos en un muro desarrollar un medio de ventilación pasiva mediante un sistema de conductos de ventilación por desplazamiento, lo que podría integrarse de forma bastante natural en componentes de edificios como las paredes de las fachadas.

⁵ *Computational fluid dynamics.*

Aunque no haga aportaciones directas Ibrahim (2019) propone la integración de dos estrategias en una sola envolvente; la ventilación natural y la resistencia térmica, la cual solo fue posible bajo un flujo de trabajo y el uso de herramientas de simulación energética e impresión en 3D, sirviendo de referencia para el presente trabajo.

Hydroceramic

Rathee et al. (2014) plantea como hipótesis que es posible el mejoramiento del confort térmico a partir del uso del hidrogel como material activo para llevar a cabo los procesos de intercambio de energía de la envolvente con el exterior para climas cálidos. Para esto desarrolla un prototipo mediante el análisis higrotérmico (humedad y temperatura) de diferentes materialidades junto con el empleo de esferas de hidrogel, con el fin de encontrar la combinación más idónea para cumplir con las condiciones habitables requeridas para la zona estudiada.

Palabras clave: hidrogel, análisis higrotérmico, condiciones habitables.

Mediante un experimento establecido para probar el efecto del hidrogel y encontrar cuál que es el mejor material para alojar la sustancia en una estructura de tipo sándwich; la arcilla, el aluminio y el acrílico fueron ensayados experimentalmente. Posteriormente, estos datos fueron comparados lo que ayudó a determinar que la naturaleza porosa de la arcilla hace que sea la materialidad más eficaz para combinar con las propiedades de las esferas de hidrogel.

El estudio concluye que una fachada con el diseño que integra la arcilla y el hidrogel, que realizan un control térmico al interior de los espacios por evaporación, logran reducir la temperatura hasta 6 ° C, aumentando a su vez la humedad relativa ambiental y mejorando la sensación de confort.

Como aporte a la presente investigación, se plantea la inclusión del hidrogel como estrategia activa de intercambio de energía en la envolvente, ya que el hidrogel absorbe el agua durante los períodos húmedos y la libera en forma de vapor cuando aumenta la

temperatura. Dicha propiedad resulta muy útil en contextos cálidos, y válida de ensayar en ambientes tropicales.

Investigaciones Locales

Optimización del Confort Térmico en Clima Ecuatorial con Tecnologías Pasivas en Fachada - Caso Vis Cali.

Giraldo C. (2018) identifica que la causa de la insatisfacción térmica en la vivienda de interés social se debe a problemas derivados de la ventilación deficiente y las altas temperaturas superficiales en las fachadas de este tipo. Entonces, realiza una revisión de las estrategias pasivas en envolventes verticales y propone la hipótesis de que es posible optimizar el confort térmico de un ambiente VIS en Cali mediante la implementación de estrategias pasivas, reduciendo la temperatura media radiante y la tasa de personas insatisfechas en un 60%.

Palabras clave: confort térmico, vivienda social, arquitectura bioclimática, climatización pasiva.

Para desarrollar su hipótesis realiza una búsqueda bibliográfica, de donde toma las estrategias a comparar; al mismo tiempo que construye la línea base mediante simulación y pruebas en sitio sobre un apartamento existente, realiza pruebas sobre cada estrategia, tanto de caja caliente como exposición a la radiación directa, con el fin de obtener su comportamiento térmico. Finalizando con un análisis costo-beneficio y estudio de los datos obtenidos.

Esta investigación corrobora su hipótesis inicial de la posibilidad en un aumento del confort a partir de la implementación de medidas pasivas, ya que según las simulaciones y pruebas de campo se obtuvo una mejora del 64.8% frente a la línea base. Por otro lado, se demostró la efectividad y buen comportamiento de la aplicación del aislamiento reflectivo (AR) con valores similares al muro vegetal.

El aporte de dicho trabajo a la presente investigación, se encuentra en la solución constructiva ideada por Giraldo C. (2018) para el aislamiento reflectivo (AR) la cual combino en 2.5 cm de cámara de aire con doble pared de foil de aluminio dispuesto en forma de acordeón, la cual obtuvo un buen desempeño térmico a un bajo coste. Así como servir de guía en el flujo de trabajo entre pruebas de campo y simulación en Openstudio.

Relación entre Condiciones Ambientales, Espacios Confortables y Simulaciones Digitales

Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2018) en su hipótesis plantea que la vivienda social en Colombia presenta una problemática asociada a la selección y el uso de una materialidad consecuente con el cambio climático y las condiciones de confort térmico y lumínico. Por lo que realizan una selección preliminar dentro del estado del arte de materiales para envolventes. Para el caso de una vivienda en el barrio Bella Vista en el municipio de Soacha Colombia, la cual se modela y simula energéticamente con las características térmicas y lumínicas de la selección previa de materiales, categorizados como; tradicionales, de vanguardia e innovadores. Se encuentra que los materiales clasificados como tradicionales e innovadores tienen mejor eficiencia, aunque la vivienda requiere acciones pasivas adicionales, ya que se encuentra por fuera de los rangos de confort térmico.

Palabras clave: confort térmico y lumínico, vivienda social, materiales de construcción, envolvente.

La investigación comienza con una caracterización de los datos climáticos del barrio Bella Vista, municipio de Soacha Colombia, al tiempo que se proyecta su comportamiento en los años futuros con la herramienta CC Weather Gen, para los años 2015, 2020, 2050 y 2070. Posteriormente, se realiza una matriz con los materiales de mayor idoneidad para este clima y se clasifican en tres grupos; tradicionales (de uso común), vanguardia (cuya tecnología ha avanzado como los vidrios dobles en ventanas) e innovadores como basados en química y tecnología de punta para su obtención (como el poliestireno expandido y aluminio poroso).

Finalmente, se modela y se simulan todas estas materialidades junto con el clima proyectado y se complementa con un análisis de iluminación natural, de acuerdo con los resultados se procede con una clasificación final y se discuten los mismos.

Los autores de este estudio corroboran su hipótesis inicial, sin embargo, descubren que los materiales de envolvente que son más eficientes frente a las actuales y futuras condiciones climáticas estudiadas son los pertenecientes al grupo de materiales tradicionales e innovadores; a pesar de que registran temperaturas fuera del rango de confort estipulado por el Ashrae 55.1 de 2010 para climas fríos. Para concluir que su uso por si solo es insuficiente y deben complementarse con otras estrategias bioclimáticas.

El aporte que dio este trabajo a la presente investigación fue la inclusión de herramientas de modelado futuro del clima a través del CC Weather Gen, realizado por el comité de expertos de la ONU para el cambio climático, para obtener los datos proyectados a 60 años del comportamiento térmico de la simulación.

Eco-Envolventes, Análisis del Uso de Fachadas Ventiladas en Clima Cálido-Húmedo

Luciani-Mejia et al. (2018) se plantean demostrar la pertinencia de fachadas ventiladas opacas en el clima tropical húmedo, caso específico del municipio de Girardot del departamento de Cundinamarca, Colombia. Realizaron un análisis comparativo de las diferentes fachadas ventiladas en la reducción de impactos en la construcción y mejoramiento del confort térmico a partir de las pruebas en campo y la simulación computacional, lo cual permitió la comparación de resultados y la identificación de comportamiento en términos de confort térmico de este tipo de fachadas para el clima estudiado.

Palabras clave: fachadas ventiladas opacas, confort térmico, simulación.

El desarrollo de esta investigación comenzó por la simulación digital para determinar la viabilidad de materiales y el sistema de fachada para un clima como Girardot. Posteriormente,

se construyó un edificio en sitio sobre el cual se obtuvo la línea base, así como también se pusieron a prueba las fachadas que mostraron mejor desempeño en las simulaciones energéticas, posteriormente se realizaron simulaciones finales calibradas con datos en sitio para los tres tipos diversos de fachada con mejor calificación, con el ánimo de generar información aplicable en el contexto de la construcción local.

Los autores del estudio encontraron que las fachadas de muro sencillo (sin cámara de aire) presentan desventajas en su desempeño térmico para climas cálidos. Demuestran que las fachadas dobles y ventiladas presentan un buen desempeño para clima cálido tropical, pero requieren medidas de protección adicionales con respecto a las ganancias térmicas, ya que por sí solas no son suficientes.

El aporte de esta búsqueda por parte de Luciani-Mejia et al. (2018), a la investigación se basa en la conveniencia de las fachadas ventiladas para el clima cálido tropical, así como la atención a las discrepancias y similitudes entre los datos de entrada y salida en los procesos de simulación y de ensayo en campo, que hacen insuficiente la simulación por si sola y necesario su calibración con datos de contexto en campo. En la tabla 1 se condensa a manera de resumen la comparativa entre los autores, el tema que abordaron y la metodología elegida por cada uno de ellos, la cual se usó como referencia para esta investigación.

NOMBRE DE DOCUMENTO O TESIS	FECHA	AUTORES	PROPUESTA DE DISEÑO	TIPO DE EDIFICIO	APROXIMACION	HERRAMIENTAS DE MODELADO	HERRAMIENTAS DE SIMULACION.	FABRICACION
Optimización Del Confort Térmico En Clima Ecuatorial Con Tecnologías Pasivas En Fachada. Caso Vis Cali.	2019	Walter Giraldo Castañeda	Optimización de Envolvente.	Vivienda Social.	Simulación-Experimental.	skechup	Openstudio. Enegy+	Manufactura
3d Printing Clay Facade Walls: Integrating Ventilation Systems Into Printing Process.	2019	Ammar Taher Ibrahim	Diseño de Envolvente.	Espacio teórico-oficina.	Simulación-Experimental.	Rhinoceros-Grasshopper	Rhinoceros-CFD Plugin, OpenFoam, Ansys fluent	Impresión 3d (M.A.)
Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales.	2018	Medina-Patrón, Natalia Escobar-Saiz, Jonathan	Caracterización de materialidades existentes.	Vivienda Social.	Simulación.	CC Weather Gen, Ecotect Analysis®	Ecotect Analysis®	N.A
Ecoenvolventes: análisis del uso de fachadas ventiladas en clima cálido-húmedo.	2018	Luciani-Mejía, S., Velasco-Gómez, R., & Hudson, R.	Ahorro energético, Envolventes opacas.	Espacio teórico.	Simulación.	Design Builder	Design Builder-Enegy+	N.A
Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control.	2018	Maria Valentini Sarakinioti, Michela Turrin, Thaleia Konstantinou, Martin Tenpierik, Ulrich Knaack.	Diseño de Envolvente.	Espacio teórico.	Simulación-Experimental.	Sin datos.	Sin datos.	Impresión 3d (M.A.)
Hydroceramics	2014	Rathee, Akanksha Mitrofanova, Elena Santayanon, Pongtida	Diseño de Envolvente.	Espacio teórico.	Simulación-Experimental.	Sin datos.	Sin datos.	CNC+Moldes

Tabla 1. Comparativa entre los Autores. Fuente: elaboración propia.

Metodología

De acuerdo a los objetivos planteados la metodología se desarrolla mediante pruebas de laboratorio y simulaciones computacionales como se describe a continuación:

Metodología para el Objetivo 1: Diseñar una Envolvente que Integre Múltiples Estrategias Bioclimáticas

El producto de este objetivo es el diseño y la elaboración de un prototipo de envolvente opaca en escala real, cuyas muestras servirán para las subsiguientes pruebas. Aborda la conceptualización de la envolvente a partir de las características ideales que esta debe contener para funcionar en un ambiente cálido-tropical. Debido a que también se busca es proponer el diseño de una envolvente de baja huella de carbono el uso de plástico reutilizado

es el material idóneo por sus características térmicas y físicas de resistencia y flexibilidad, por lo que se hizo uso de la impresión 3d como medio de modelación de las probetas.

Inicialmente, se trabaja con una revisión de la literatura para establecer las estrategias bioclimáticas más idóneas para el clima cálido tropical con el fin de integrarlas en una futura propuesta de diseño.

El diseño del modelo está restringido por dos condiciones iniciales inherentes al sistema de fabricación en impresión por manufactura aditiva; el primero corresponde al volumen de impresión de 220 x 220 x 250 mm que limita el tamaño de los componentes individuales de las probetas y el segundo es el material de impresión que consiste en un filamento de plástico PTEg conocido por sus prestaciones térmicas y físicas. Con el fin que los datos en las etapas de experimentación obtenidas de las probetas sean útiles a la simulación se incluye una tercera condición la cual consiste en que las probetas fabricadas sean en tamaño real.

Con los resultados de la búsqueda bibliográfica y las restricciones de tamaño en la fabricación del prototipo, se realiza la propuesta de diseño en ella buscando integrar las estrategias seleccionadas, integrándolas en un modelo tridimensional, cuyos componentes no excedan las dimensiones del equipo de impresión. Previendo que la parte de la envolvente que trabajará más será la cara expuesta al ambiente exterior se ejecutan pruebas extras, que consisten en simulaciones en donde se corrobora su capacidad de sombra con el software Ecotect 2011, la radiación anual que recibirá la superficie con la aplicación solar de Archiwizard.

Ya definida la forma y la posición de los componentes en la propuesta, se comienza la modelación en fusión 360 el cual es un programa CAD/CAM 3D para el desarrollo y la creación de objetos, mientras tanto cada uno de sus componentes será modelado y simulado con las herramientas que provee este programa.

Una vez las piezas estén modeladas y su comportamiento térmico haya sido verificado mediante simulación energética, se empezará su impresión en 3D, para lo cual se usa una

impresora Creality Ender 3 Pro, no sin antes corroborar que la elaboración de cada pieza no supere las 8 horas de impresión porque si no se vigila la misma, esta puede fallar y generar desperdicio de material.

Por último, las piezas son ensambladas en 3 prototipos, a los cuales se les agrega el foil de aluminio para el aislamiento reflectivo (AR), y las esferas de hidrogel que van en la capa secundaria al auto sombreado y que cumplirán la función de evitar el ingreso de calor por convección.

Metodología para el Objetivo 2: Determinar el aporte al confort térmico de la Envolvente en un ambiente VIS

El producto de este objetivo es el análisis de confort térmico del prototipo y de las líneas base seleccionadas en una vivienda VIS hipotética. Para ello el análisis se divide en dos fases; la primera se encarga de obtener el comportamiento térmico de las muestras desarrolladas en el objetivo anterior y una segunda en donde los datos obtenidos en estas pruebas se usarán como insumo para la simulación energética.

Para la fase 1, se determinó el valor U mediante el método de caja caliente, pero esta vez bajo condiciones controladas, para lo cual se reutilizaron las cajas adiabáticas de la anterior prueba y el rack de datos. La finalidad de esta prueba es suministrar los datos necesarios para la simulación.

El diseño de esta prueba se inspira en los trabajos de Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo (2008) y Giraldo C. (2018) en donde se propone una versión simplificada de fácil construcción, compuesta por un calorímetro en dos secciones; un lado caliente que contendrá la resistencia térmica dada por un bombillo incandescente de 60 W con dos sensores Dth11 para registrar la temperatura ambiente, así como la temperatura superficial del lado caliente del prototipo que se situará en la mitad, la segunda parte será la parte “fría” y solo contendrá el sensor de ambiente y el de superficie de la probeta en su lado frío.

También fueron preparados dos elementos de conductividad conocida, con el fin de calibrar las pruebas realizadas y así obtener resultados más fiables, para este caso; el poli estireno expandido de 50 mm de $0.7 \text{ W/ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ y vidrio traslúcido de 4 mm de $5.8 \text{ W/ (m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$. Se realizaron en concreto 6 ensayos, los cuales fueron consignados en tablas y comparados con sus conductividades obteniendo así el porcentaje de exactitud de las pruebas.

Cada componente de la envolvente fue ensayado bajo el mismo método y tiempo, se registró T_{amb} lado caliente, T_{sur} lado caliente, T_{amb} lado frío, T_{sur} lado frío, con esos datos y las ecuaciones del artículo de Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo (2008) se encontró la transmitancia térmica de cada componente de la envolvente. Los resultados fueron consignados en tablas y graficados para su mayor comprensión.

En la segunda etapa de este objetivo, se tomaron estos datos como el coeficiente de transferencia de calor y la geometría de la envolvente propuesta extraída de los prototipos, y se ingresaron Openstudio, el cual es un software libre de simulación energética hecho por el departamento de energía de Estados Unidos. En esta misma etapa se modeló el espacio de aplicación en dos apartamentos (VIS) el primero con condición adiabática en su piso y en su cielo para simular un apartamento tipo y un segundo con su cielo expuesto al exterior simulando una vivienda en el último nivel.

Para realizar este modelo geométrico de apartamento se revisó las indicaciones dadas por el DOE⁶ para la geometría de edificios multifamiliares junto con las determinaciones del documento técnico de soporte del código de construcción sostenible, con el fin de obtener un modelo más cercano a la realidad.

Una vez seleccionado el modelo, se procedió a la obtención y procesamiento de los datos climáticos tomados de la estación meteorológica ubicada en la Universidad del Valle sede Meléndez, se tomaron los datos registrados en el 2019 y se convirtieron en formato EPW⁷

⁶ Departamento de Energía de los Estados Unidos.

⁷ La especificación EnergyPlus Weather Data Format fue creada por U.S. Department of Energy.

con la ayuda del software Elements. Una vez con este archivo los datos fueron proyectados en el tiempo usando CCWorldWeatherGen el cual permite generar archivos de clima de cambio climático, para los próximos 60 años.

Ya con la proyección de datos y la geometría se comenzaron a hacer las simulaciones energéticas empezado por las líneas base y terminando con el prototipo con los datos obtenidos durante las pruebas en campo. De estas simulaciones en Openstudio se obtuvieron la T_{amb} , T_{rad} , T_{ope} y la infiltración, esta información fue graficada con la tabla de cálculo Confadapt-ASH055 desarrollada por Sol-Arq, la cual sirve para calcular los resultados de confort adaptativo de acuerdo con los criterios del ASHRAE-55. Así se mostró el confort térmico adaptativo del prototipo y de las líneas base para los años 2020, 2050 y 2080. Los resultados fueron consignados en tablas de Excel y graficados para su mayor comprensión.

Metodología Objetivo 3: Evaluar el Costo-Beneficio de la Envolverte Propuesta Comparada con las Existentes y con el Uso de Sistemas de Climatización Activas

Para conocer la idoneidad del prototipo, en el aspecto económico y ambiental este objetivo fue dividido en dos fases; en la primera se demostró la pertinencia económica con un análisis costo-beneficio y se llevó a valor presente neto, en la segunda fase se realizó un análisis de ciclo de vida para conocer el aporte de emisiones de dióxido de carbono durante la vida útil de las envolvertes evaluadas. Con el fin de realizar el análisis costo-beneficio fue necesario conocer el costo inicial de implementación de cada alternativa, para lo cual se realizó un análisis de precios unitarios y se multiplicó por el área de fachada de la geometría usada en la simulación. A su vez se establecieron los consumos proyectados durante la totalidad de la vida útil, tomando como base los resultados del confort adaptativo del objetivo anterior.

Se elaboró una tabla para cada una de las cinco alternativas, en donde se estableció el flujo de efectivo y su valor presente neto, tomando los ingresos (ahorros de energía, establecidos como las horas en confort térmico sin el uso de aire acondicionado) como los egresos, los costos de implementación y el gasto económico relacionado con el funcionamiento del aire acondicionado durante las horas de desconfort proyectadas.

Posteriormente y como complemento a este análisis se analizó con el valor presente neto y se hizo la comparativa en el período propuesto de 60 años, contrastándolo con el índice costo-beneficio obtenido, estos datos fueron graficados para encontrar las tendencias correspondientes y ayudar al análisis. Con la información obtenida en los análisis económicos anteriores y la proyección en el consumo energético se realizó un análisis de ciclo de vida, usando el índice del factor de emisión del margen combinado para Colombia, del Ministerio de Minas y Energía para obtener los kilogramos de dióxido de carbono.

Se graficó el análisis de ciclo de vida comparando la propuesta de envolvente contra las demás alternativas, incluyendo un sistema activo de climatización, que para el área de 60 m² requirió tres sistemas de aire acondicionado mini Split de 12.000 BTU. Al final se realizó un cruce de información entre los gastos por consumo eléctrico versus la cantidad de CO₂ producido en un periodo de 60 años. Con esta información fue posible determinar la competencia tanto económica como de huella de carbono del prototipo de las líneas base.

A continuación, la ilustración 14, se muestra el desarrollo de la investigación y las conexiones entre los diferentes datos que se van obteniendo, así como la relación las primeras etapas metodológicas con las posteriores. Cada capítulo responde al desarrollo de los objetivos secundarios, los cuales al resolverse desembocan en el objetivo principal que es **“Desarrollar y Evaluar un Prototipo De Envolvente Vertical Opaca Para Clima Cálido Tropical.”**

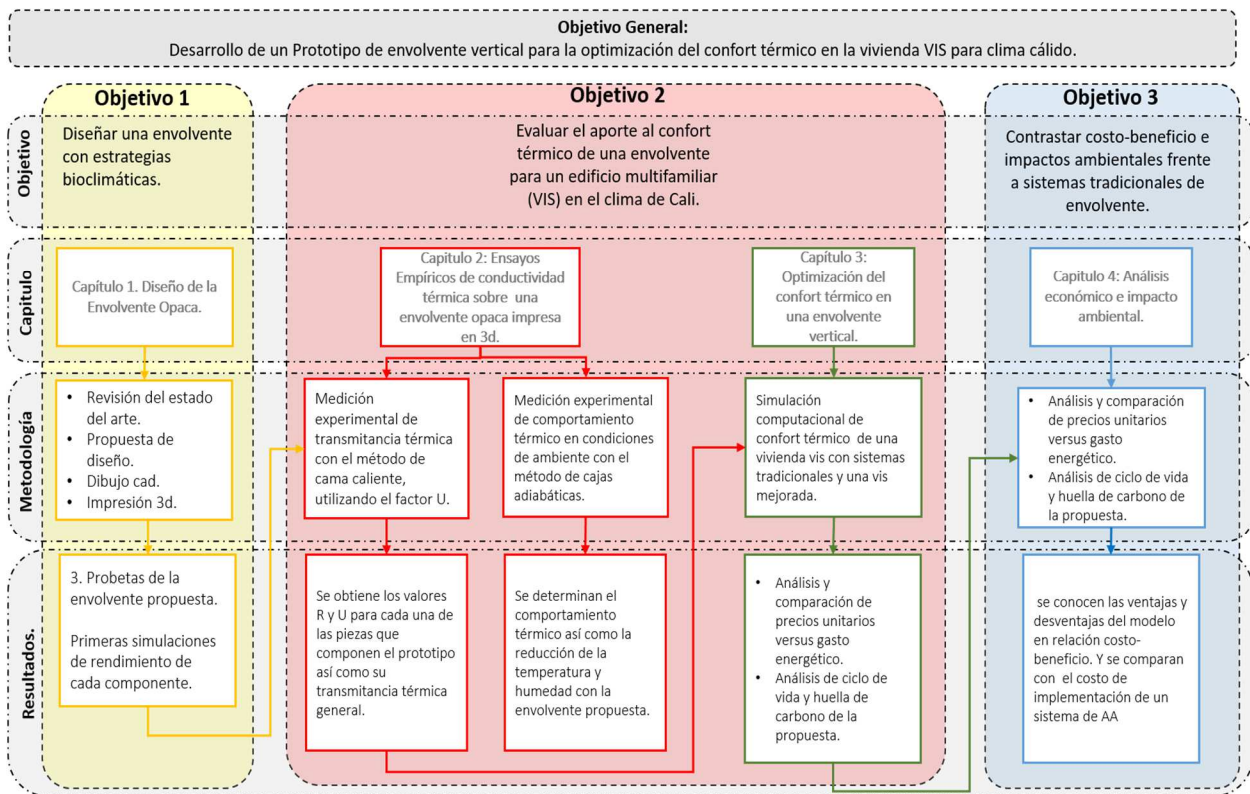


Ilustración 14. Desarrollo de la investigación, objetivos y las conexiones entre los diferentes datos. Fuente: elaboración propia.

Capítulo I. Diseño de la Envolverte Opaca

El presente apartado describe la conceptualización y diseño de la envolvente en tres partes; la primera aborda la conceptualización de la envolvente a partir de las características ideales que deben tener este tipo de elementos según los autores, la segunda parte enumera los componentes de la envolvente y las características por las que fueron elegidos, la tercera y última sección muestra el desarrollo de la idea, así como también el diseño de las probetas para las pruebas de resistencia térmica y pruebas en campo.

Conceptualización

Tanto en la proyectación arquitectónica como en el diseño de productos se requiere establecer las necesidades o los criterios a alcanzar. En la tabla 2 se han seleccionado algunos autores estableciendo un punto común entre estrategias para la envolvente en climas tropicales; como garantizar la ventilación natural e impedir las ganancias de calor del ambiente, ya sea por medio de su materialidad o por la protección solar de la misma.

De acuerdo a la normativa nacional en la resolución 0549⁸ se recomienda que el edificio en su conjunto debe volverse un buen disipador del calor, y uno de sus ejemplos es reducir el área de fachada en la orientación más crítica, lo cual no siempre es posible en edificios multifamiliares en altura que suelen tener una relación tener una relación de aspecto en planta de 1:2 o mayor. Por su parte Aksamija (2013) plantea que para disipar la energía térmica de la fachada es necesario garantizar un mayor control solar sobre la radiación directa, así como un mejoramiento en las características térmicas de la superficie.

⁸ Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda por la que obliga a los constructores de las principales ciudades de Colombia a cumplir parámetros de construcción sostenible en sus edificaciones.

Recomendaciones encontradas en el estado del arte para clima cálido húmedo-seco	
Lineamientos de construcción Sostenible en Colombia, Resolución 0549.	El edificio debe volverse un buen disipador de calor. Maximizar la sombra. Ej.; reducir la fachada en la orientación este-oeste Aumentar la ventilación natural. Ej.; posicionar las habitaciones hacia las zonas de mayor ventilación.
Aksamija(2013)	Control solar: protección solar en fachada de la radiación directa. Almacenamiento de calor; a través de la masa de los muros. conservación de calor; mejoramiento del aislamiento térmico. luz natural; uso de la luz natural e incremento del área de acristalamiento con su debida protección solar.
Givoni (1969)	Incremento de la ventilación natural. protección solar.
Varini (2014)	Minimizar las ganancias solares: con protección solar con el fin de reducir la demanda energética para ventilación y deshumidificarían del aire. Evacuar temperatura en superficies: con medios pasivos ya sea con flujos de aire o líquido para que la temperatura exterior no se acumule en el interior. Materialidad, que aprovechen las ventajas de aislamiento e inerciales para limitar el paso del calor en el día y liberarlo en la noche.

Tabla 2. Estrategias bioclimáticas en envolventes para el clima tropical. Fuente: elaboración propia.

Los autores coinciden en la necesidad de tener fachadas que puedan defenderse de las ganancias térmicas de forma pasiva, y evitar que la carga térmica existente ingrese al interior del espacio aumente durante el día. Varini (2016) expone con respecto a esta cuestión las ventajas de una envolvente estratificada en varias capas. Como se aprecia en la ilustración 15, consta de una capa expuesta al ambiente que actúa como “sombrija” ante la carga energética de la radiación solar sobre una segunda capa interior, la cual al no tener contacto con los elementos atmosféricos es más eficiente a la hora de proveer comodidad térmica, convirtiéndola en una opción de envolvente más versátil.

Otra característica deseable en el diseño de envolventes y el confort interno, es su fácil adaptación y actualización ante las condiciones de microclima. Ya que, estas últimas pueden cambiar con el paso del tiempo. Así lo señalan la Canadian Standards Association, 2001, la Australian Building Codes Board, 2006, y la International Standards Organization, 2000, cuando clasifican a la vivienda multifamiliar como un tipo de edificación de larga vida, que puede durar

entre 55 y 99 años. Autores como Hövels (2007) hablan de la necesidad que las fachadas sean elementos flexibles y de fácil actualización.

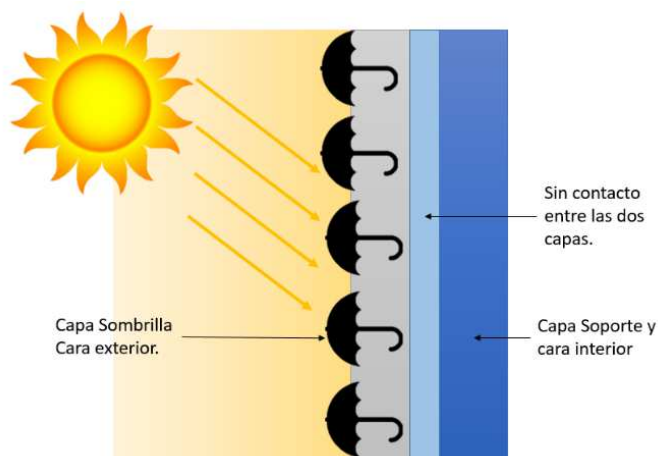


Ilustración 15. Dibujo conceptual propuesta por Varini 2014. Fuente: elaboración propia.

La Idea

De acuerdo con los planteamientos anteriores las características “ideales” para que una fachada garantice la comodidad térmica de los edificios en el trópico son; tener integrados sistemas de auto sombreado, aprovechar la iluminación natural, hacer uso de la ventilación natural, tener mejor resistencia térmica y ser hecha a partir de elementos que sean fácilmente adaptables y actualizables ante las condiciones de microclima. El mejor símil de este comportamiento se puede encontrar en la naturaleza.

Las estructuras biológicas son un gran ejemplo de respuesta a los estímulos externos, como se aprecia en la ilustración 16 ambas estructuras, la de la piel (izquierda), y la de la hoja (derecha), articulan un complejo sistema de células interconectadas que cumplen diversas funciones en una red cohesionada que se considera un sistema compacto resuelto en varias capas. Tomando en consideración estos ejemplos biológicos se puede hacer un paralelo con los componentes de la envolvente de un edificio, los cuales además de satisfacer otros tipos de confort térmico deben soportar una multitud de exigencias internas para el funcionamiento del programa en el edificio.

Esta idea no es novedosa, Mike Davies en 1978 lo propuso en su artículo “a Wall for all seasons” el cual vislumbraba un nuevo tipo de fachada con vidrio de altas prestaciones cuya composición semejaba a una piel orgánica en su funcionamiento adaptativo, polivalente y dinámico, todo ello en menos de un centímetro (ver ilustración 17). Penosamente a 43 años de este concepto la industria ha sido incapaz de replicarlo. No obstante, autores como Strauß (2013) menciona que la propuesta de Mike Davies ha sido usada como guía y punto de partida para repensar la actual tecnología de fachadas y estimular su desarrollo.

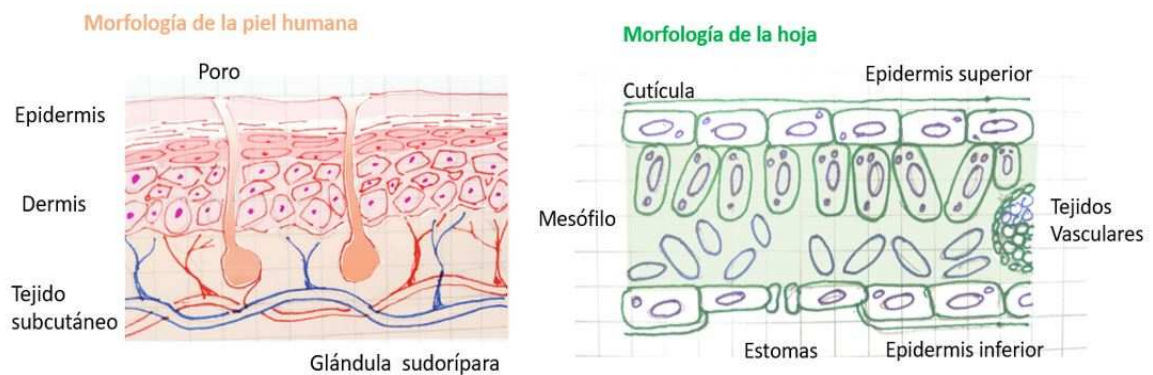


Ilustración 16. Dos tipos de superficies orgánicas; a la izquierda, estructura de piel humana, a la derecha la de una hoja. Ambas imágenes tienen en común estructuras complejas, órganos y células especializadas que desempeñan también diferentes funciones. Una de la más importantes, funcionar como un filtro entre el adentro y el afuera, bloqueando o transfiriendo energía entre el exterior y el interior, de acuerdo a la necesidad. Fuente: elaboración propia.

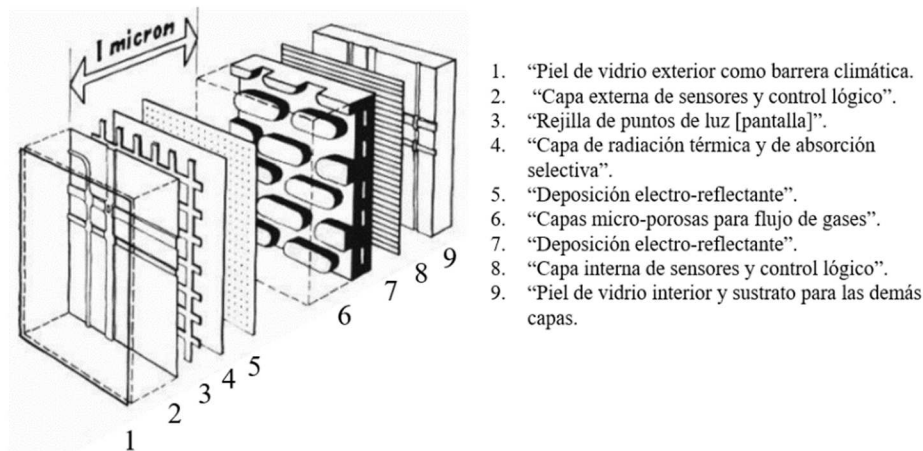


Ilustración 17. “Un muro para todas las estaciones”, modelo de envolvente adaptativa creada por Mike Davies en 1978, el cual planteaba superar los problemas energéticos derivados de las fachadas de vidrio miesiánicas. Este modelo es una analogía orgánica de estructuras naturales como las de la ilustración 2, en su condición de regulador de procesos. Fuente: RIBA Journal (1981).

En ilustración 18 y 19 se muestra el concepto de la envolvente. En primer lugar, la protección solar directa la cual evita la radiación directa, seguida por una capa compuesta de esferas de hidrogel con las cuales se pretende absorber humedad del ambiente para liberarla paulatinamente cuando las condiciones cambien a unas más secas y calurosas produciendo enfriamiento por convección, después una capa con foil de aluminio plegado en forma “acordeón” como aislamiento reflectivo, con las dimensiones mínimas para funcionar como cámara de aire. Todo esto configurado dentro de un soporte para alojar todas las capas mencionadas.

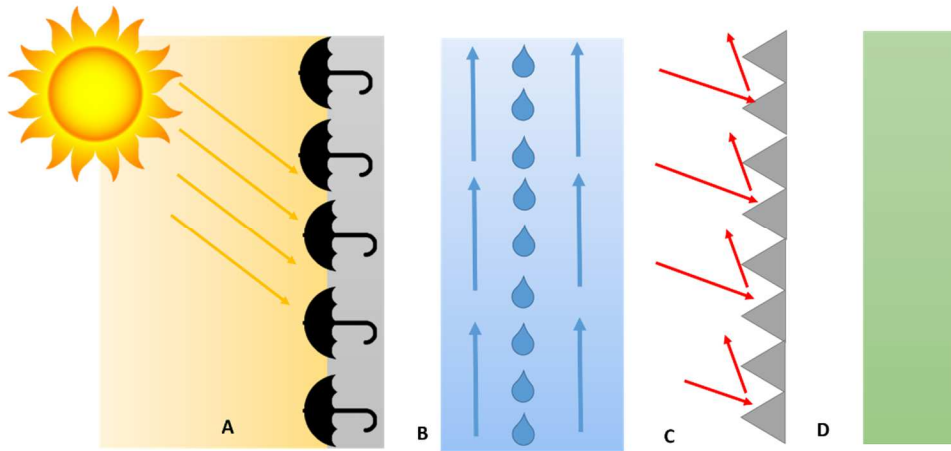


Ilustración 18. Explicación de los elementos de la envolvente; A auto sombreado para impedir el ingreso de radiación solar directa, B capa de hidrogel para enfriamiento por convección, C aislamiento reflectivo en foil de aluminio, D base de soporte y alojamiento de los componentes técnicos del edificio.

Como ultima estrategia se plantea una materialidad para todo el modelo que posea una buena resistencia térmica como el plástico PETG para evitar las ganancias de calor por conducción en todo el muro. Con este planteamiento se espera resolver algunos de los desafíos que son comunes a las fachadas en el trópico planteado en el apartado anterior. a continuación, la materialización de la idea junto con la descripción y justificación de cada componente.

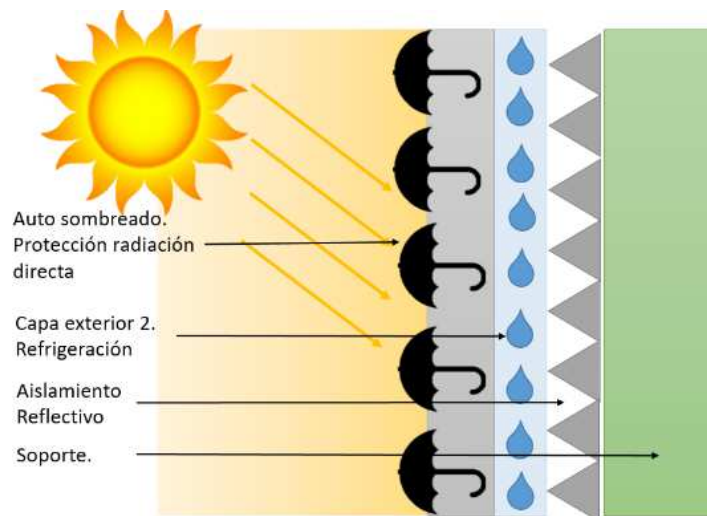


Ilustración 19. Concepto de diseño de fachada adaptada para el trópico, tomando como núcleo el aislamiento reflectivo planteado por Giraldo (2018) y las ideas de Mike Davies 1980 y Varini 2014, entre otros, contenido en un espesor de un muro típico de 180 mm. Fuente: elaboración propia.

Componentes de la Envolverte

Para la fabricación de los prototipos se debe tener en cuenta el volumen de impresión 3D del equipo en este caso de 220 x 220 x 250 mm y el espesor promedio del muro de cerramiento en fachada de 150 mm. Con estas dos condiciones se obtiene un diseño de escala real y una mayor certeza de los datos experimentales. El resultado se puede ver en la ilustración 20 que muestra el despiece final de todos los elementos para ser armados en un volumen de 210 x 210 x 180 mm. en este apartado se describe la teoría detrás de cada una de las capas, así como su razón para ser incluida en la propuesta.

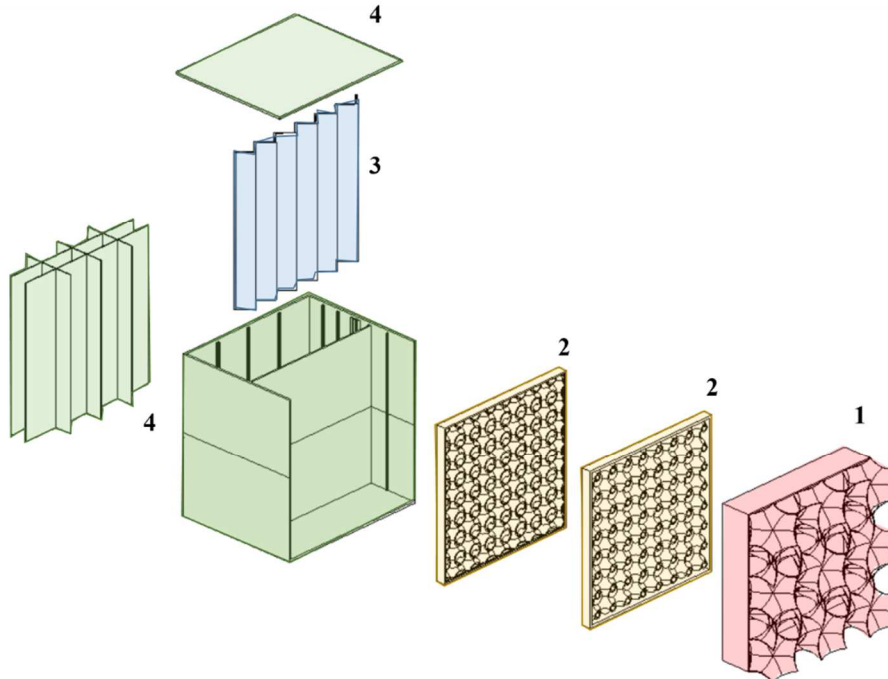


Ilustración 20. Componentes de la Envolverte Opaca; 1 Auto sombreado, 2 Hidrocapa, 3 Aislamiento Reflectivo, 4 Base. Fuente: elaboración propia.

Auto Sombreado (AS)

Andrade Santos et al. (2020) describe el auto sombreado como un elemento que protege de la radiación solar directa y que al mismo tiempo provee ventilación en la envolvente, potencia la ventilación y el enfriamiento por convección entre ambas capas interviniendo o facilitando las cargas térmicas, a través de la configuración de la pared exterior por medio de los flujos de aire. La escala, la forma y la permeabilidad de este elemento en fachada terminan por generar una imagen, una cualidad subjetiva fácilmente reconocible que puede usarse como identidad en el diseño.

No obstante, dicha estrategia presenta una desventaja, citada por Jeyakumar et al. (2017) concerniente a los efectos de puente térmico por el uso de materiales de poca resistencia térmica. Sumado a esto, autores como Misawa et al. (2015) consideran que los diseños habituales carecen de la posibilidad para aumentar la rigidez de la estructura de la fachada, por lo que se requiere que no solo el auto sombreado sea auto portante, sino que además aporten a la rigidez estructural. En este caso la manufactura aditiva que provee un enfoque que se centra en la forma, la estructura y propiedades innovadoras de nuevos materiales abre una posibilidad ante ambas situaciones.

Buscando incorporar estas propiedades de la impresión 3D y mejorar las desventajas de los auto sombreados típicos, en la envolvente opaca se propuso usar una estructura porosa repetitiva basada en giroides, como se aprecia en la ilustración 21. Esta es una estructura súper fuerte y ligera, que fue descubierta por Alan Schoen en 1970, y desde entonces se ha indagado en sus aplicaciones y características en múltiples campos, como lo es; el muy alto desempeño mecánico estudiado por Chen et al. (2019), la baja conductividad térmica demostrada por Piccioni et al. (2020), las interesantes propiedades de permeabilidad y conductividad térmica encontradas por Luo et al. (2020) en los campos de almacenamiento y la conversión de energía.

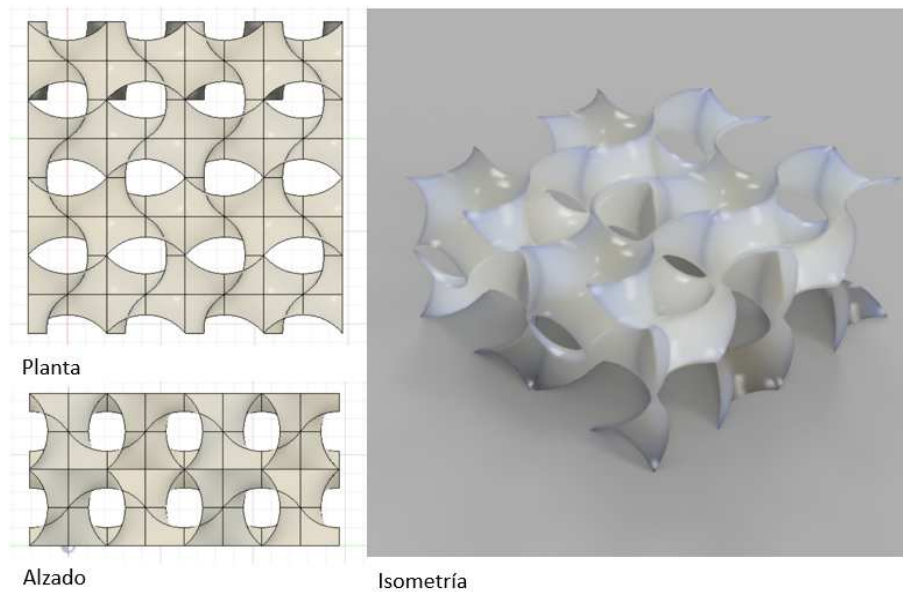


Ilustración 21. Estructura usada como auto sombreado compuesta por giroides. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se puede apreciar la eficiencia del giroide como elemento de auto sombreado, al compararlo con otros sistemas de protección solar con las mismas dimensiones y orientación, para este caso Este-Oeste. Se evaluaron formas sencillas, la persiana horizontal y de forma reticular como; calado en cuadrícula, rombo y panal. Se valoraron en función de cobertura ante radiación, porcentaje de sombra, cantidad de material y tiempo empleado durante su fabricación. La simulación y comparativa demostró que el giroide constituye una buena opción en lo que se refiere a capacidad de protección y gasto de material comparado con el resto de alternativas. Esto se puede apreciar en mayor detalle en la ilustración 22.

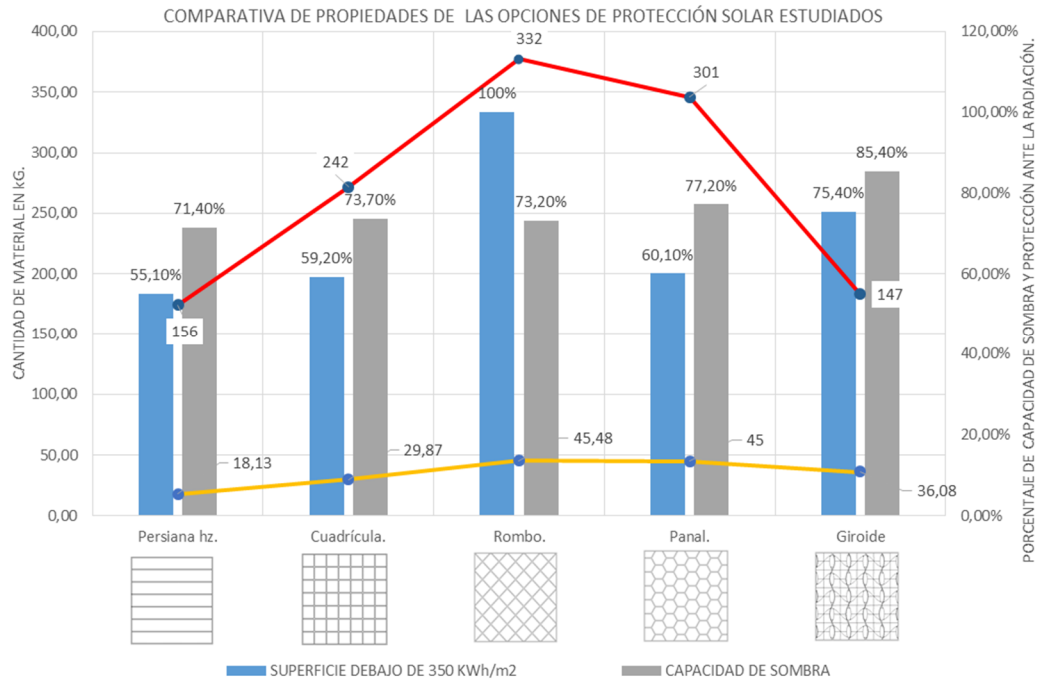


Ilustración 22. Gráfica comparativa entre las opciones de protección solar estudiada.
Fuente: elaboración Propia.

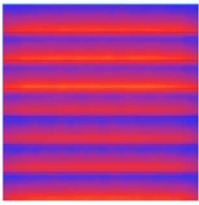
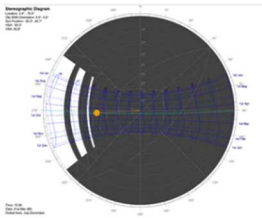
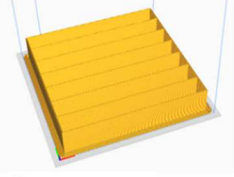
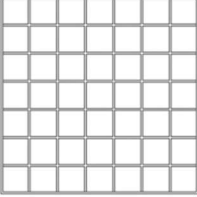
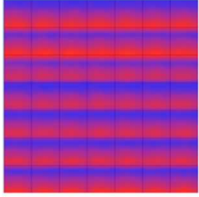
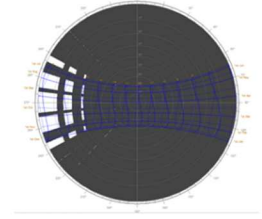
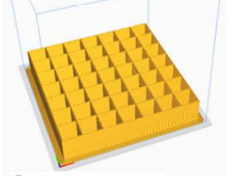
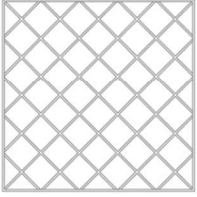
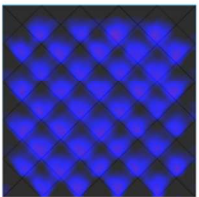
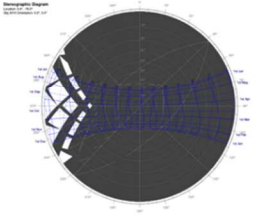
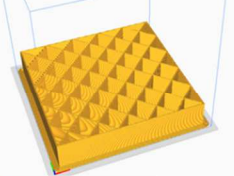
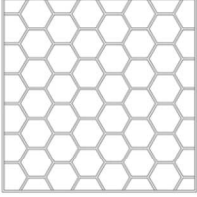
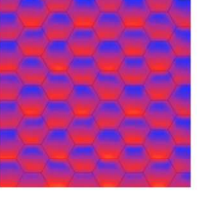
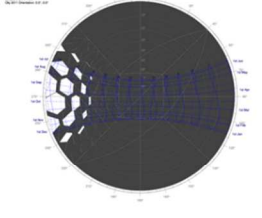
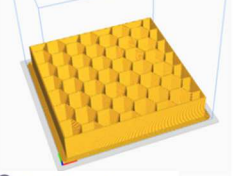
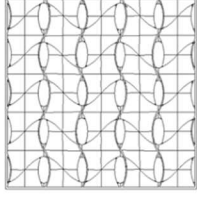
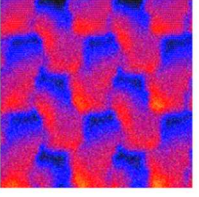
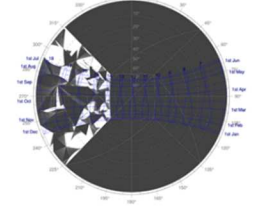
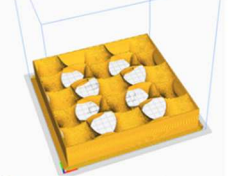
	Alzado	Corte	Radiación Anual Superficie. por debajo de 40 W/m2	Máscara de sombras	Construcción en Cura Tiempo y Cantidad de material
Persiana.				 55.10% 71.40%	 ⌚ 18 hours 8 minutes 156g - 51.01m
Cuadrícula.				 59.20% 73.70%	 ⌚ 1 day 5 hours 52 minutes 242g - 79.13m
Rombo.				 100% 73.20%	 ⌚ 1 day 21 hours 29 minutes 332g - 108.82m
Panál.				 60.10% 77.20%	 ⌚ 1 day 21 hours 0 minutes 301g - 98.60m
Giroide.				 75.40% 85.40%	 ⌚ 1 day 12 hours 5 minutes 147g - 48.16m
					147 g.

Tabla 3. Comparativa entre varios tipos de sombreado versus el propuesto por giroides. Fuente: elaboración propia.

Enfriamiento Evaporativo con Hidrogel

Sadek & Mahrous (2018) define el hidrogel como una red polimérica reticular, afín al agua, que aumenta considerablemente su volumen en presencia de esta, como se aprecia en la ilustración 23, pero que mantiene su forma hasta alcanzar un equilibrio fisicoquímico. Según el mismo autor, muchos materiales tanto naturales como sintéticos, se ajustan a la definición de hidrogeles, por lo que han recibido una atención considerable en los últimos 50 años debido a su amplia gama de aplicaciones.

Los hidrogeles constituyen una tecnología barata y asequible que se puede encontrar en los componentes absorbentes en pañales, medicamentos, y hasta productos agrícolas. En lo que respecta a su aplicación en la arquitectura, el estado del arte cuenta con numerosas investigaciones sobre su aplicación; como la capacidad de reducir la carga térmica en superficies horizontales. Cui et al. (2016) demostró que usado de esta manera el hidrogel, podía reducir el consumo de electricidad orientado al aire acondicionado en 290 kW al año, así como las emisiones de CO₂ asociadas de 160 kg.

Rathee et al. (2014) utilizó el hidrogel y un panel de cerámica y textil para formar una estructura sándwich en capas, cuya principal función consiste en disipar el calor por evaporación, con reducciones en temperatura al interior de hasta 4.4 °C. Vanegas & Sierra (2017) retomaron este concepto añadiendo sus propias modificaciones y obteniendo reducciones de hasta 6.4 °C. Se propone entonces, alinearse con estos hallazgos e implementar una solución de hidrogel como segunda capa en una estructura como la de la ilustración 24. Este elemento que a su vez contendrá las cápsulas de hidrogel, disipará la energía calórica que haya podido acceder desde el auto sombreado y de igual manera la humedad.

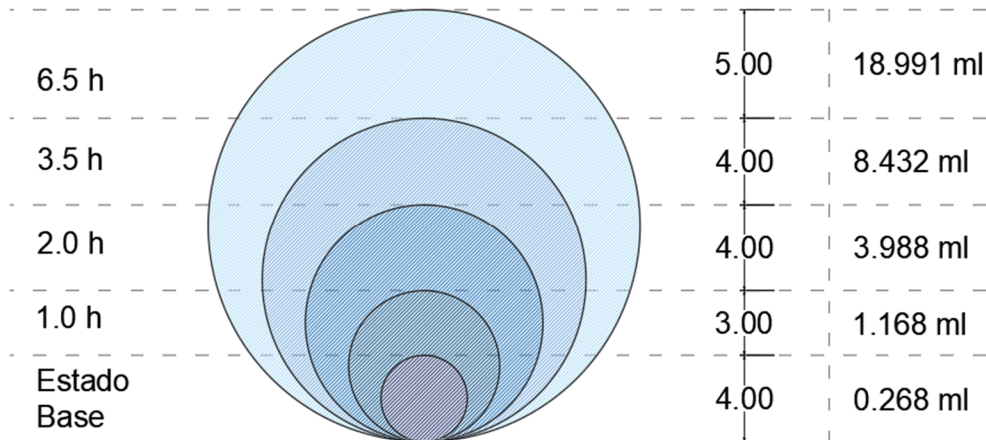


Ilustración 23. Basada Rathee et al., (2014) Los hidrogeles funcionan como redes tridimensionales de polímero, en donde el agua llena el espacio entre moléculas. A través de su enorme capacidad para recolectar y liberar humedad pueden contener hasta el 90% de su peso en este líquido aumentando hasta 5 veces su volumen. Fuente Rathee et al., (2014).



Ilustración 24.. Giroide Shwarz P. (1865) usado de forma repetitiva para alojar el hidrogel. Fuente: elaboración propia.

Aislamiento Reflectivo

El aislamiento reflectivo también conocido como barrera radiante, son aquellos elementos que impiden la ganancia de calor por radiación, sin embargo, es poco efectiva frente a las otras formas de transmisión de calor, como la conducción y la convección. La capacidad de reflejar o absorber la radiación determina su efectividad como barrera radiante, para la ASTM⁹ (2018) un aislamiento de este tipo es efectivo, si su reflectividad¹⁰ es igual o mayor a 0.9 y su valor de emisividad¹¹ es igual o menor a 0.1. Por lo que, materiales reflectantes como el foil de aluminio en combinación con otros materiales de soporte como películas de plástico y cartón se vuelven los más comunes en su fabricación.

El foil de aluminio es el material comercial más utilizado para cumplir la función de barrera radiante debido a su bajo coste y fácil asequibilidad. Viene en presentaciones de entre 6 y 80 micras y es usado en diferentes industrias como la aeronáutica, la textil y en la construcción; como película para ventanas, aislamiento de cubiertas u otras superficies. Sus valores de reflectividad están en el orden de 0,95 con una emisividad de 0.05. De acuerdo a Mason (2002) estas características lo convierten en candidato ideal para llevar a cabo la función de barrera radiante. Por otro lado, si se combina con una capa de aire contenido de 1 a 2 cm, o con una capa de aislamiento tradicional como fibra de vidrio, espuma o poli estireno expandido puede mejorar su desempeño de aislamiento térmico.

Entre las virtudes y desventajas de la elección de este tipo de aislamiento, Lee et al. (2016) destaca del aislamiento reflectivo; su reducido espesor, su gran durabilidad, su estabilidad dimensional y química. Por otra parte, entre sus desventajas se hallan la pérdida de eficiencia en el tiempo si se encuentra expuesto al ambiente exterior, debido a que la oxidación

⁹ Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés.

¹⁰ Reflectividad es la fracción de radiación incidente reflejada por la superficie.

¹¹ Emisividad es la capacidad de un objeto de emitir energía infrarroja, esta es calculada por la proporción de radiación térmica emitida por la superficie debido a la diferencia de temperatura con el entorno.

en su superficie puede afectar la reflectividad y la emisividad inicial. Otra desventaja si se quiere ver como tal, es que debe ser complementado con otros elementos que impidan las ganancias de calor aparte de la radiación.

A fin de implementar esta estrategia en la propuesta de fachada opaca, se profundizará en la investigación de Giraldo (2018), la cual acierta en la configuración de una barrera radiante similar al cartón corrugado conformando por dos cámaras de aire reflectivas y una tercera que los une en forma de acordeón, (ver figura ilustración 25-A) una forma de mejorar el comportamiento térmico en superficies verticales, reduciendo la temperatura radiante (T_r) en un 47.23%, teniendo la mejor relación espesor transmitancia comparado con materiales tradicionales como el Poliuretano y el Aerogel conocidos por su buena resistencia térmica.

En la ilustración 25-B se puede apreciar la versión de esta estrategia para acoplarse a las dimensiones y a su función dentro del prototipo. Como se puede observar no se hicieron mayores modificaciones en cuanto al concepto, pero si fue necesario incluir soporte para el foil de aluminio en acordeón. También se realizó una simulación térmica como se aprecia en la Ilustración 26, en la que se expuso la pieza individual tal como se va a instalar frente a una temperatura típica exterior de 31 °C, se encontró una reducción de 11 °C, lo cual corrobora de forma simulada su efectividad como barrera radiante, cuando se combinan con materiales como el plástico y con una capa de aire.

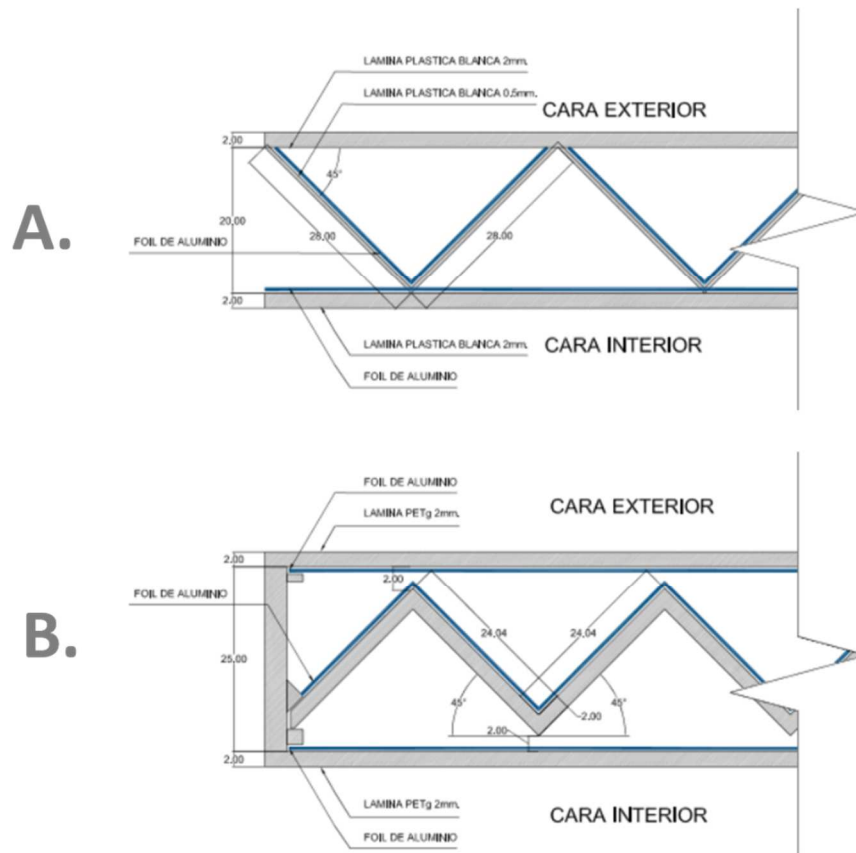
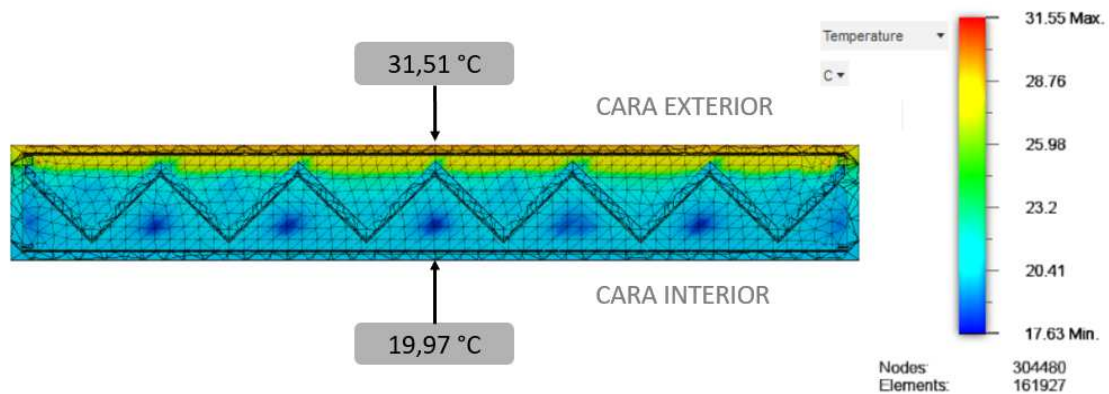


Ilustración 25. Sección A. Giraldo (2018) solución constructiva de aislamiento reflectivo. Planta B. propuesta de aislamiento constructivo para su impresión 3D. E inserción en el modelo de fachada opaca. Fuente: elaboración propia.



$$R=15,27 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$U=0,06 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Ilustración 26. Simulación Térmica en FUSION 360 licencia estudiantil. Se aplicó sobre la carga exterior una carga directa de 300 W/m². Fuente: elaboración propia.

Soporte

El cerramiento propuesto está catalogado dentro de la NSR-10 (norma sismo resistente colombiana) en su apartado B-2 como elemento vertical no estructural, ya que está pensado como una fachada fija, anclada a los entrepisos o ensamblada sobre elementos estructurales verticales. Por lo que, no debe soportar más que su propio peso el cual es 9 kg por metro cuadrado, así como, las cargas que el viento efectúe sobre esta.

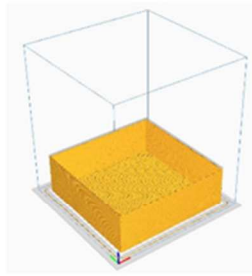
El componente nombrado como base no está por fuera de estos requerimientos. Porque, como su nombre lo indica es la base y soporte de las diferentes capas descritas la que se unirá a los entrepisos o estructura adicional requerida. Por lo que se simularon tres alternativas; una base con solo aire en su interior, una segunda base con ocho celdas y una tercera de doce. Con cada una se corroboró su resistencia térmica y estabilidad estructural, la cantidad de material y energía utilizada en forma de material y tiempo, como se aprecia en la tabla 4.

Los elementos en tamaño de probeta fueron sometidos a presiones de 117.8 N en sentido vertical y 490.33 N en sentido horizontal, que equivalen al peso propio en una altura de entrepiso de 2.40 m y una carga de viento de 2.78 m/s esperada para un 5to piso. Como se aprecia en el segundo renglón de la tabla 4. Eligiendo la alternativa de doce celdas que menor deformación presentaba, se sacrificó un gasto mayor de material en favor de ingresar un nuevo elemento de ensamblaje de piezas y dar más rigidez al conjunto. Con un aumento en referencia a la primera alternativa del 44% el gasto de material y 47% de tiempo y disminución en la resistencia térmica de 185.18 m²·C/W a 126.1 m²·C/W.

Comparativa entre diferentes tipos de rellenos verticales

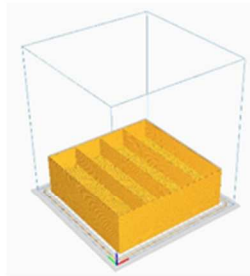
Sin Relleno	Relleno de 8 celdas	Relleno de 12 celdas
-------------	---------------------	----------------------

Cantidad de horas y gasto de material por cada alternativa.



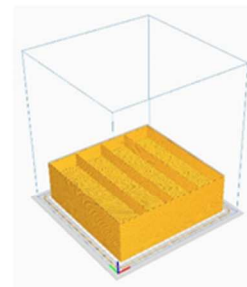
🕒 1 day 8 hours 53 minutes

📏 275g · 90.08m



🕒 1 day 19 hours 11 minutes

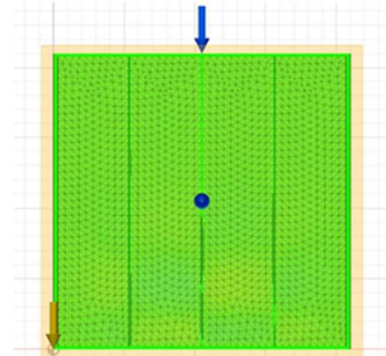
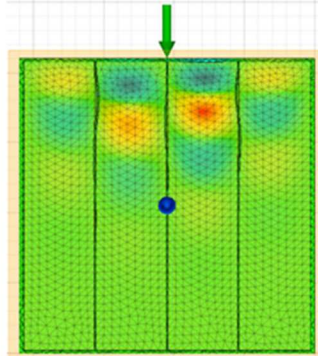
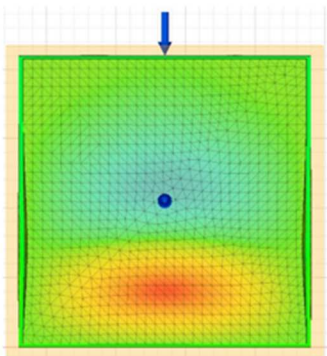
📏 352g · 115.23m



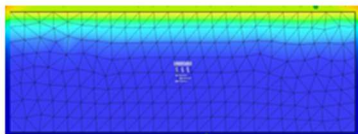
🕒 1 day 23 hours 59 minutes

📏 395g · 129.21m

Deformación 117.68 N de carga vertical por peso propio y 490.33 N de carga lateral por vientos.

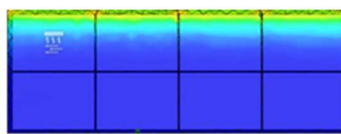


Valores de resistencia termica y valores U para cada alternativa.



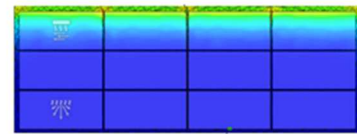
$R=185,18 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$

$U=0,0054 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$



$R=135,54 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$

$U=0,0073 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$



$R=126,1 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$

$U=0,0079 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$

Tabla 4. Comparativa entre simulación de tipos de relleno para el soporte. La primera fila corresponde al gasto de material y tiempo de impresión en un software de laminado, la segunda fila corresponde a las fuerzas verticales de peso propio y a las cargas de viento en donde las partes amarillas y rojas indican la mayor deformación, y la tercera corresponde al paso de calor a través de cada pieza y su resistencia térmica en donde se entiende que a razón de existir una mayor conexión entre superficies debido al número de celdas que hacen de “puente térmico” la opción de 12 celdas sea la que menor resistencia térmica presenta entre las alternativas. Fuente: elaboración propia.

Fabricación Digital

Tanto como el modelado y la fabricación digital son herramientas poderosas para crear representaciones tangibles más allá de la imagen en la pantalla, mediante el uso de software 3D de modelado, la Impresión 3D, escaneado 3D, CNC, corte láser y robótica. La selección de la impresión 3D como método de fabricación de las probetas obedece a la intención de usar el PETg como elemento de construcción de fachadas y contribuir así con la reducción de polución por plásticos de un solo uso, al tiempo que se aprovechan las bondades térmicas del material como estrategia para disminuir las ganancias térmicas en la edificación.

La fidelidad de la reproducción depende del método de fabricación y de las condiciones impuestas en cada proceso como; cantidad reducida de elementos a fabricar, tiempos extendidos en los procesos de impresión, geometrías ajustadas que satisfagan las limitaciones físicas, estructurales del material utilizado y del método empleado. Estas restricciones hacen que diseñar y asignar un objeto virtual a una representación imprimible y que esta a su vez dé como resultado un artefacto físico, no sea una tarea sencilla. En este apartado se describirá el proceso, herramientas y condiciones que se tuvieron en cuenta en el diseño y fabricación de los prototipos de la envolvente vertical opaca.

El proceso general utilizado en este trabajo se encuentra en la ilustración 27. En primer lugar, fue necesario realizar un diseño que integrara los conceptos revisados anteriormente junto con las limitaciones de la fabricación aditiva, como el tamaño y volumen de impresión dado por la impresora 3D, la división del prototipo en piezas más pequeñas, así como la alineación y sujeción entre estas durante el armado. Seguidamente con un esbozo de estas ideas el diseño fue trasladado a CAD con el fin de ensayar, visualizar y comprobar los elementos del diseño y su posterior exportación a un software de “laminado” que permitió controlar los aspectos más técnicos de la impresión como; coordenadas, velocidad,

temperatura, creación de soportes, resoluciones necesarias para cada una de las piezas y así finalmente ensamblar cada prototipo.

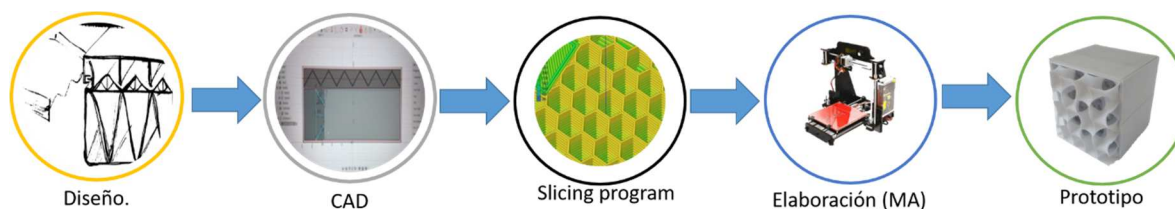


Ilustración 27. Pasos adoptados para el desarrollo del prototipo. Fuente: elaboración propia.

El software CAD empleado fue F360 de Autodesk, el cual es un programa de modelado 3D para el desarrollo y manufactura de productos. Con esta herramienta se realizó el dibujo, ensamblado y algunas simulaciones de estrés y de cargas térmicas sobre las diferentes piezas. Para su posterior exportación a CURA, un software de laminado 3D, empleado comúnmente para transformar los modelos en instrucciones que la impresora pueda seguir, y así llevar a cabo la fabricación.

La impresora empleada fue una Creality Ender 3 Pro, la cual utiliza el método de deposición de material fundido FDM (Fused Deposition Modeling) también conocido como FFF (Fused Filament Fabrication). Dicha impresora en su momento presentó la mejor relación calidad/ precio al alcance de esta investigación. Ya que, es un producto dirigido a aficionados, creadores y principiantes educados en la impresión 3D, por lo que su configuración, instalación y puesta en marcha fue bastante sencilla. Dentro de las características dadas por la web del fabricante posee; un volumen de construcción de 220 x 220 x 250 mm, un consumo de 0.5 KW/h, y la posibilidad de trabajar con distintos tipos de filamentos flexibles.

En lo que respecta al material de impresión se seleccionó el PETG conocido como poliéster de glicol, un termoplástico usado comúnmente en la industria de envases de bebidas y alimentos. Es popular en la fabricación aditiva, debido a su resistencia a los impactos, facilidad de impresión y resistencia química como se aprecia en la tabla 5, además posee un buen

comportamiento en exteriores, a diferencia del PLA conocido como ácido poliláctico, que bajo condiciones de lluvia, frío o calor se deteriora rápidamente. En durabilidad es tan resistente como el ABS¹², pero con menor gasto energético y producción de CO₂ por kg.

Material	Conductividad W/(m*K)	Dureza KJ/m2	CO2 por Kg	Durabilidad *	facilidad de impresión	Resistencia al agua	Resistencia a la fatiga	Resistencia a Solventes
PETG	0.29	7.3	2.15	4/10	9/10	si	si	si
PLA	0.13	16.2	0.5	8/10	9/10	no	no	no
ABS	0.17	3.3	3.46	8/10	8/10	si	si	no

*Durabilidad refiere a la combinación de; calor, fatiga, exposición UV y resistencia Química.

Tabla 5. Comparación entre los principales materiales usados para la fabricación aditiva. Fuentes: (Ultimate 3D Printing Material Properties Table, n.d.), Technical Data Sheet www.sd3d.com, y Title Unit Emisión factor Canadá government.

Comparando la producción de CO₂ entre filamentos se sitúa en un rango medio con 2.5 kg de CO₂ por Kg de material virgen, entre los 3.46kg de CO₂ del ABS derivado del petróleo y del PLA fabricado a partir de elementos orgánicos como el maíz y la caña de azúcar. De acuerdo a las estimaciones del PET Recycling Team., (2017). La huella de carbono de este material podría reducirse a partir de su reciclaje alcanzando una huella de 0.45 kg CO₂ equivalente por kilogramo. Por otra parte, está calificado como V2 de acuerdo al estándar estadounidense de resistencia al fuego, lo que quiere decir, que la combustión termina en 30s en una superficie vertical, después de remover la flama, a diferencia del ABS que libera vapores tóxicos durante la combustión o el PLA que arde fácilmente.

Antes de la impresión de las piezas finales fue necesario realizar una prueba de retracción como se ve en la fotografía de la ilustración 28, cada vez que se ingresaba un nuevo filamento a la impresora. Una de las desventajas de comprar a varios proveedores, es que las características del material cambian ligeramente, ya que, dependen de las condiciones con las

¹² Acrilonitrilo Butadieno Estireno.

que fueron almacenados. La ventaja de esta prueba es que permite mejorar la calidad de la impresión y eliminar el desperdicio de material por goteo o hilos, mediante el cambio de parámetros como la temperatura de extrusión, velocidad del cabezal, distancia y velocidad de retracción.

Esta prueba se complementó con impresiones del prototipo al 50% del original para mejorar la configuración de la impresora, identificar problemas en el armado y ensamblaje de las piezas que componen cada prototipo, ya que, cualquier error posterior conllevaría la pérdida en tiempo, material y energía, debido a que no se contaba con equipos para el reciclaje y recuperación del material perdido. Sin embargo, a pesar de las precauciones, se tuvieron que hacer ajustes posteriores en el tamaño de las piezas, para evitar accidentes como los de la ilustración 29, en la que se imprimía una pieza de gran tamaño cuya duración era de 10 horas. Una de las desventajas de las impresoras 3D de gama media, es que no cuentan con sensores para cuando hay un error o se acaba el filamento, por lo que necesitan vigilancia intermitente del operario, esto llevó a que todas las piezas tuvieran una duración en su fabricación menor a 8 horas.

Finalmente, fueron impresos 3 prototipos, como se aprecia en la ilustración 30, armados con 9 piezas cada uno y un peso de 1.06 kg respectivamente, con dimensiones de 21 cm de alto, 21 cm de ancho y 18 cm de profundidad, para una densidad de 28 kg/ m³, estos prototipos se usarán en las pruebas de caja caliente.

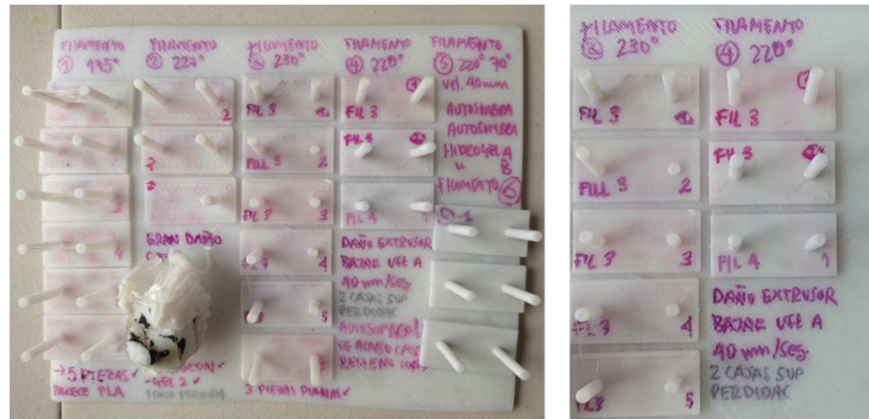


Ilustración 28 Fotografía de las Pruebas de Retracción efectuadas.
Fuente: elaboración propia.



Ilustración 29. Fotografía a la izquierda, normal funcionamiento de la impresora fabricando el auto sombreado, a la derecha error en la fabricación por dejar la impresora funcionando sin supervisión al correrse el volumen que fabricaba. Fuente: elaboración propia.

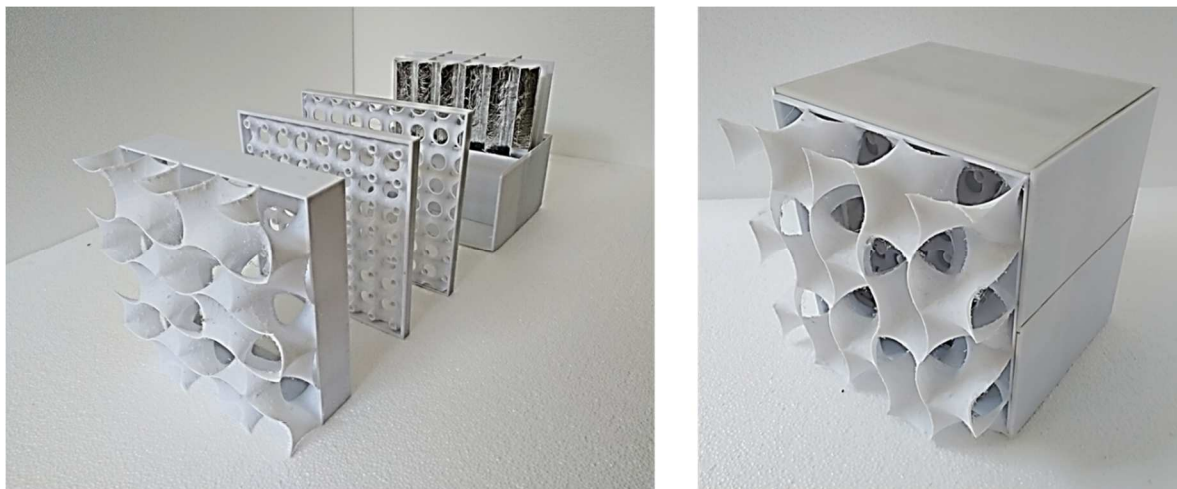


Ilustración 30. Producto final armado, probeta del prototipo de envolvente diseñada para el trópico.
Fuente: elaboración propia.

Capítulo II. Ensayos Experimentales de Transmitancia Térmica Sobre un prototipo de Envolverte Opaca

El presente capítulo está dedicado a encontrar la conductividad térmica del prototipo bajo el método de estimación experimental desarrollado por Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo en 2008 y de Giraldo C., (2018). Los datos aquí obtenidos sirvieron como entrada en la calibración de las simulaciones computacionales descritas más adelante.

Determinación de la Transmitancia Térmica del Prototipo:

Método Caja Caliente

Objetivos de la Prueba

El objetivo de este experimento es encontrar la resistencia R del prototipo.

Diseño del Experimento

El método de caja caliente se utiliza principalmente para mediciones de transferencia de calor en elementos homogéneos, de acuerdo a Lucchi et al. (2018). La literatura científica acepta y normaliza este procedimiento para verificar el comportamiento de materiales, en especial los que son compuestos por múltiples capas. El diseño de esta prueba propone una versión simplificada de fácil construcción inspirándose en los trabajos de Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo (2008) y Giraldo C. (2018).

Consiste en un calorímetro como se muestra en la ilustración 31 y 32. Este se encuentra compuesto por dos partes; una en donde se encuentra el lado caliente “caliente” en el que se instaló la resistencia térmica para este caso un bombillo incandescente de 60 W junto con dos sensores DHT11 para el registro de la temperatura ambiente y la superficie de la probeta de ese lado y una segunda sección “fría” sin nada más que dos sensores como la primera para registrar la temperatura del ambiente interior y la temperatura superficial de la probeta.

Laminas de poliestireno expandido 10 cm.
Blindados con foil de aluminio por ambos
lados.

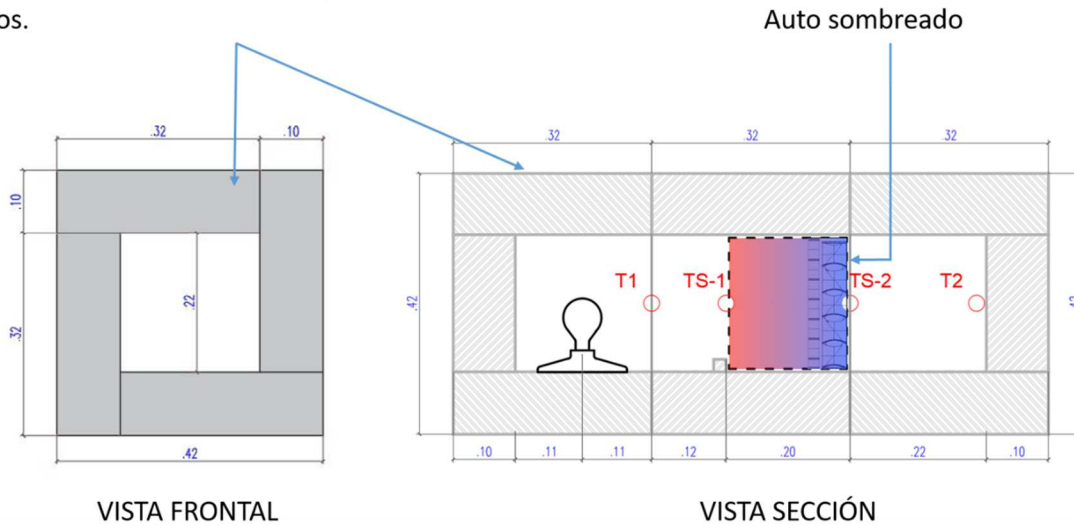


Ilustración 31. Diseño de la Caja Caliente, en donde se aprecia la ubicación de la probeta, así como los diferentes sensores de captura de datos. Fuente: elaboración propia.

Se instalaron cuatro sensores de temperatura para el registro simultáneo de la cámara caliente a la cámara fría, y la temperatura superficial del lado caliente y las temperaturas del aire en cada una de las cámaras, estos datos fueron procesados en hojas de cálculo para realizar el cómputo del valor U.

Debido a que la temperatura producida por la resistencia era mayor a la tolerancia térmica de los materiales del dispositivo y las probetas, se realizaron ensayos para determinar el tiempo de exposición mínima para alcanzar la condición en donde la diferencia entre temperatura interior y exterior fuera como mínimo 20 °C. Así como también el período de tiempo necesario para lograr una condición equilibrada con el ambiente y tener la misma temperatura al inicio de cada prueba.

Entrada:

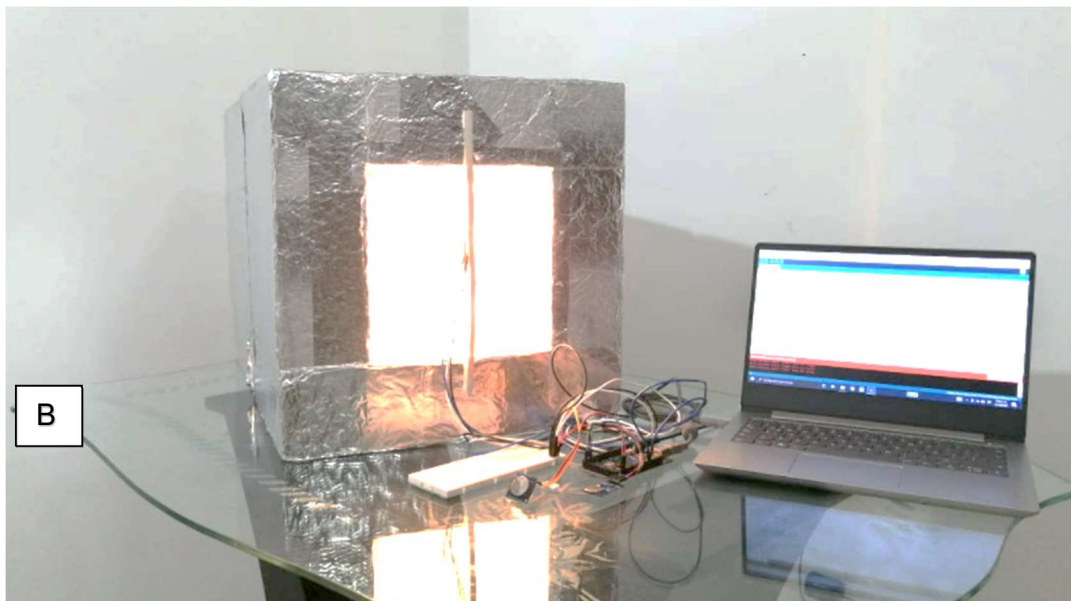
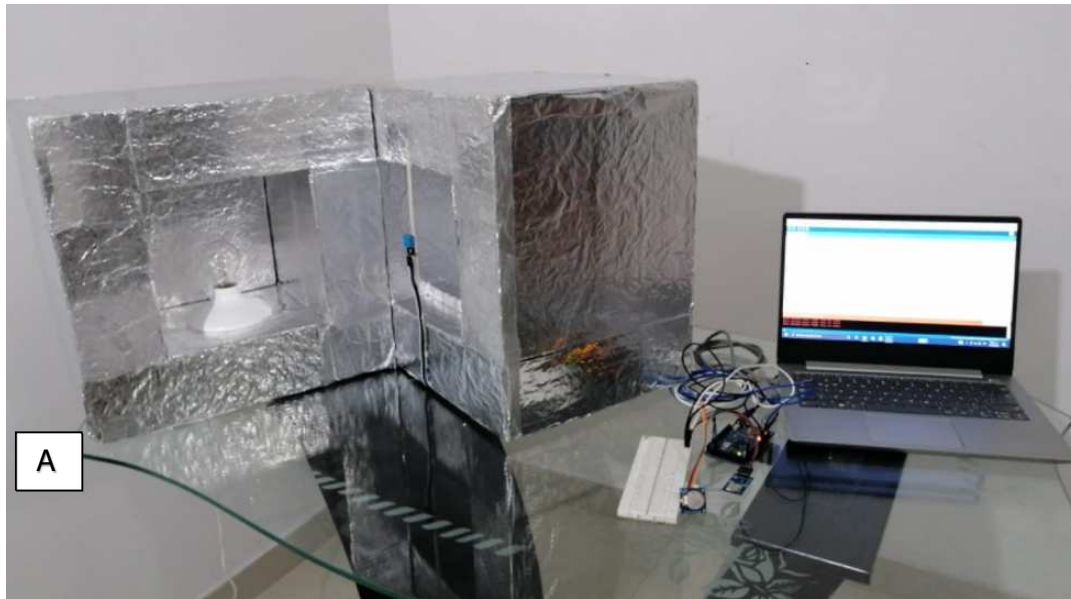


Ilustración 32. Fotografías del calorímetro a) imagen del calorímetro con instalación, b) imagen del calorímetro en funcionamiento con la probeta instalada. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de reducir la incertidumbre provocada por las pérdidas de calor de la caja hacia el ambiente y la precisión ajustada de los sensores, se propone realizar como mínimo 3 mediciones sobre el elemento las cuales fueron promediadas para finalmente, ser calibradas con materiales de transmitancia térmica conocidos, para este caso: vidrio incoloro de 4 mm de valor $U\ 5.8\ \text{W}/\text{m}^2\ ^\circ\text{C}$ y otra compuesta por una lámina de poliestireno expandido de 50 mm de espesor y $0.72\ \text{W}/\text{m}^2\ ^\circ\text{C}$ de transmitancia térmica.

Materiales e Instrumentos

Para la captura de datos de cada muestra se reutilizaron los 4 sensores DHT11 de la prueba anterior, los cuales tienen una alta fiabilidad y estabilidad en su señal digital calibrada de acuerdo a las webs especializadas en este tipo de hardware. Utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante; es bastante simple de usar tanto en hardware como en su software. Al igual que en la prueba anterior los sensores fueron conectados a un Arduino MEGA 2560 el cual hizo la función de “puente” entre los sensores y el ordenador.

Para la correcta escritura de los datos y para llevar un registro simultáneo de los 4 sensores mencionados, fue necesario escribir un código para ello usando el software Arduino IDE, basado en lenguaje C, en donde se configuró el orden de escritura, así como la frecuencia en tiempo de la toma de los datos. Para el registro del voltaje consumido por la bombilla, para calcular la potencia se conectó un voltímetro.

Las configuraciones del calorímetro se muestran en la ilustración 32 en donde se puede apreciar la resistencia de 60 W conectada al circuito eléctrico y los demás instrumentos, la toma de muestras se realizó durante la noche en donde la temperatura ambiente es más fresca, fue necesaria la instalación de un interruptor para controlar la temperatura al interior del dispositivo.

Para calcular U se siguió el procedimiento de Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo (2008) descrito a continuación; en donde, primero se despeja la potencia eléctrica dada por el producto del voltaje y la corriente expresada en la ecuación 1.

$$1) \quad P_{amp} = V * I$$

Bajo el supuesto en primera instancia que la potencia eléctrica de la bombilla se disipa por las cinco caras N_5 que componen la caja en su sección “caliente”, y el flujo de calor que pasa por la probeta instalada Q_{mat} la cual está consignada en la ecuación 2.

$$2) \quad P_{amp} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_{mat}$$

En donde la potencia de la lámpara es igual a la sumatoria de los flujos de calor de las 6 superficies del calorímetro de Q_1 a Q_5 .

Conociendo la transmitancia térmica usada en las paredes del dispositivo en poliestireno expandido de 10 cm el cual es 0.02 W/mK y el valor de P_{amp} obtenida en la ecuación 1 es posible despejar el valor de Q_{mat} en la ecuación 3 dónde; A es el área superficial del calorímetro, U es la conductividad térmica, T_{ai} la temperatura del aire al interior del calorímetro y T_{ae} la temperatura exterior del calorímetro.

$$3) \quad P_{amp} = A_1 U_1 (T_{ai} - T_{ae}) + A_2 U_2 (T_{ai} - T_{ae}) + A_3 U_3 (T_{ai} - T_{ae}) + A_4 U_4 (T_{ai} - T_{ae}) + A_5 U_5 (T_{ai} - T_{ae}) + Q_{mat}$$

Con Q_{mat} es posible determinar K_m la conductividad térmica de la probeta, utilizando la ecuación 4 en dónde; T_{pi} es la temperatura de la superficie en la cámara caliente, T_{pe} es la temperatura superficial del lado frío de la probeta y L_{mat} es el espesor en metros de la probeta.

$$4) \quad Q_{mat} = K_m A_{mat} (T_{pi} - T_{pe}) / L_{mat}$$

Las ecuaciones 5 y 6 se utilizaron para encontrar los coeficientes combinados por radiación y convección sobre cada lado de la probeta estudiada, en donde h_{cri} corresponde a la superficie interior caliente y h_{cre} la superficie de la cámara fría, los demás datos son; T_{ai} la temperatura del aire cámara caliente del calorímetro, T_{pi} es la temperatura de la superficie en la cámara caliente, T_{pe} es la temperatura superficial del lado frío de la probeta y T_{ae} la temperatura del calorímetro en la cámara fría.

$$5) \quad Q_{mat} = h_{cri} A_{mat} (T_{ai} - T_{pi})$$

$$6) \quad Q_{mat} = h_{cre} A_{mat} (T_{pe} - T_{ae})$$

En el artículo de Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo, (2008) de donde se extrae el procedimiento asume que “El coeficiente global de transferencia de calor es igual para todas las superficies del calorímetro” por lo que se puede calcular el valor de U_{mat} del material en la ecuación 8 sumando del inverso de las resistencias combinadas de radiación y convección de las ecuaciones 5 y 6. Así como $R_{mat} = L/k$ en donde L es el espesor de la probeta y k es la conductividad obtenida de las ecuaciones 1 a 4.

$$7) \quad U_{mat} = \frac{1}{R_{cre} + R_{mat} + R_{cri}}$$

$$8) \quad U_{mat} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{cri}}\right) + \left(\frac{L}{k}\right) + \left(\frac{1}{h_{cre}}\right)}$$

De acuerdo a la bibliografía en donde se señala que, para conocer la precisión de los resultados es necesaria una calibración en donde se realicen pruebas sobre materiales de transmitancia térmica conocida para este caso; el poliestireno expandido de 50 mm de 0.7 W/ (m²·°C) y vidrio traslúcido de 4 mm de 5.8 W/ (m²·°C). Se ejecutaron en concreto 6 ensayos en los cuales, para la placa de vidrio traslúcido con una diferencia promedio de temperaturas de 0.5 °C obtuvo una conductividad térmica de 7.645 W/ (m²·°C), mientras que el poliestireno

expandido con una densidad de 13.01 kg/m^3 , y una diferencia promedio de 9.5°C obtuvo $0.983 \text{ W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$. Los resultados consignados en la tabla 6 muestran una precisión del 72% en el método usado en esta prueba.

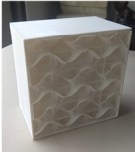
Material.	Número de Prueba	Ta_C	Ts_C	Ts_F	Ta_F	Área		U	Promedio	Transmitancia según el material.
		$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	A	B	$\text{W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$	$\text{W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$	$\text{W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$
Poliestireno expandido 50 mm	1	67.5	47.4	37.9	27.6	0.21	0.21	0.982	0.983	0.7
	2	67.5	47.4	27.6	27.6	0.21	0.21	0.981		
	3	68.9	44.2	27.9	27.9	0.21	0.21	0.985		
Vidrio traslúcido 4 mm.	1	56.1	35.4	35.2	29.1	0.21	0.21	7.594	7.645	5.8
	2	53.9	36.5	27.1	27.1	0.21	0.21	7.651		
	3	52.9	38.1	37.8	26.4	0.21	0.21	7.690		

Tabla 6. Resultados de la calibración. Fuente: elaboración propia.

Resultados

Se evaluó el comportamiento de la envolvente, en la tabla 7, al igual que en la calibración anterior se realizaron 3 pruebas que luego fueron promediadas y ajustadas al 72% de precisión encontrada la tabla 6 con lo que se obtuvo que la transmitancia térmica para la probeta es de $0.13 \text{ W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$ y su conductividad térmica es de $0.025 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Datos de las capas del prototipo.

Propiedades físicas y configuración de la impresión						Resultados de la prueba.		
Imagen.	Dimensiones de la muestra en mm.	Material.	Masa en Kg.	Tiempo de impresión en h.	CO2 en kg.	valor U en $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$	calibración	valor U en $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$
	210 x 210 x 18	PETg	0.406	188.73	1.071	0.185	0.72%	0.13
						0.174		
						0.186		

Nota: para el calculo de consumo en Kg de CO2, se han sumado los valores correspondientes al consumo electrico de la impresora 3d de 6.4Wh por el factor de emision electrica en Colombia que es 164.38g de CO2 por Kwh. En lo que respecta al CO2 producido por el material PETG de acuerdo a la bibliografia se 2.15Kg por hilo producido

Tabla 7. Resultados de la medición del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Se tomó la resistencia térmica de varias envoltentes en el estado del arte incluyendo las que fueron elegidas para conformar la línea base (ver anexo 1), para realizar la comparativa frente a la envoltente propuesta, nivelándose a 18 cm de espesor que contiene el modelo, graficándose en la ilustración 33. Gracias a este ejercicio, se puede apreciar que el prototipo supera con $7.49 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ a una lámina de poliestireno del mismo grosor de $3.60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, seguida por el Polimuro con $2.12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. También se observa la baja resistencia térmica de las envoltentes tradicionales, en donde la resistencia más alta la tienen los sistemas industrializados en concreto (SI) con $0.72 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

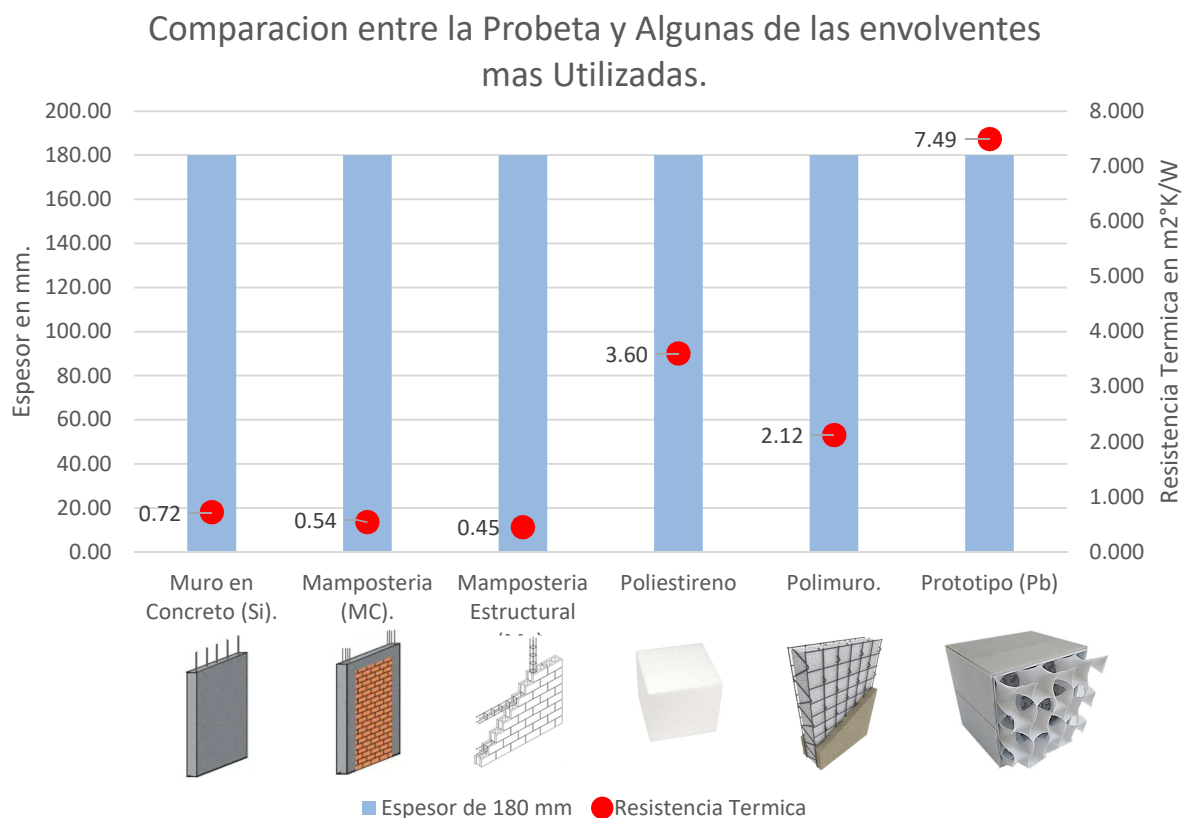


Ilustración 33. Comparación entre los resultados obtenidos por el prototipo frente a otras alternativas de cerramiento presentes en el estado del arte (la resistencia térmica de cada elemento fue calculada en el Anexo 1). Fuente: elaboración propia.

Desviaciones y Limitaciones de Ambas Pruebas

Fue posible la construcción de un dispositivo para la medición de conductividades térmicas de bajo coste tomando como punto de partida la configuración dada por Fonseca Díaz & Tibaquirá Giraldo (2008) y Giraldo C. (2018), con la suficiente precisión para ser empleada como datos de entrada en la simulación energética.

Aunque esta prueba no se acogió a los estándares ISO 8990:1994, ASTM C177-13 (Method, 2013b) para este tipo de ensayos. Se logró alcanzar una precisión del 72% la cual fue ajustada con la calibración con materiales de transmitancia térmica conocidas alcanzando una certeza del 100%.

El sensor DHT11 al ser de menor costo, presenta limitaciones en cuanto a la precisión en rango de temperatura ± 2.0 °C y de humedad en un 5%, así como el rango de tiempo entre la toma de muestras cada 2 s frente a otros sensores un poco más costosos y robustos como el DHT22 y DHT21 que hubieran dado mayor detalle de los cambios de temperatura.

Capítulo III. Optimización del Confort Térmico en una Envolverte Vertical

Las simulaciones digitales se han establecido como una herramienta para medir la efectividad de estrategias orientadas a la mejora del confort térmico. Con el uso de datos climáticos y la construcción de modelos basados en sus propiedades térmicas se pueden alcanzar resultados de comportamiento cercanos a la realidad. Sin embargo, varios autores entre ellos Erba, Causone, & Armani (2017) señalan problemas de incertidumbre en los resultados por su difícil repetibilidad en lo que corresponde al modelado y a los datos de entrada; como los climáticos y el algoritmo que el software utiliza.

Para que estos defectos sean cada vez menores los autores como Sterner, (n.d.) recomiendan la utilización de plantillas y modelos de referencia; se propone usar un sistema de referencia adaptado del documento técnico de soporte y el modelo usado por el ASHRAE 55, para determinar la comodidad térmica en cada línea base. Por lo tanto, en este capítulo se propone una plantilla para la evaluación de las tipologías de viviendas en altura en Colombia conocidas como; vivienda de interés social y vivienda de interés prioritario.

De acuerdo al censo de edificaciones DANE (2018) los sistemas constructivos más usados son el concreto, el ladrillo a la vista y el bloque en concreto. Para comprobar el desempeño de la propuesta de envolvente se deben comparar tanto los tipos de espacios con cada sistema constructivo, al igual que con la envolvente propuesta. El objetivo de este capítulo es la obtención de dichas líneas bases, así como verificar mediante simulación, los datos previamente obtenidos en el experimento.

Metodología

Según la AIA (2012) las buenas prácticas del modelado energético están compuestas en mínimo 3 partes; la primera el modelado del edificio con todos los sistemas y materiales que han sido considerados para la construcción del mismo, la segunda parte contempla una “línea base”, es decir, el mismo modelo, con la misma geometría, pero con la aplicación mínima de los códigos energéticos locales, y una tercera parte en donde se realice una comparativa de los dos modelos para determinar si la nueva propuesta excede o cumple con los requisitos mínimos contemplados para el edificio.

Este capítulo consiste en la comprobación por simulación de la envolvente propuesta y del estado actual y futuro de las líneas base. La metodología empleada se divide en tres partes; la primera consta de la definición de la plantilla de las líneas base correspondientes a la vivienda de interés social tomando como base el documento técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (MINVIVIENDA) que reglamenta los parámetros y lineamientos de la construcción sostenible, así como también una rápida revisión del estándar ASHRAE 55 en lo concerniente a la simulación de edificios de mediana altura.

En la segunda parte se simularán las tipologías en un programa de simulación energética con los tres sistemas constructivos más utilizados, con las características geométricas definidas en la plantilla anterior, y junto a la proyección de cambio climático realizada de los datos obtenidos para los años 2020, 2050 y 2080, con el software CCWorldWeatherGen; un programa que utiliza datos resumidos del modelo del tercer informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con el fin de comprobar su desempeño a largo plazo.

La tercera parte realizará la simulación de la envolvente propuesta; esta se evaluará con los datos tomados del estado del arte y posteriormente se calibrará con los resultados del

capítulo anterior, los datos obtenidos serán comparados y analizados con relación a las horas de comodidad térmica de acuerdo al estándar 55 de confort adaptativo, y en lo que se refiere al 80% y al 90% de horas de aceptabilidad en la comodidad térmica y su afectación futura en un período de 50 años.

Software

El software elegido para la simulación fue Openstudio por ser una aplicación gratuita de código abierto que se basa en el motor de cálculo Energy+ desarrollada por el National Renewable Energy Laboratory (NREL) y el departamento de Energía de los Estados Unidos. DoE, la versión utilizada para esta investigación es la 9.3.0 actualizada el 27 de marzo de 2020. Existe un acoplamiento entre la herramienta de diseño gráfico y la de simulación energética, usando el Plug-in desarrollado para Google Sketchup, el cual facilita más el diseño y la visualización en un entorno (ver ilustración 34).

A continuación, algunas ventajas y desventajas señaladas por la asociación internacional de arquitectos (2012).

Ventajas

1. Es un programa gratis de código abierto; por lo que cualquiera puede contribuir a su mejora o ver a partir de que ecuaciones obtiene sus resultados.
2. Está en constante desarrollo por el DoE, una comunidad activa que incluye un soporte para los reportes de la certificación LEED.
3. Incluye plantillas fáciles de aplicar que contiene los tipos de espacio, horarios de acuerdo al tipo de edificio, clima y estándar AHSRAE que se desee aplicar.

Desventajas

1. Al no ser un software comercial, carece de un “soporte técnico”, aunque RNEL tiene documentación, esta no sobresale del empleo básico del programa.

2. Estas características básicas son accesibles desde el entorno gráfico de Openstudio, pero si se quiere acceder al completo potencial del programa se debe acceder a los archivos de entrada de Energyplus y hacer programación por medio de Ruby.

3. Aunque usa una aplicación de Sketchup para modelar la geometría del edificio, Sketchup como tal no puede leer o convertir directamente por sí solo los archivos que genera el programa.



Ilustración 34. Flujo del trabajo y programas empleados en la simulación. Fuente elaboración propia.

Líneas Base

La Resolución 0549 de 2015

El Ministerio de vivienda de Colombia a través de su resolución 0549 del 2015 definió las tipologías de VIS y la VIP típicas para la ciudad de Santiago de Cali de acuerdo a estudios de los consumos promedios de agua y energía, perfiles de uso (horario, ocupación, sistema de iluminación, sistema de aire acondicionado, clima, etc.), así como los sistemas constructivos más utilizados por cada tipología, para realizar sus simulaciones de mejora energética se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

CARACTERÍSTICA		VIVIENDA DE INTERÉS PRIORITARIO (VIP)	VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL (VIS)	REFERENCIA
DIMENSIONES Y FORMA DEL EDIFICIO	RELACIÓN DE ASPECTO	1:2	1:2	Tabla 29 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015
	DIMENSIONES	40mt.X20mt.	39mt.X19.5mt.	
	ÁREA POR PISO EN mt2	800	760,5	
	ÁREA TOTAL EN mt2	4000	3802,5	
	NÚMERO DE PISOS	5	5	
	ALTURA DE PISO	2,4	2,4	
	ORIENTACIÓN FACHADA MAS LARGA	OCCIDENTE	OCCIDENTE	
	RELACIÓN VENTANA PARED.	19%	31%	Tabla 30 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015
	SOMBRA HORIZONTAL (VSA) EN GRADOS.	90	90	
	SOMBRA VERTICAL (HSA) EN GRADOS.	90	90	
ENVOLVENTE	VALOR U MURO EN (W/m ² ·K)	1,20	1,21	Tabla 31 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015
	VALOR U TECHO EN (W/m ² ·K)	2,51	2,26	
	VALOR U VENTANA EN (W/m ² ·K)	5,91	5,91	
	GANANCIA SOLAR VENTANA (SHGC)	0,78	0,78	
HORARIOS	DENSIDAD DE POTENCIA DE LUZ (W/mt2)	5,54	3,71	Tabla 31 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del
	HRAS. DE OPERACIÓN	24h.	24h.	Tabla 33 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del
	DÍAS DE OPERACIÓN ANUAL	365,00	365,00	de la resolución 0549 del

Tabla 8. Línea base de la Vivienda de Interés Social VIS y Vivienda Social Prioritaria VIP según la 0549. Fuente: elaboración propia.

Doe/Ashare 55

El Departamento de Energía de EE.UU. (DOE), desarrolló edificios comerciales de referencia, según el informe publicado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable NREL de Deru et al. (2011), estos modelos proporcionan una línea de base consistente de comparación y mejoran el valor de las simulaciones de energía por computadora, utilizando software como Energyplus.

Estos edificios de referencia del Departamento de Energía de EE.UU. (DOE) son descripciones completas para el análisis energético de todo el edificio, estos archivos se actualizan periódicamente y cumplen con la norma ANSI / ASHRAE / IESNA 90.1-2004.

En la tabla 9, encontrara las especificaciones de construcción nueva para edificio de vivienda de mediana altura se puede ver directamente la hoja de cálculo del "cuadro de mando" que resume las entradas.

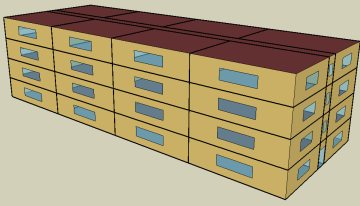
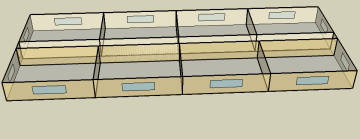
CARACTERISTICA		EDIFICIO DE VIVIENDA DE MEDIANA ALTURA.	REFERENCIA	INFORMACION ADICIONAL
DIMENSIONES Y FORMA DEL EDIFICIO	RELACION DE ASPECTO	1:2.8	PNNL-16770: Analysis of Energy Saving Impacts of ASHRAE 90.1-2004 for the State of New York.	
	DIMENSIONES.	46.32mt.X16.76mt.		
	AREA POR PISO EN mt2	776.32		
	AREA TOTAL EN mt2	3105.29		
	NUMERO DE PISOS	4		
	ALTURA DE PISO	3.05	Based on feedback from the National Multi-family Housing Council (NMHC).	
	ORIENTACION FACHADA MAS LARGA.	N/A		
	RELACION VENTANA PARED.	20%		
	SOMBRA HORIZONTAL (VSA) EN GRADOS.	90		
	SOMBRA VERTICAL (HSA) EN GRADOS.	90		
ENVOLVENTE	VALOR U MURO EN (W/m²·K)	1.42	Steel frame 0.4 in. Stucco+5/8 in. gypboard + wall Insulation+5/8 in. Gypboard	Cada piso tiene 8 apartamentos excepto la planta baja (7 apartamentos y 1 oficina con área de apartamento equivalente) Total 8 departamentos por piso con corredor en el centro. La profundidad de la zona es de 25 pies para cada apartamento desde las paredes laterales y cada apartamento mide 25' x 38' (950ft²).
	VALOR U MURO INTERIOR EN (W/m²·K)	N/A	2x4 steel-frame with gypsum board	
	VALOR U TECHO EN (W/m²·K)	2.79	Built-up Roof: Roof membrane+Roof insulation+metal decking	
	VALOR U VENTANA EN (W/m²·K)	5.84	New Construction Commercial Reference Buildings Department of Energy	
	GANANCIA SOLAR VENTANA (SHGC)	0.25		
	HORARIOS	DENSIDAD DE POTENCIA DE LUZ (W/mt2)	3.00	
HRAS. DE OPERACIÓN		24h.		
DIAS DE OPERACIÓN ANUAL		365.00	Building America Research Benchmark.	
	INFILTRACION (ACH)	0.24	PNNL-18898. Infiltration Modeling Guidelines for Commercial Building Energy Analysis. PNNL-20026. Energy Saving Impact of ASHRAE 90.1	
	VENTILACION lt/Seg PARA UN APTO 3 HAB.	49	ASHRAE Standard 62.1 or International Mechanical Code See under Outdoor Air	
	TERMOESTATO PARA CALEFACCION EN °C	21.11	Building America Research Benchmark.	
	TERMOESTATO PARA ENFRIAMIENTO EN °C	23.88		

Tabla 9. Especificaciones construcción nueva edificio de vivienda de mediana altura según el Estándar ASHRAE 90.1-2004

Observaciones y Línea Base Propuesta

Para tomar la resolución 0549 como línea base de la simulación, se deben realizar algunas observaciones en la envolvente de ambos modelos tanto VIP como VIS, que el DTS¹³ determinó para sus simulaciones, las cuales usaremos como referencia. No es menos que curioso que el sistema elegido para la línea base de la envolvente vertical sea el bloque en concreto #4. Siendo los sistemas constructivos más utilizados según la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL 2016); los sistemas industrializados (SI) con 40.37%, la mampostería confinada (MC) con 30.99% y la mampostería estructural (ME) con 27.58%.

CARACTERISTICA		(VIP)	(VIS)	DESCRIPCION	REFERENCIA
ENVOLVENTE	VALOR U MURO EN (W/m ² ·K)	1.20	1.21	Estuco Pintado+bloque concreto (bloque #4)	Tabla 30 del Documento Tecnico de soporte (DTS) de la resolucion 0549 del 2015.
	VALOR U TECHO EN (W/m ² ·K)	2.51	2.26	Concreto impermeabilizado+terminado o construido (afuera)	
	VALOR U VENTANA EN (W/m ² ·K)	5.91	5.91	N/A	
	GANANCIA SOLAR VENTANA (SHGC)	0.78	0.78	N/A	

Tabla 10. Especificación de la línea base Vivienda Social. Según el DTS del código construcción sostenible.
Fuente: elaboración propia.

¹³ Documento técnico de soporte en el que se basó la resolución 0549 del 2015 del código de construcción sostenible

Para poder ejecutar la simulación de la línea base con los sistemas constructivos más usados, se realiza un análisis de las propiedades térmicas de los tres casos con el método descrito por Cengel (2003), que a su vez sigue a ASHRAE (2001) suponiendo un estado estacionario. Para los sistemas industrializados (SI) en el sistema (Outinord y Con-tech), se compone de un muro de concreto macizo de 10 cm de espesor con revoque interior, para la mampostería confinada (MC) con ladrillo cerámico de 15 cm de espesor, y finalmente la mampostería estructural (ME) con un ladrillo estructural a la vista de 12 cm de espesor. A continuación en la tabla 11, la definición del valor U para cada sistema junto con las especificaciones de modelo del DoE como del DTS de la resolución 0549.

CARACTERÍSTICA		DTS 0549		DOE	SISTEMAS CONSTRUCTIVOS			REFERENCIA
		(VIP)	(VIS)		(SI)	(MC)	(ME)	
ENVOLVENTE	VALOR U MURO EN (W/m ² ·K)	1.20	1.21	1.42	3.46	2.21	2.67	Datos obtenidos con el método descrito por Cengel (2003) que a su vez sigue a ASHRAE (2001) suponiendo un estado estacionario.
	VALOR U TECHO EN (W/m ² ·K)	2.51	2.26	2.79	2.73	2.26	2.26	
	VALOR U ENTREPISO EN (W/m ² ·K)	N/A	N/A	N/A	2.62	1.55	1.55	
	VALOR U MURO DIVISORIO EN (W/m ² ·K)	N/A	N/A	N/A	3.10	2.05	1.88	
	VALOR U VENTANA EN (W/m ² ·K)	5.91	5.91	5.84	5.82	5.82	5.82	Especificaciones del vidrio crudo 6mm según Alfonso Garzón, (2018) "Análisis de diferentes clases de vidrio, para la elaboración de una ayuda gráfica como soporte técnico."
	GANANCIA SOLAR VENTANA (SHGC)	0.78	0.78	0.25	0.87	0.87	0.87	

Tabla 11. Definición de los valores U de la envolvente con los sistemas constructivos más utilizados en Colombia. Junto con la definición del ASHRAE y la resolución 0549. Para mayor información sobre cómo se llegaron a estos valores Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta al valor U de la ventana y a su ganancia solar de acuerdo a la investigación de Alfonso Garzón (2018), en donde realizó un análisis de diferentes clases de vidrio usadas en Colombia, los valores son consistentes con un vidrio crudo y traslúcido de 6 mm.

A diferencia del estándar AHSRAE, el documento técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 no especifica la distribución interna para la elaboración del modelo geométrico, por lo que el resultado es un volumen de 5 pisos de planta libre con áreas entre 760 y 800 m² por piso (ver **ilustración 35**). Por este motivo se propone adoptar la distribución geométrica dada por el DoE/ASHRAE en una distribución de 10 apartamentos por piso de 62.4 m², separados por una circulación de 3.5 m a lo largo del volumen.

Se distribuyó la circulación en 3 puntos a lo largo del edificio (ver **ilustración 36**) con el fin de ofrecer una distribución realista, más allá de imponer el corredor que se emplea en la tipología aportada por el DoE, que se ajusta más a edificios en países estacionales.

Para la simulación energética, se eligieron los apartamentos en la condición más crítica en referencia a la captación de calor en la edificación; estos fueron 301 y el 501, ambos tienen la característica de ser esquineros, por lo cual poseen una mayor área de fachada con respecto al sol (ver **ilustración 37**). El primero se constituye en el promedio entre los pisos elegidos, el 501 fue elegido porque además de poseer mayor fachada, posee la cubierta, la cual es una gran fuente de calor en los últimos pisos de la edificación, ambos casos representan el peor de los escenarios de comodidad térmica. Igualmente, se debe recordar que la simulación de la peor localización posible para un edificio con relación 1:2 consiste en tener sus fachadas más largas al este y el oeste.



Ilustración 35. Comparación entre los diferentes modelos geométricos para la simulación energética. Fuente: elaboración propia.

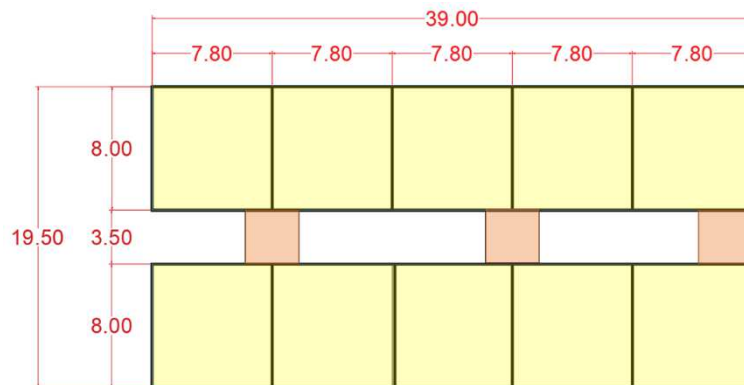


Ilustración 36. Planta modelo de distribución propuesta para tipologías VIP y VIS, el sombreado amarillo corresponde a los apartamentos, las áreas naranjas a las circulaciones verticales. Fuente: elaboración propia.

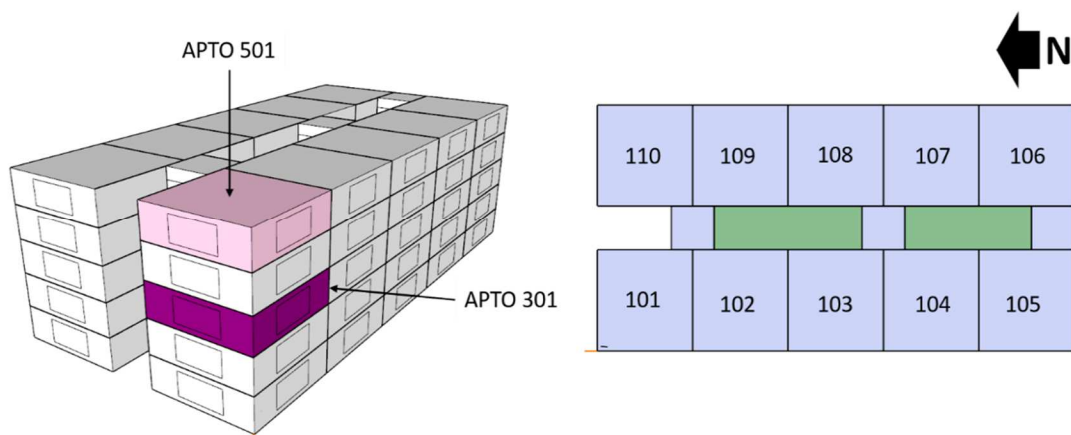


Ilustración 37. Ubicación de los espacios elegidos para la obtención de resultados de la simulación. Fuente: elaboración propia.

A continuación, la tabla 12 de línea base propuesta para la simulación; se ha seguido en lo posible las características de la resolución 0549, solo cambiando lo respectivo a los valores U de la envolvente para los tres casos más usados, así como la distribución interna del modelo para acercarnos a la realidad de la distribución de estas tipologías.

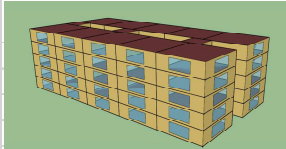
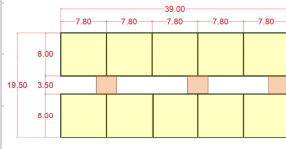
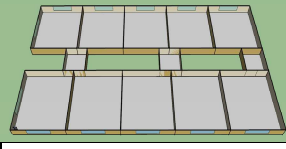
CARACTERÍSTICA		VIVIENDA DE INTERÉS PRIORITARIO (VIP)	VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL (VIS)	REFERENCIA	INFORMACIÓN ADICIONAL
DIMENSIONES Y FORMA DEL EDIFICIO	RELACIÓN DE ASPECTO	1:2	1:2	Tabla 29 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015	
	DIMENSIONES	40mt.X20mt.	39mt.X19.5mt.		
	ÁREA POR PISO EN mt2	800	760.5		
	ÁREA TOTAL EN mt2	4000	3802.5		
	NÚMERO DE PISOS	5	5		
	ALTURA DE PISO	2.4	2.4	Tabla 30 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015	
	ORIENTACIÓN	OCCIDENTE	OCCIDENTE		
	FACHADA MAS LARGA	OCCIDENTE	OCCIDENTE		
	RELACIÓN VENTANA PARED	19%	31%		
	SOMBRA HORIZONTAL (VSA) EN GRADOS	90	90		
SISTEMAS CONSTRUCTIVOS	(SI)	(MC)	(ME)		
ENVOLVENTE	VALOR U MURO EN (W/m².K)	3.46	2.21	2.67	Cada piso tiene 10 apartamentos de 62 a 64m2 c/u. con tres volúmenes de circulación al centro de 3.5mt.x3.5mt, las demás dimensiones tanto la profundidad, altura y relación ventana-pared son acorde con lo establecido en el DTS. de la resolución 0549 del Ministerio de Vivienda.
	VALOR U TECHO EN (W/m².K)	2.73	2.26	2.26	
	VALOR U ENTREPISO EN (W/m².K)	2.62	1.55	1.55	
	VALOR U MURO DIVISORIO EN (W/m².K)	3.10	2.05	1.88	
	VALOR U VENTANA EN (W/m².K)	5.82	5.82	5.82	
	GANANCIA SOLAR VENTANA (SHGC)	0.87	0.87	0.87	
HORARIOS	DENSIDAD DE POTENCIA DE LUZ (W/mt2)	5.54	3.71	Tabla 31 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución 0549 del 2015	
	HORAS DE OPERACIÓN	24Hrs.	24Hrs.	Tabla 33 del Documento Técnico de soporte (DTS) de la resolución	
	DÍAS DE OPERACIÓN ANUAL	365	365		

Tabla 12. Línea base propuesta para el modelado energético en donde se incorpora tanto los sistemas constructivos más utilizados como también una geometría más definida inspirada en el ejemplo del modelo de ASHRAE. Fuente: elaboración propia.

Para realizar la simulación de la envolvente en Openstudio fue necesario adaptar el modelo geométrico como se aprecia en la ilustración 38 en donde se observa el despiece del elemento en el cuerpo, la hidrocapa, así como el auto sombreado que para efectos del programa se decidió modelar en forma de retícula, todas las capas mencionadas se encuentran separadas 0.02 m para evitar la influencia sobre la transmitancia térmica de $0.13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ la cual fue determinada en las pruebas del anterior capítulo.

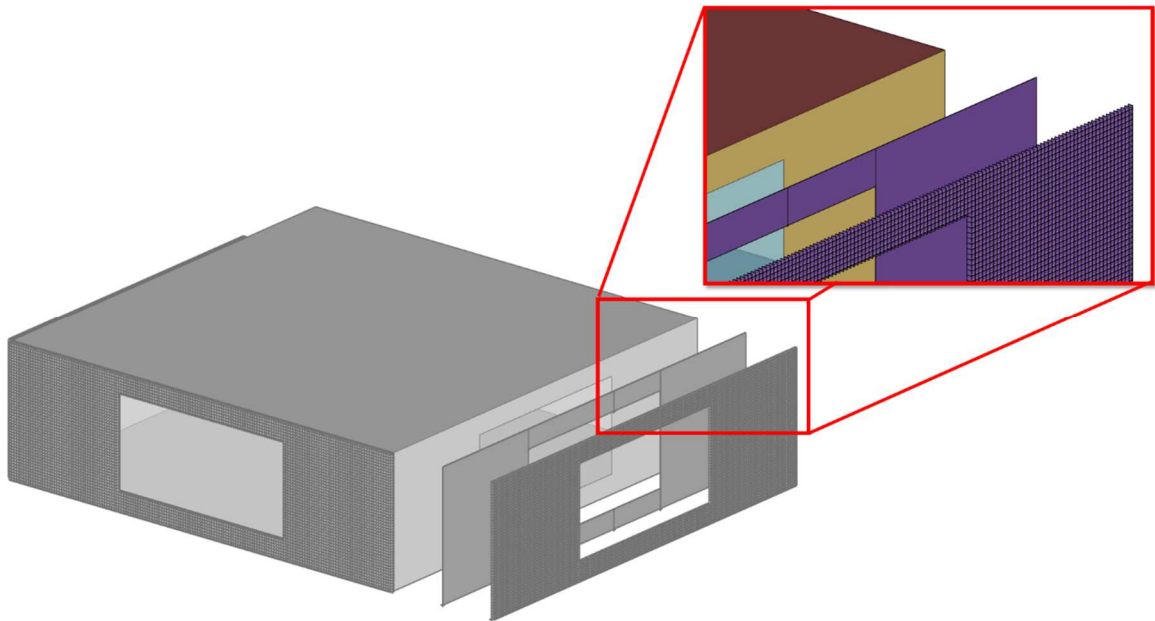


Ilustración 38. Modelo geométrico para la simulación de la envolvente, realizado con los datos del capítulo 2. Fuente elaboración propia.

Como tratamiento complementario al diseño de la envolvente y tomando como objetivo la reducción de ganancias por radiación a través del acristalamiento descritas por Bano & Kamal, (2016) y Giraldo et al., (2015). Se plantea una reducción del WWR (Window-to-Wall Ratio) de los apartamentos 301 y 501 en un 50%, tan solo conservando la ventana hacia el norte y protegiéndola como lo recomienda el documento soporte de la Resolución 0549 con una sombra vertical y horizontal combinada (VSA & HSA) de 70 como se referencia en la ilustración 39.

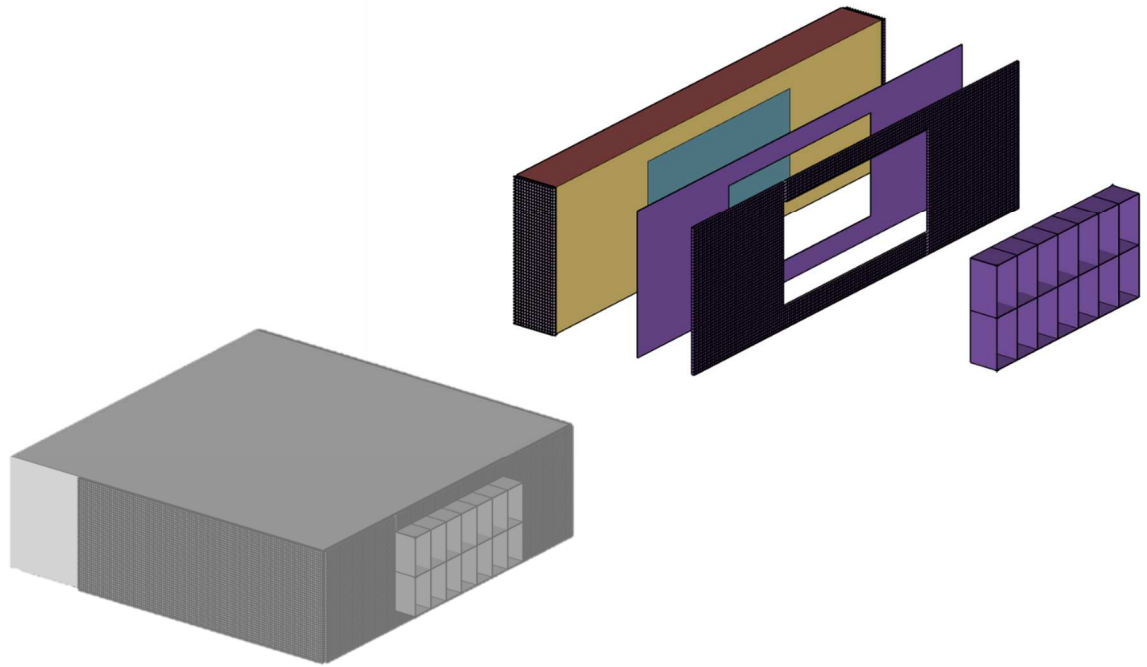


Ilustración 39.Modelo geométrico para la simulación de la envolvente con la disminución en su WWR y con protección solar en su fachada norte. Fuente elaboración propia.

Datos Climáticos

El objetivo de obtener estos datos, fue tomarlos como insumo para mejorar el confort térmico por medio del componente propuesto, en este caso la envolvente opaca, ya que como dispositivo está ligada a la vejez del propio edificio. Sin embargo, Rosillo & Herrera (2019) hacen hincapié en la necesidad de diferenciar entre duración del edificio y duración de la estrategia de climatización, debido a que en ocasiones es difícil mantener el mismo nivel en las prestaciones de una estrategia determinada con el pasar del tiempo.

Este no es el caso del presente proyecto, porque se tiene en cuenta la vivienda social y se ha propuesto como objetivo de implementación, por lo cual no se prevén cambios en su vida útil, que según diversas fuentes; para un edificio de vivienda multifamiliar se mantiene en una vida larga de aproximadamente 50 - 99 años.

En referencia a los datos climáticos estos fueron obtenidos como se aprecia en la ilustración 40 de la base de datos del Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales (IDEAM) Identificada con el código 26055120, ubicada en la universidad del valle a 996 m.s.n.m en las coordenadas; latitud 3.378 longitud -76.533. En el periodo comprendido entre 1/01/2018 y el 31/12/2018, los valores obtenidos fueron bulbo seco, punto de rocío, bulbo húmedo, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.



Ilustración 40. A la izquierda la estación climatológica de la Universidad del Valle tomado de "INFORME ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA Univalle Cali," (n.d.) a la derecha localización en un punto rojo, tomada de la plataforma DHIME del IDEAM. Fuente: elaboración propia.

Se estimó necesario emplear la misma metodología usada por Medina-Patrón & Escobar-Saiz (2019) en donde uso el programa de proyección de datos CCWorldWeatherGen, el cual permite generar archivos de clima de cambio climático para ubicaciones de cualquier lugar del mundo. Utilizando datos resumidos del modelo del tercer informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) del conjunto del experimento HadCM3 A2, realiza las proyecciones bajo la metodología “morphing” desarrollado por Jentsch, James, Bourikas, & Bahaj (2013).

Igualmente, los creadores de esta herramienta advierten que la misma utiliza datos aproximados del Modelo de Circulación General (GCM)¹⁴ por lo que recomiendan estudiar los informes de evaluación del IPCC (2014), para conocer las limitaciones e incertidumbres de esta herramienta. Dicho de otro modo, estos modelos no son perfectos, y los software de proyección climática son variados; con diferentes metodologías según el autor que se consulte, pero pueden proporcionar estimaciones útiles de la demanda energética futura de acuerdo a Cox, Drews, Rode, & Nielsen (2015).

No se debe olvidar que los modelos son representaciones idealizadas y dependiendo del propósito, estos son adecuados. Baumberger, Knutti, & Hirsch Hadorn (2017) sostienen que para que estas proyecciones sean aprovechables; los modelos climáticos resultantes deben representar bien aquellos procesos que dan forma a la evolución a largo plazo de las características climáticas de interés. Se considera que presentar una proyección que no sea 100% precisa, es mejor que omitir el comportamiento climático futuro sobre lo que se considera un modelo de vivienda social en el trópico, que va a ser muy sensible a los futuros consumos en relación con la refrigeración de sus espacios de permanencia.

¹⁴ “Un **Modelo General de Circulación** (MCG, en inglés: GCM) es un modelo de tipo matemático sobre lo que es la circulación de una atmósfera u océano planetario y se basan en ecuaciones sobre una esfera rotatoria utilizando la termodinámica para las diversas fuentes de energía (radiación, calor latente). Estas ecuaciones sirven de base para modelos complejos en software que normalmente se utilizan para simular las condiciones de la atmósfera y océanos de la Tierra.” Tomado de Modelos de circulación general - Wikipedia, la enciclopedia libre, (n.d.)

En la ilustración 41 se puede observar la variación de temperatura para las 14 h la hora del día con mayor temperatura registrada. Por consiguiente, la mayor hora de falta de comodidad térmica. En la gráfica se observa una tendencia al alza de un grado centígrado cada 30 años con una diferencia de temperatura de dos grados entre el 2020 y el 2080, con un aumento máximo de 3 °C entre los meses de julio-agosto y con un aumento mínimo en octubre con 2.25 °C. Las proyecciones de estos años han sido transformadas a EPW el cual es un archivo de datos meteorológicos guardado en el formato estándar de Energyplus. Siendo usado como insumo en las simulaciones de Openstudio.

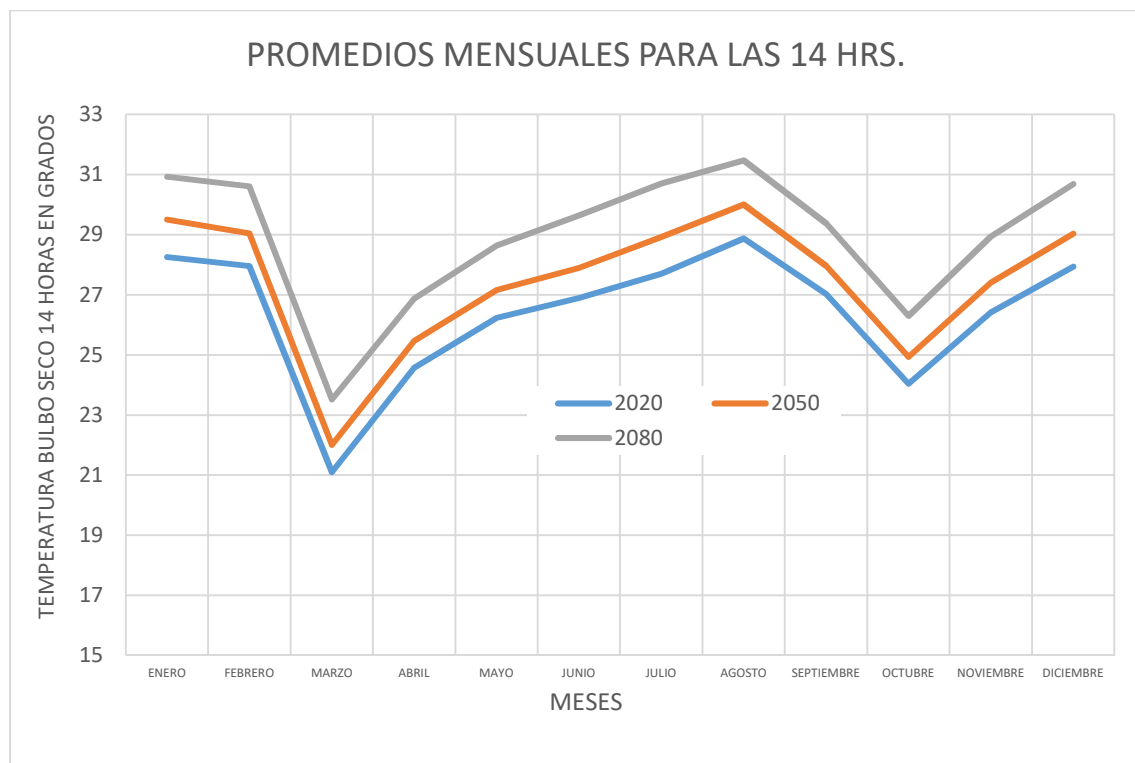


Ilustración 41. Variación en proyecciones de temperatura de bulbo seco para la ciudad de Santiago de Cali, producto de CCWorldWeatherGen sobre los años 2020, 2050 y 2080 para la hora crítica de las 14Hrs. Fuente: elaboración propia.

Resultados de las líneas Base

Para la visualización de resultados producto de las simulaciones realizadas en Openstudio, se usó la herramienta basada en macros de Excel llamada Confadapt-ASH055 desarrollada por Sol-Arq. La cual sirve para calcular los resultados de confort adaptativo de acuerdo con los criterios del ASHRAE-55, realizados a partir de los resultados horarios de la simulación en temperatura del aire, temperatura radiante, temperatura operativa, temperatura exterior de bulbo seco e infiltración en renovaciones hora.

Los autores del programa son claros al afirmar que este no se encuentra validado actualmente por el ASHRAE. Sin embargo, es una herramienta útil para verificar las horas de comodidad térmicas anuales en la gráfica del confort adaptativo, que sigue las indicaciones dadas por la norma. Presentando el número de horas por dentro y por fuera de los límites de aceptabilidad del 80% y del 90% y solo considerando como temperatura de entrada válida las que se encuentran dentro de los rangos que propone el estándar para la temperatura exterior predominante de 10 °C y 33.5 °C.

Vivienda de Interés Social VIS.

Sistema Industrializado (SI)

Se puede observar, así como en la tabla 13 un incremento en la falta de comodidad térmica, comenzando con un 14.06% a los 30 años y de un 37.53% a los 60 años en las horas dentro del 80% de aceptabilidad para los apartamentos 301 y 501 elegidos como muestra. En la gráfica de la ilustración 42 podemos ver en detalle el comportamiento de la temperatura dentro de cada una de las 8760 horas del año 2020 en su relación con el modelo de confort térmico adaptativo.

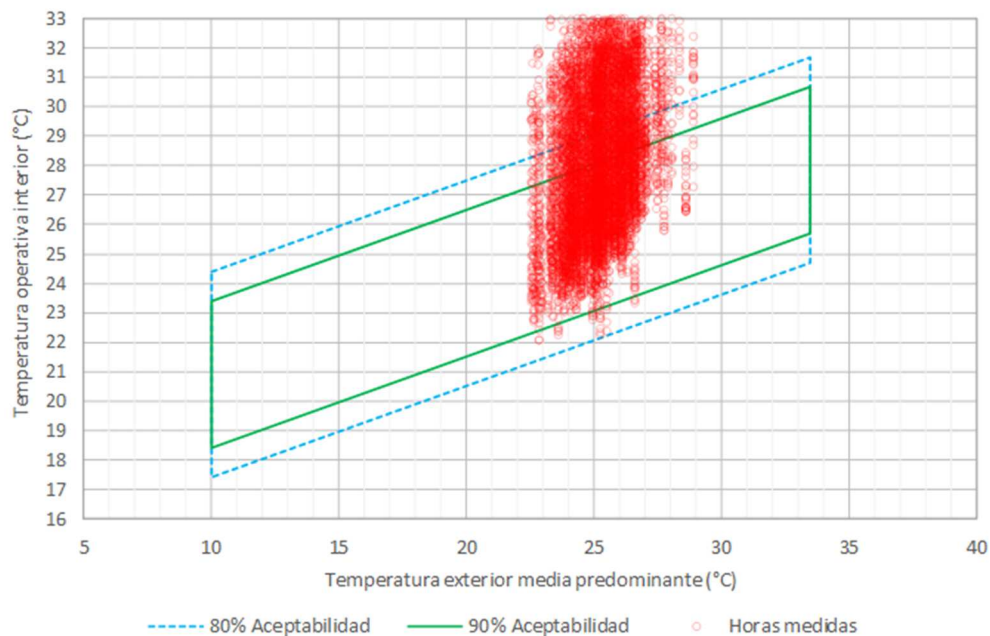


Ilustración 42. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema industrializado en concreto (SI). Fuente: elaboración propia.

EDIFICIO VIS SISTEMA INDUSTRIALIZADO (SI)						
RESULTADOS CONFORT ADAPTATIVO CONFORME AL ESTANDAR AHSRAE 55-2017						
APARTAMENTO EVALUADO.	APARTAMENTO 301			APARTAMENTO 501		
DESCRIPCION/AÑO	2020	2050	2080	2020	2050	2080
HORAS POR DENTRO DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	50.10%	40.90%	25.09%	45.83%	38.71%	24.44%
HORAS POR FUERA DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	49.90%	59.10%	74.91%	54.17%	61.29%	75.56%
HORAS POR DENTRO DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	63.27%	54.37%	39.52%	55.09%	49.28%	37.70%
HORAS POR FUERA DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	36.73%	45.63%	60.48%	44.91%	50.72%	62.30%

Tabla 13. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción Industrializado aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia

Mampostería Confinada (MC)

En el caso de la mampostería confinada podemos observar un caso similar a la anterior línea base. En los 60 años simulados, los apartamentos con mampostería confinada registran un aumento paulatino en la incomodidad térmica del 14% a un 36.7% como se aprecia en la tabla 14, en la ilustración 43 se muestra en detalle el comportamiento térmico en el 2020 para este cerramiento.

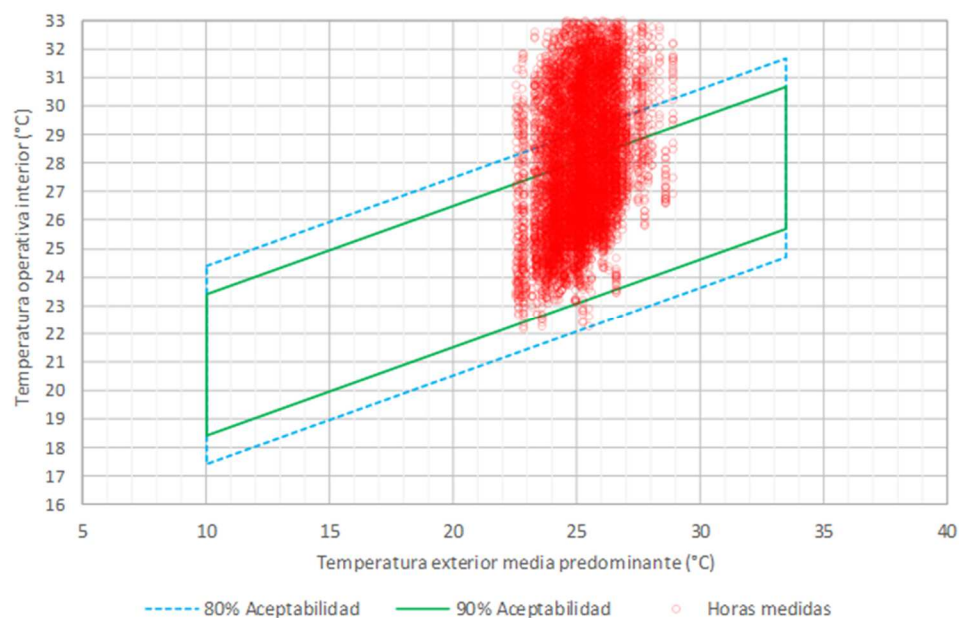


Ilustración 43. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020, y proyectada para los años 2050, y 2080. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema Mampostería Confinada (MC). Fuente: elaboración propia.

EDIFICIO VIS SISTEMA MAMPOSTERIA CONFINADA (MC)						
RESULTADOS CONFORT ADAPTATIVO CONFORME AL ESTANDAR AHSRAE 55-2017						
APARTAMENTO EVALUADO.	APARTAMENTO 301			APARTAMENTO 501		
DESCRIPCION/AÑO	2020	2050	2080	2020	2050	2080
HORAS POR DENTRO DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	50.54%	41.46%	25.28%	50.62%	46.92%	36.31%
HORAS POR FUERA DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	49.46%	58.54%	74.72%	49.38%	53.08%	63.69%
HORAS POR DENTRO DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	63.20%	54.37%	40.01%	60.64%	56.14%	48.03%
HORAS POR FUERA DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	36.80%	45.63%	59.99%	39.36%	43.86%	51.93%

Tabla 14. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción de Mampostería Confinada aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.

Mampostería Estructural (ME)

En la línea base correspondiente a la mampostería estructural como elemento de cerramiento vertical en los apartamentos, tenemos como se aprecia en la tabla 15 una reducción en las horas de comodidad térmica bajo el modelo adaptativo que se encuentran dentro del 80% de aceptabilidad, del 13.73% para los primeros treinta años y de 36.8% para los sesenta años. En la ilustración 44 se puede ver las horas en la falta de comodidad térmica para el 2020 reflejado en los puntos (horas) que se encuentran por fuera de las líneas de confort.

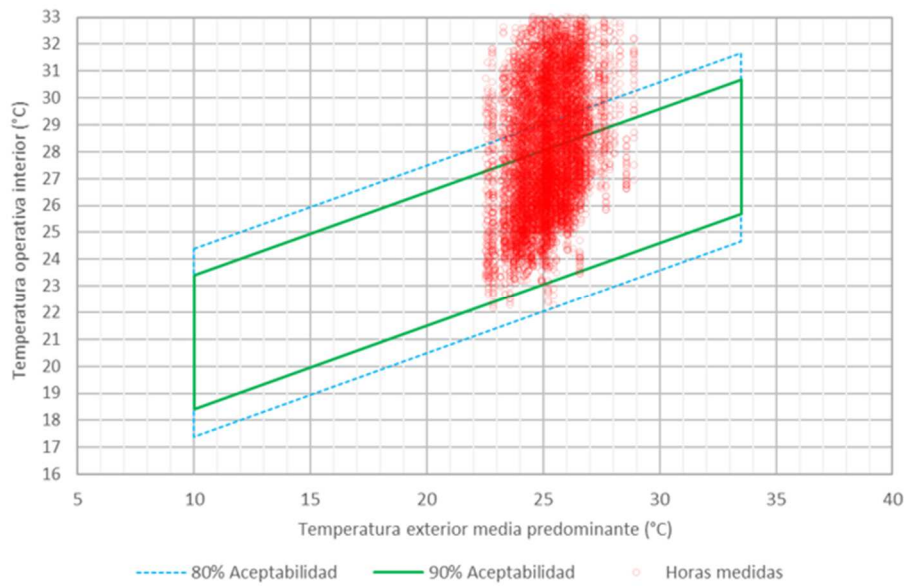


Ilustración 44. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema Mampostería Estructural (ME). Fuente: elaboración propia.

EDIFICIO VIS SISTEMA MAMPOSTERIA ESTRUCTURAL (ME)						
RESULTADOS CONFORT ADAPTATIVO CONFORME AL ESTANDAR AHSRAE 55-2017						
APARTAMENTO EVALUADO.	APARTAMENTO 301			APARTAMENTO 501		
DESCRIPCION/AÑO	2020	2050	2080	2020	2050	2080
HORAS POR DENTRO DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	50.65%	42.00%	25.14%	50.83%	47.10%	36.01%
HORAS POR FUERA DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	49.35%	58.00%	74.86%	49.17%	52.90%	63.99%
HORAS POR DENTRO DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	63.50%	54.78%	40.12%	60.80%	56.14%	47.96%
HORAS POR FUERA DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	36.50%	45.22%	59.88%	39.20%	43.86%	52.04%

Tabla 15. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción de Mampostería Estructural aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.

Datos de la implementación de la envolvente propuesta en la Vivienda de Interés Social (VIS)

Al aplicar al modelo energético los datos obtenidos en las pruebas de campo se obtienen los resultados de la comodidad térmica en el modelo adaptativo en una vida útil de 60 años. Como se aprecia en la tabla 16. Podemos ver dentro del 80% de aceptabilidad un aumento de la comodidad térmica con respecto a las líneas base un promedio de mejora para el apartamento 301 de un 20.63% y de 8.22% para el apartamento 501. La ilustración 45 muestra la tendencia de concentrar todos los datos sobre las líneas del confort adaptativo a diferencia de las demás gráficas para el primer año de funcionamiento.

EDIFICIO VIS CON ENVOLVENTE PROPUESTA + PROTECCION SOLAR						
RESULTADOS CONFORT ADAPTATIVO CONFORME AL ESTANDAR AHSRAE 55-2017						
APARTAMENTO EVALUADO.	APARTAMENTO 301			APARTAMENTO 501		
DESCRIPCION/AÑO	2020	2050	2080	2020	2050	2080
HORAS POR DENTRO DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	65.86%	57.18%	41.57%	54.74%	51.50%	41.23%
HORAS POR FUERA DEL 90% DE ACEPTABILIDAD.	34.14%	42.82%	58.43%	45.26%	48.50%	58.77%
HORAS POR DENTRO DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	83.41%	74.54%	61.64%	65.26%	60.52%	51.53%
HORAS POR FUERA DEL 80% DE ACEPTABILIDAD.	16.59%	25.46%	38.36%	34.74%	39.48%	48.47%

Tabla 16. Cuadro comparativo de los resultados dados por Sistema de Envolverte Propuesto aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.

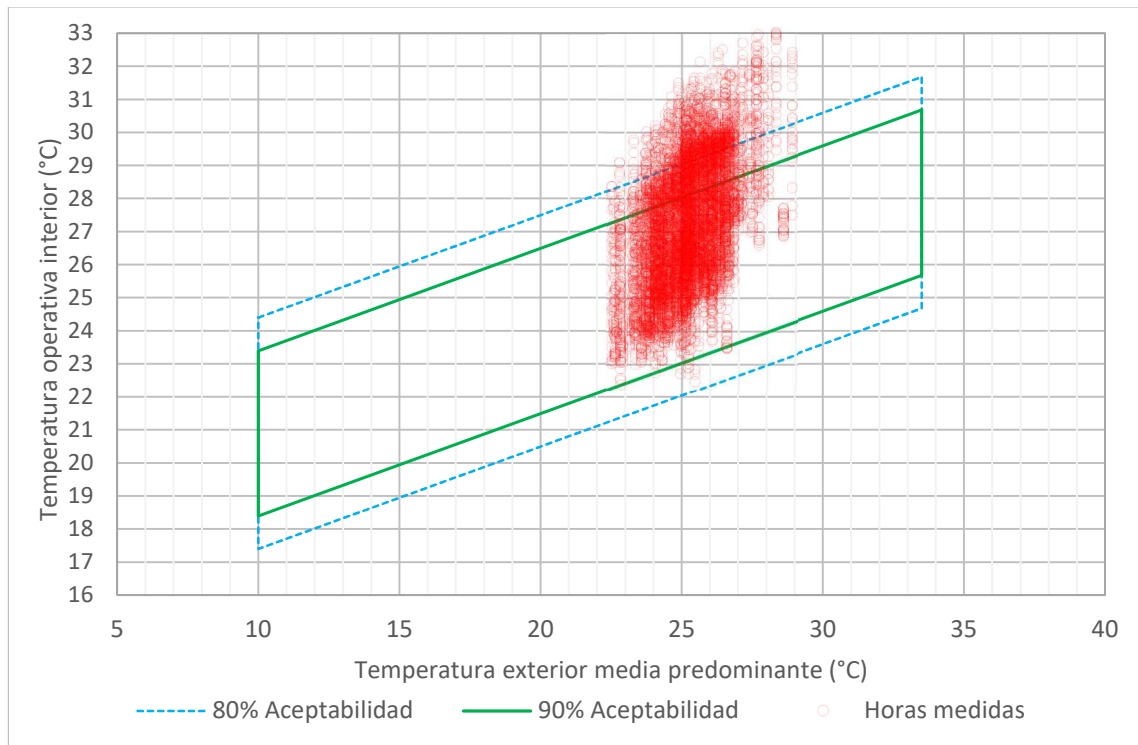


Ilustración 45. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema de Envolverte Propuesto Fuente: elaboración propia.

Discusión de Resultados

Se comprueba mediante la simulación realizada la concordancia con el estado del arte en relación con la alta insatisfacción térmica en la vivienda social, planteadas por los autores Gamboa, Posillo, Herrera, Lopez, & Iglesias (2011), Varini (2016) y Giraldo C. (2018) entre otros. Como se muestra en las siguientes gráficas, los sistemas constructivos tradicionales no cumplen la satisfacción térmica mínima del 80% de horas anuales en satisfacción térmica con un promedio por debajo del 63.5%.

También se observa que los mejores comportamientos térmicos entre los sistemas no varían más allá del 0.2% y el 1% frente a los demás, por lo que todos los sistemas tradicionales reflejan cifras similares en comodidad térmica en lo que respecta al apartamento 301. En cambio, en relación al apartamento de muestra 501 estas cifras registran una mayor diferencia del 1 al 7%.

Por otra parte, se observa con preocupación el detrimento en las horas de comodidad térmica en todos los años proyectados para los tres sistemas constructivos más utilizados; el (SI) como el sistema (Outinord y Con-tech), para la mampostería confinada (MC) y la mampostería estructural (ME). Las proyecciones de comodidad térmica en el apartamento se encuentran por debajo del 45% de horas anuales.

Sobre la proyección de los sistemas en el tiempo de acuerdo a los datos climáticos obtenidos por el software de proyección de cambio climático, se observa un descenso constante en todos los sistemas, sobre todo en el sistema industrializado en concreto, el cual presenta el menor porcentaje de horas de comodidad térmica en la vivienda de interés social y en particular en los últimos pisos como el 5to, con una reducción del 20% en ambas tipologías en un transcurso de 60 años.

La mejora en confort de la envolvente propuesta como se observa en la ilustración 46 para el apartamento 301, fue del 31.72 % comparado con el promedio de las líneas base para el apartamento en el primer año dentro del 80% de aceptabilidad, del 36.65 % a los treinta años y del 54.55% a los sesenta años. En comparación el apartamento 501 como se evaluó en la ilustración 47 en el primer año de funcionamiento una diferencia de 10.9 % por encima de las demás envolventes, un 12.38 % para los treinta años y para los sesenta un 15.63%. También dentro del 80% de aceptabilidad, estos porcentajes demuestran la importancia que la envolvente horizontal tiene en los apartamentos con esta condición la cual en este caso la mayor aportante a la incomodidad térmica.

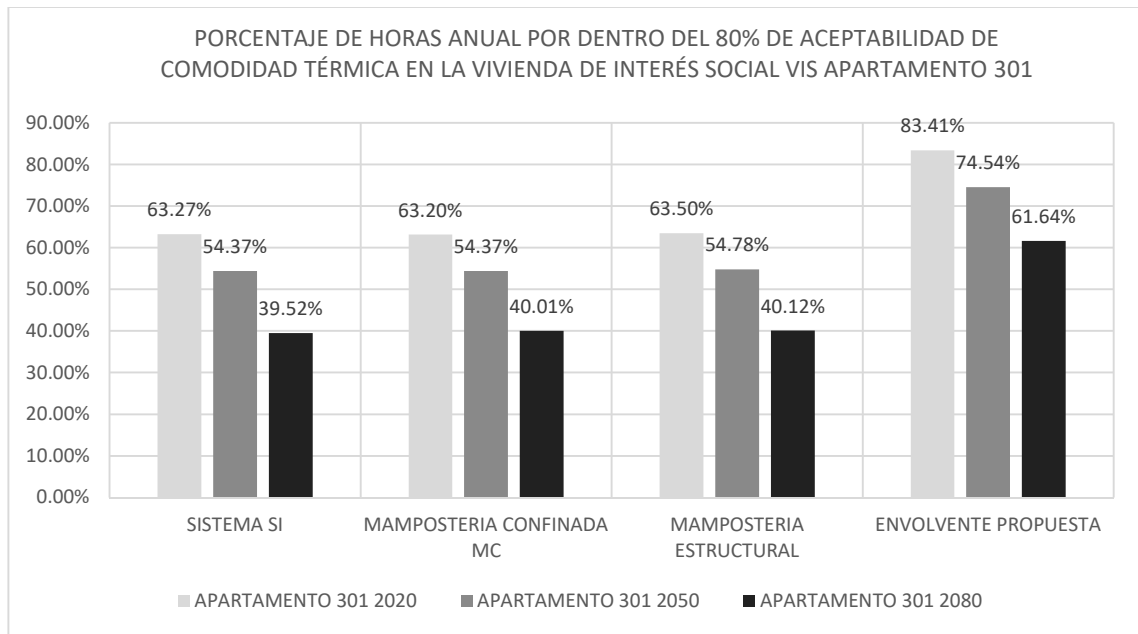


Ilustración 46.Gráfica comparativa de aceptabilidad térmica entre los sistemas constructivos y su proyección en el tiempo, para el apartamento 301 en la tipología VIS. Fuente: elaboración propia.

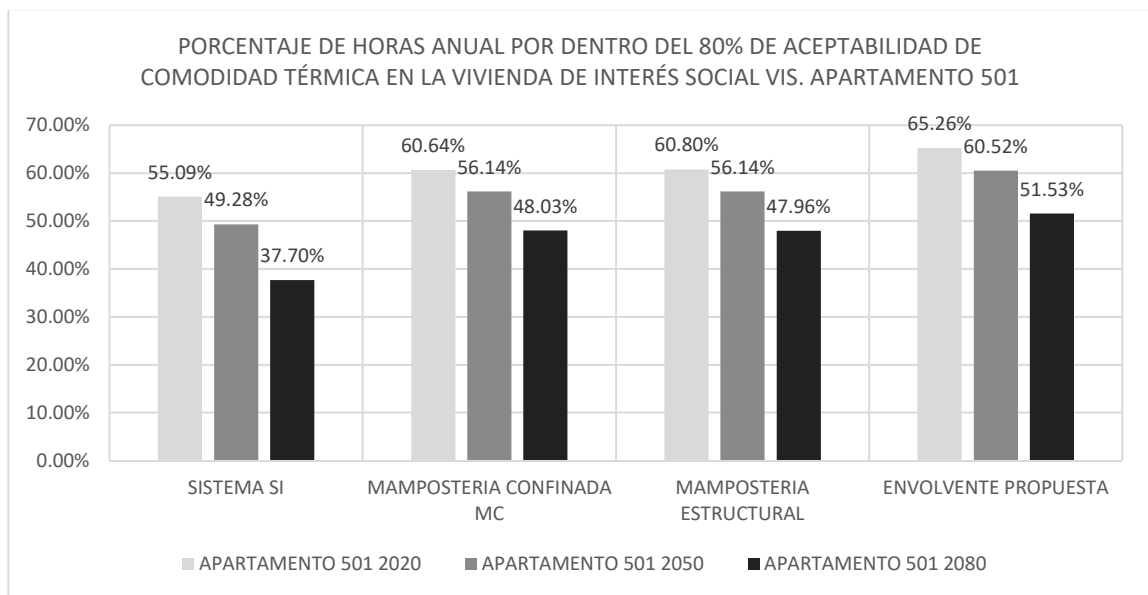


Ilustración 47.Gráfica comparativa de aceptabilidad térmica entre los sistemas constructivos y su proyección en el tiempo, para el apartamento 501 en la tipología VIS. Fuente: elaboración propia.

Observaciones

Mediante la metodología de simulación computacional seguida en este capítulo, en la cual se utilizaron como datos de entrada y control los resultados obtenidos en los capítulos anteriores (como el valor U), se cumplió con el objetivo de determinar el aporte de la solución constructiva de la envolvente propuesta.

La optimización del confort térmico estuvo muy cerca de alcanzarse en el apartamento 301 por medio de la implementación de la envolvente propuesta dentro del 80% de aceptabilidad. Pero esto solo fue posible durante los primeros años de implementación asemejando el comportamiento de las demás líneas base con respecto al incremento en la temperatura. Para acercarnos a la simulación más cercana a la realidad, se siguieron los pasos encontrados en el estado del arte; modelado de la línea base, calibración, y, por último, el modelado de la intervención con su respectiva simulación.

Se concluye además que es posible alcanzar el 80% de aceptabilidad e incluso superarlo en el apartamento 301 para los primeros años de implementación, si la ventilación natural cruzada es tomada como estrategia adicional a la envolvente propuesta. En el caso del apartamento 501 sería necesario además realizar un tratamiento sobre la cubierta para evitar que las ganancias de calor de la misma afecten la comodidad térmica.

Este método es eficiente en el tiempo siendo el idóneo para generar múltiples resultados teniendo en cuenta las posibilidades, a pesar de ello, esta investigación observó dos aspectos limitantes; el primero respecto al modelado geométrico, ya que fue difícil la modelación de una superficie mínima periódica como el giroide en el auto sombreado, el segundo limitante es que no se encontró una forma de simular los efectos que el hidrogel pudiera tener sobre el confort térmico al hacer un control de la humedad superficial.

Capítulo IV. Análisis Económico e Impacto Ambiental

El objetivo de este capítulo es determinar la competencia del prototipo en lo económico y lo ambiental frente a las envolventes más usadas en la construcción en Colombia que de acuerdo al DANE (2018) son; los sistemas industrializados en concreto, la mampostería confinada y la mampostería estructural. También se han agregado otros sistemas con un uso poco extendido, pero de buen desempeño térmico como lo son el Polimuro y el sistema EIFS¹⁵. Finalmente, se ha incluido como línea de referencia un sistema de aire acondicionado, como el valor máximo en gasto energético que se puede alcanzar sin aplicar estrategias bioclimáticas.

Dicho estudio se dividió en dos partes; la primera netamente económica, en un análisis costo beneficio para lo cual se tuvo que hacer un análisis de precios unitarios de cada alternativa, así como una proyección de gastos en el consumo eléctrico requerido para satisfacer la demanda de comodidad térmica para cada caso. La segunda parte consistió en un análisis de ciclo de vida con referencia al impacto en el efecto invernadero medido por la cantidad de CO₂ en kilogramos producidos por cada alternativa. Ambos análisis solo fueron posibles gracias a las simulaciones llevadas a cabo en el capítulo tres, las cuales determinaron la comodidad térmica de cada alternativa con proyecciones a 60 años.

Se encontró que el sistema de envolvente propuesto es la opción con mejor rentabilidad en el tiempo proyectado frente a las otras alternativas. Por su parte, el análisis de ciclo de vida determinó que este sistema tiene un menor impacto en relación con el CO₂ producido.

Análisis Costo Beneficio

Manuel et al., n.d. aclara que un análisis de este tipo permite evaluar los beneficios de varios proyectos en un plano que proporcione condiciones de competencia económica uniforme. Rosillo & Herrera (2019) afirman que una información completa del desempeño económico de un proyecto, como los desembolsos económicos y gastos realizados, son

¹⁵ EIFS* (Exterior Insulation Finish Systems) es un sistema de aislación de fachadas para muros y losas ventiladas que funciona a través de la superposición de 5 pieles: fijación, capa aislante, capa impermeabilizante –abierto a la difusión del vapor y resistente al impacto–, y capa exterior de terminación.

características que ayudan en la discusión y orientan las decisiones durante el desarrollo de un proyecto bioclimático. Otro autor, Flandez (2017) señala la necesidad de un estudio de viabilidad económica; comparando distintos escenarios presentes y futuros, estableciendo cuál es la inversión más conveniente. Para Manuel et al., n.d. la relación costo/ beneficio como se aprecia en la ecuación 1, se plantea como el análisis más indicado para este tipo de comparaciones; en donde se contrastan alternativas similares de mejoramiento en el ahorro de energía o de comodidad térmica, permitiendo evaluar los beneficios de varios proyectos en un plano que proporcione condiciones de competencia económica uniforme.

La definición más extendida de la relación costo beneficio, es el cociente de la división entre los valores actualizados de los beneficios (ingreso) entre los costos totales (egresos) del proyecto. En dónde; si el resultado de esta operación es igual a uno, el valor presente de los ingresos es igual al de los costos, por lo tanto, la ejecución de un proyecto es indiferente, en este caso, los beneficios solo alcanzan para cubrir la tasa de inversionista. Si el valor es mayor a uno, significa que el valor presente de los ingresos es mayor al de los costos, por lo tanto, la ejecución de un proyecto es conveniente. Pero si el valor obtenido es menor que uno, demostraría la imposibilidad económica de la alternativa ya que los beneficios ni siquiera superan el esfuerzo económico inicial.

Entonces para efectuar un A.C.B. es necesario contar con los flujos de efectivo neto, que son el resultado de la resta entre los ingresos y egresos netos, que deben ser trasladados a valor presente neto (VPN), como se describe en la ecuación 2. Esto se hace para estimar el valor presente de cada alternativa en cada período futuro analizado, para determinarlo, se descuenta cualquier pago o ingreso dentro del ciclo de vida del proyecto con la tasa de interés que se estimó a la fecha de referencia. En otras palabras, cuando se logra analizar la cantidad de dinero que se espera obtener de la inversión y se traduce esos rendimientos en moneda actual, se puede saber el valor presente de cada alternativa.

$$C/B = \frac{\text{ingresos totales netos}}{\text{costos totales}}$$

$$C/B \begin{cases} \leq 1 & \text{👍} \\ = 1 & \text{👤} \\ > 1 & \text{👎} \end{cases}$$

Ecuación 1. Fórmula explicativa del análisis de costo- beneficio, a la derecha los resultados esperados.

$$VPN_A = A \frac{(1 + \text{interés})^{\text{número de años}} - 1}{\text{interés} \cdot (1 + \text{interés})^{\text{número de años}}}$$

Ecuación 2. Fórmula para encontrar el valor presente neto.

Datos a Ingresar

Para el A.C.B. se requiere como insumo conocer el costo inicial de implementación, la tasa de descuento, los ingresos y los egresos de cada alternativa; para conocer el costo de implementación se remitirá al análisis de costos unitarios de cada cerramiento multiplicado por el área de fachada del apartamento teórico, analizado previamente en el capítulo tres. En lo que respecta a la tasa de descuento según Flandez (2017) encontrar una acorde a cada proyecto requeriría una investigación adicional, por tal motivo se tomará la recomendación de Campos & Serebrisky (2016) que propone una tasa del 10% para la evaluación de proyectos privados en países en desarrollo.

Para Hatt (2012) las inversiones consistentes en mejora energética solo deben ser evaluadas por los gastos de energía que ocurren sin una medida de optimización, considerándolo rentable solo si el ahorro de gastos futuros supera la adquisición de la energía que se usaría sin la aplicación de la mejora. De acuerdo a esta reflexión, se propone que los ingresos sean los ahorros obtenidos de cada sistema, con relación al porcentaje de personas satisfechas en el tiempo a evaluar. Para los egresos se tomará el gasto de energía y

mantenimiento con respecto al porcentaje de personas insatisfechas durante el período estudiado, tal y como se aprecia en la siguiente imagen.



Ilustración 48. Conceptualización del análisis costo beneficio propuesto. Fuente elaboración propia.

Para obtener los consumos y ahorros de energía, se tiene como premisa que en la misma medida que aumenten las personas insatisfechas térmicamente, también lo hará el consumo eléctrico como resultado. Se propone entonces que el consumo eléctrico de cada alternativa sea el producto del consumo anual por el porcentaje de insatisfechos. Los datos de entrada fueron el consumo anual de kWh del equipo de aire acondicionado de 12.000 Btu, de referencia Split Wind-Free de Samsung (ver ecuación 3) y el porcentaje de personas satisfechas dentro el 80% de aceptabilidad de cada alternativa en el apartamento 301 para los años evaluados.

$$C_{AA} = (\text{consumo} \times \text{hora}) * 6h * 30\text{días} * 12\text{meses}$$

$$C_{AA} = ((1070 \text{ Wh}) * 6h * 30\text{días} * 12\text{meses}) \times 3 \text{ equipos}$$

$$C_{AA} = 6933 \text{ kwh}$$

Ecuación 3. Forma en que se determinó el consumo anual para el sistema de aire acondicionado, como el área del apartamento evaluado no es menor a 60 m², un solo equipo de 12000 Btu. Es insuficiente por lo cual su número aumento a 3 equipos.
Fuente: elaboración propia.

Debido a la falta de datos comprendidos entre los años de cada simulación en porcentaje de personas satisfechas, se abordó un método de aproximación; encontrando la ecuación gráfica de la tendencia entre los resultados que fueron dados en el anterior capítulo. Para encontrar la tendencia se hizo uso del programa Excel, en el cual este tipo de análisis se encuentra bastante automatizado. Como se aprecia en la gráfica de la ilustración 49.

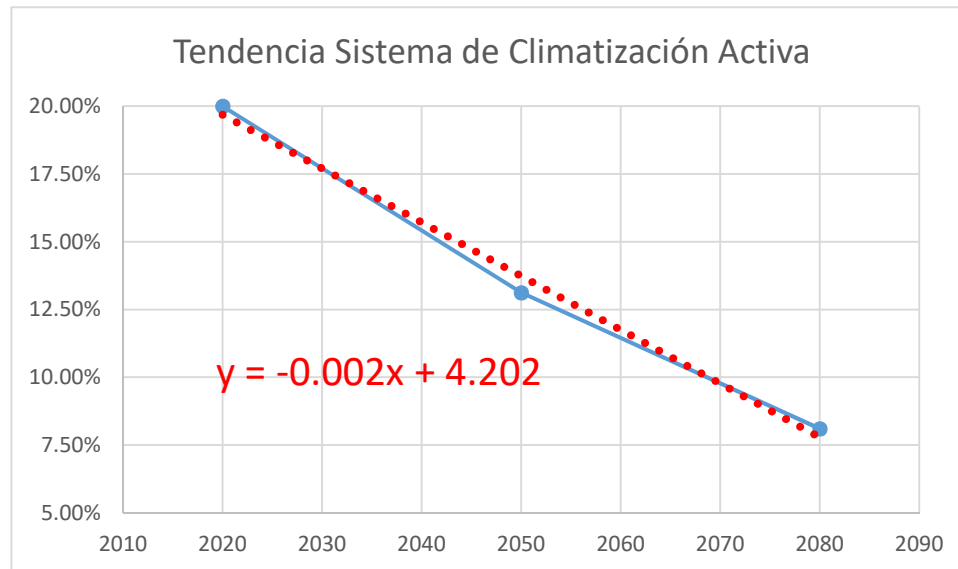


Ilustración 49. Fórmula de la gráfica realizada en Excel para la opción de aire acondicionado. Encontrada al tomar el mínimo de personas dentro del 80% de aceptabilidad y la tasa en que desmejora el confort térmico en el tiempo a partir de las líneas base. Fuente: elaboración propia.

Finalmente se incluye la ecuación 4 y se multiplica por el consumo anual, para este ejemplo se eligió un año comprendido entre el año 2020 y 2050.

$$\text{Consumo anual en KW} = C_{AA} * (1 - (-0.002(\text{Año}) + 4.202))$$

$$\text{Consumo anual en KW} = (6933 \text{ KW}) * (1 - (-0.002(\text{Año 2025}) + 4.202))$$

$$\text{Consumo anual en KW} = 6499.92 \text{ KW}$$

Ecuación 4. Ecuación final para obtener el consumo eléctrico para la opción de la envolvente propuesta tomando como base la fórmula de tendencia de la ilustración 54.

En lo que respecta al tiempo se espera que la viabilidad económica de diferentes alternativas no sea evaluada únicamente en el presente, sino también en sus posibilidades futuras; con el fin de establecer la inversión de mayor conveniencia, si se considera que la vida útil de una vivienda está entre 30 y 50 años, de acuerdo a la Canadian Standards Association (2006). Se determinó para efectos del presente proyecto de investigación, sean evaluados cuatro horizontes de retorno de la inversión; 10, 20, 30 y 60 años.

De conformidad a lo expresado el A.C.B. cuenta con los siguientes supuestos:

$$B/C = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{B_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=0}^n \frac{C_j}{(1+i)^j}}$$

Ecuación 5. Desglose del costo beneficio.

Razón Beneficio Costo, donde:

B_j = Flujo Neto Positivo en el Período (ahorros en costos de energía)

C_j = Flujo Neto Negativo en el Período (implementación (APU) + gasto de energía + costos de mantenimiento)

i = Tasa de Descuento del Inversionista 10% según Campos & Serebrisky (2016)

n = Horizonte de Evaluación (10, 20, 30 y 60 años.)

Costos de Implementación

Para estimar los costos de producción industrial del prototipo se utilizó la metodología propuesta para calcular cuantitativamente el costo de piezas plásticas moldeadas por inyección planteada por G. López (2015). La cual se divide en costos fijos (costos de los moldes) y costos variables (materiales y precio de operación del equipo) como se aprecia en la tabla 17. No sin antes determinar la cantidad de unidades que se requerirían para la fachada, ya que al hablar de un proceso industrial tienen que ser grandes números para que sea rentable.

COSTOS DE PRODUCCION POR UNIDAD			
Area total del edificio a cubrir en m2.	1,851	Valor maquina por unidad	\$ 3,010.32
Area de la pieza en m2	0.04	valor material por unidad	\$ 1,148.40
Cantidad de unidades	46,275	Distribucion de valor de los moldes en cada unidad	\$ 3,025.39
		Valor por unidad	\$ 7,184.12
Cantidad de piezas	7		
Ciclo de trabajo en segundos	4		
tiempo por unidad	28		
Costos fijos			
Valor de molde x unidad	\$ 20,000,000		
valor total de moldes	\$ 140,000,000		
Costos variables			
valor material en kg	\$ 638		
Cantidad de kg por unidad	1.8		

Tabla 17. Memoria de cálculo de precio por unidad de envolvente en la producción por inyección bajo la metodología planteada por G. López (2015), la unidad consta de 7 piezas como diseño en el capítulo 1, para determinar el área del edificio a cubrir se tomó la geometría del modelo de simulación del capítulo 3.

Las demás alternativas fueron evaluadas tomando los conocimientos adquiridos durante el ejercicio profesional y la Web del *Generador de Precios de la Construcción Colombia*. *CYPE Ingenieros, S.A.*, n.d. Cabe señalar que los costos indirectos como administración, imprevistos o utilidad no fueron tenidos en cuenta para este análisis. Los valores totales de cada alternativa están consignados en la tabla 18.

COSTES DIRECTOS DE MUROSEN M2 POR APARTAMENTO				
DESCRIPCION.	UND.	CANT.	VLR/UNIT	VLR/TOTAL
MURO EN BLOQUE ESTRUCTURAL (ME)	M2	46.85	\$ 53,170.37	\$ 2,491,031.83
MURO EN MAMPOSTERIA CONFINADA (MC)	M2	46.85	\$ 151,443.15	\$ 7,095,111.39
MURO EN SISTEMA INDUSTRIALIZADO (SI)	M2	46.85	\$ 171,233.19	\$ 8,022,275.11
MURO+EIFS	M2	46.85	\$ 121,522.09	\$ 5,693,309.92
POLIMURO XPS	M2	46.85	\$ 99,484.48	\$ 4,660,847.89
PROPUESTA ENVOLVENTE PLASTICA	M2	46.85	\$ 107,760.00	\$ 5,048,556.00
COSTE DE IMPLEMENTACION AIRE ACONDICIONADO				
SUMINISTRO E INSTALACIÓN	UND	3	\$ 2,929,897	\$ 8,789,691.84
COSTECONSUMO+MANTENIMIENTO ANUAL	UND	3	\$ 4,134,175	\$ 12,402,525.00

Tabla 18. Costes directos de cada alternativa. Fuente: elaboración propia.

Análisis

Después de tener todos los datos de entrada para el A.C.B., se elaboró una tabla para cada una de las siete alternativas. Se empezó por establecer la línea base, es decir el costo de adquisición de la energía que se usaría sin la aplicación de la mejora energética. En este caso el sistema de aire acondicionado de la tabla 19, terminó por configurar los ahorros que fueron utilizados como ingreso en cada opción. El primero en ser evaluado fue el prototipo como se muestra en la tabla 20, el valor inicial de implementación, en este caso, constituye su mayor desventaja y los ahorros en 60 años no son suficientes para cubrir los costos de implementación ni la tasa de interés esperada.

AIRE ACONDICIONADO				
DATOS	Inversion Inicial.	\$ 8,789,692		
	Tasa de Descuento.	10.0%		
Periodo	Ingreso	Egreso	Flujos de efectivo neto.	valor presente
0			-\$ 8,789,692	-\$ 8,789,692
2020	\$ 0	\$ 10,393,579	-\$ 10,393,579	-\$ 9,448,708
2030	\$ 0	\$ 10,641,630	-\$ 10,641,630	-\$ 3,729,826
2040	\$ 0	\$ 10,889,680	-\$ 10,889,680	-\$ 1,471,529
2050	\$ 0	\$ 11,137,731	-\$ 11,137,731	-\$ 580,261
2060	\$ 0	\$ 11,385,781	-\$ 11,385,781	-\$ 228,698
2070	\$ 0	\$ 11,633,832	-\$ 11,633,832	-\$ 90,094
2080	\$ 0	\$ 11,881,882	-\$ 11,881,882	-\$ 35,476
Valor presente de la suma de flujos actualizados			-\$ 106,053,392	
Valor presente neto. VPN			-\$ 114,843,084	Se rechaza
Indice de Rentabilidad Costo Beneficio (ACB)			-12.07	Se rechaza

Tabla 19. Análisis costo beneficio línea base aire acondicionado, aquí los ingresos son cero debido a que esta es la opción que no presenta ahorro en el costo de la energía. Fuente: elaboración propia.

MURO EN ENVOLVENTE PROPUESTA				
DATOS	Inversion Inicial.	\$ 5,048,556		
	Tasa de Descuento.	10.0%		
Periodo	Ingreso	Egreso	Flujos de efectivo neto.	valor presente
0			-\$ 5,048,556	-\$ 5,048,556
2020	\$ 3,379,636	\$ 1,265,321	\$ 2,114,316	\$ 1,922,105
2030	\$ 3,244,150	\$ 1,711,812	\$ 1,532,338	\$ 537,075
2040	\$ 3,108,663	\$ 2,158,303	\$ 950,361	\$ 128,423
2050	\$ 2,973,177	\$ 2,604,793	\$ 368,383	\$ 19,192
2060	\$ 2,837,690	\$ 3,051,284	-\$ 213,594	-\$ 4,290
2070	\$ 2,702,204	\$ 3,497,775	-\$ 795,571	-\$ 6,161
2080	\$ 2,566,717	\$ 3,944,266	-\$ 1,377,549	-\$ 4,113
Valor presente de la suma de flujos actualizados			\$ 15,383,626	
Valor presente neto. VPN			\$ 10,335,070	Se acepta
Indice de Rentabilidad Costo Beneficio (ACB)			3.05	Se acepta

Tabla 20. Análisis costo beneficio de la envolvente propuesta. Fuente: elaboración propia.

Resultados del Análisis Costo Beneficio

Se tomó cada análisis costo beneficio y se contrastó con el período propuesto a evaluar para el 2020, 2030, 2040, 2050 y 2080. Los resultados de esta comparativa se pueden apreciar en la ilustración 50. Se aprecia inicialmente que ninguna de las tipologías de cerramiento alcanza la factibilidad, es decir, ninguno de los índices supera o iguala el valor de una unidad. Se observa, por otra parte, que la mejor alternativa es la envolvente propuesta con índices superiores a 0.38 en su primer año y luego alcanzando factibilidad a los 5 años de aplicación con 1.21. Triplicando la inversión con 3.05 al final de su vida útil. Los índices más bajos fueron dados por la mampostería estructural, la cual terminó con un índice de -10.80 a los 60 años de ser implementada.

Se realizó el mismo procedimiento con el valor presente neto y se hizo la comparativa en el período propuesto como se observa en la gráfica de la ilustración 51, el valor presente neto son los flujos de caja netos originados de una inversión. Se puede apreciar que, excepto la

envoltente propuesta, las implementaciones de las alternativas cada vez aumentan los costos destinados a energía para mantener las condiciones de comodidad térmica.

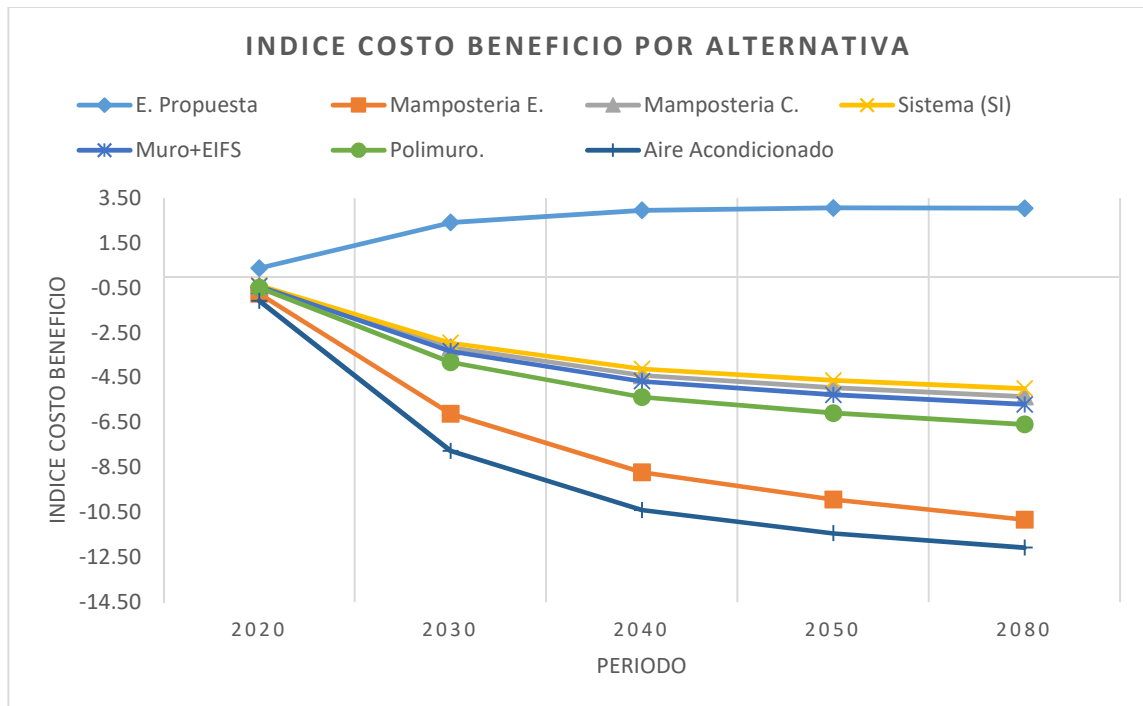


Ilustración 50. Análisis de Coste-Beneficio dados por alternativa en un período de 60 años. Fuente: elaboración propia.

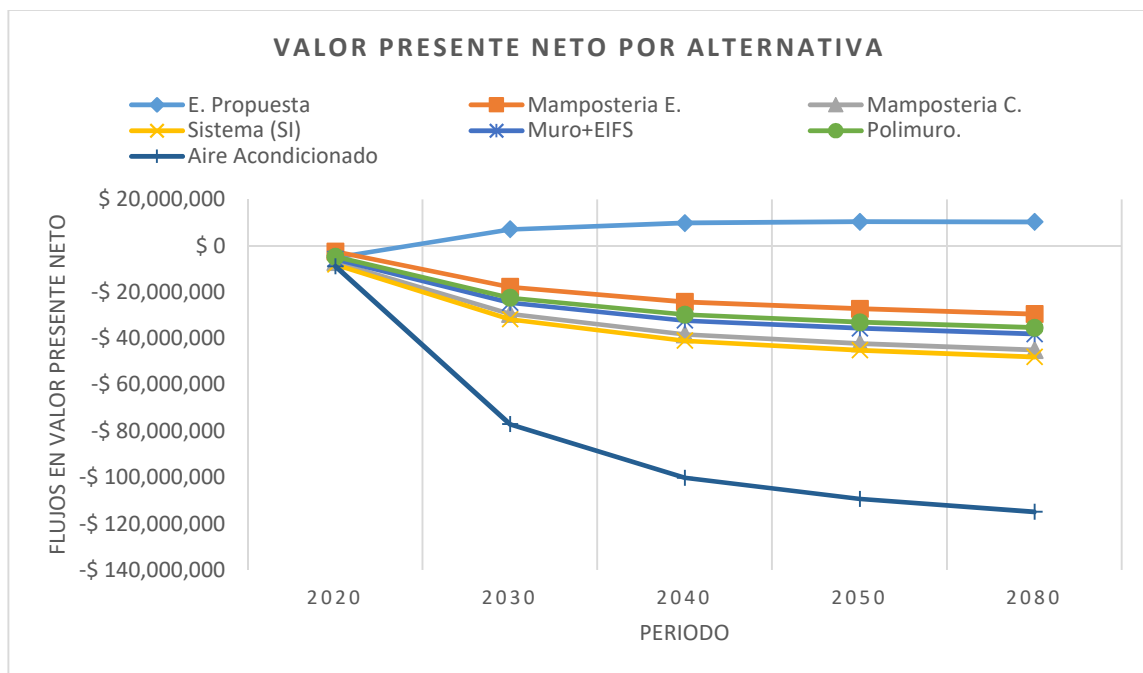


Ilustración 51. Flujo de caja en Valor Presente Neto de cada alternativa en un período de 60 años. Fuente: elaboración propia.

Impacto Ambiental

Con el fin de obtener a una comprensión más completa de las limitaciones y bondades de cada alternativa de cerramiento se realizó un análisis de impacto ambiental, bajo la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV). Según Rieznik & Hernández (2005) este análisis tiene como objetivo valorar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando tanto el uso de materia y energía, permitiendo identificar la opción de menor impacto.

Si bien un ACV posee múltiples enfoques, permite establecer objetivos de medición separando los impactos. Rosillo & Herrera (2019) sostienen que una buena forma de medir los impactos se encuentra asociada a las toneladas de CO₂ producidas por las actividades y consumos incurridos. Se consideró entonces evaluar el aporte al calentamiento global, en la producción de kilogramos de CO₂ producidos por cada opción, aprovechando los datos obtenidos en el análisis costo-beneficio como el consumo eléctrico.

Análisis ACV

Debido a la cantidad de datos obtenidos durante este proyecto es posible realizar una estimación de los costos y consumos anuales, así como la vida útil de cada alternativa. En cuanto a la huella de carbono dada en kg de CO₂, se usó el índice del factor de emisión del margen combinado para Colombia, del Ministerio de Minas y Energía (2015) que lo define en 0.401 [kg CO₂/kWh]. Los datos fueron consignados en la tabla 21.

Tabla 21. Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: elaboración propia.

Análisis de Costo de Vida											
Objetivo: comparar el impacto ambiental de 6 soluciones constructivas de envolvente vertical para fachada.						Límites del sistema: solo se tiene en cuenta la fase de implementación y funcionamiento en el edificio, en la categoría impacto de calentamiento global (emisiones co2 equivalente)					
Unidad funcional: garantizar el 80% de aceptabilidad en comodidad térmica según el método adaptativo, para un apartamento de 64m2 en clima tropical cálido seco.						Fase De Extracción, Manufactura Y Construcción.		Fase De Uso (Funcionamiento, Mantenimiento, Renovación)			
Solución Constructiva.	Consumo Eléctrico Anual En KW.	Consumo Eléctrico 60 Años En KW.	Conversión Consumo Eléctrico A Kg. Emisiones Co2 Anual.	Conversión Consumo Eléctrico A Kg Emisiones Co2 En 60 Años.	Emisiones Por Implementación En Kg.	Emisiones Co2 Por Mantenimiento Anual En Kg.	Emisiones Co2 Por Mantenimiento 60 Años En Kg.	Total de Emisiones Co2 En 60 Años.	Costo Consumo Eléctrico Anual.	Costo Consumo Eléctrico 60 Años A (VPN)	Costo Mantenimiento 60 Años A (VPN)
Prototipo Envolvente Vertical (Pev).	1,636.48	98,188.65	269	16,140	1,535			16,140	\$ 85,891	\$ 5,153,468	\$ 14,302,782.60
Mampostería Estructural (Me).	3,731.17	223,870.12	613	36,800				36,800	\$ 250,207	\$ 15,012,399	\$ 14,302,782.60
Muro Sistema Durapanel.	3,879.23	232,753.86	638	38,260				38,260	\$ 264,613	\$ 15,876,794	\$ 19,407,940.06
Muros En Sistema EIFS.	3,962.61	237,756.80	651	39,082				39,082	\$ 271,305	\$ 16,278,288	\$ 14,741,898.92
Mampostería Confinada (Mc).	4,258.74	255,524.27	700	42,003				42,003	\$ 292,545	\$ 17,552,692	\$ 14,302,782.60
Sistema Industrializado En Concreto (Si).	4,375.63	262,537.75	719	43,156				43,482	\$ 300,663	\$ 18,039,802	\$ 14,302,782.60
Repinte (anual)						5.44	326				
SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO.	6,997.89	419,873.37	1,150	69,019	560			72,319	\$ 633,612.71	\$ 38,016,762.53	\$ 14,302,782.60
Espuma de limpieza						10	500				
cambio de aparato cada 6 años							2,800				

Resultados del ACV

Como se aprecia en la ilustración 52, se graficó el análisis de ciclo de vida comparando la propuesta de envolvente contra seis alternativas; incluyendo un sistema activo de climatización, en este caso tres sistemas de aire acondicionado de mini Split de 12.000 BTU, consistentes para un área de apartamento teórica de 60 m². Se realizó un cruce de información entre los gastos por consumo eléctrico versus la cantidad de CO₂ producido en un período de 60 años. De acuerdo con esta gráfica; la envolvente propuesta es la alternativa de menores costos e impacto en producción de CO₂, con 16.140 kg de CO₂ producidos durante su vida útil y \$19.456.268 pesos colombianos en gastos de implementación.

La propuesta de envolvente al contrastarse con las tres principales líneas base en relación a sus costos de implementación y consumo, así como también su huella de carbono ofrece una reducción del 37.58 % en costos y un 60.3% menos en CO₂ durante su vida útil. Con respecto al polimuro y al sistema EIFS (Exterior Insulation Finish Systems). Sistemas de cerramiento conocidos por sus prestaciones térmicas, al compararse con la propuesta reflejan ser 58.69 % más costosos y un 41.7% más contaminantes.

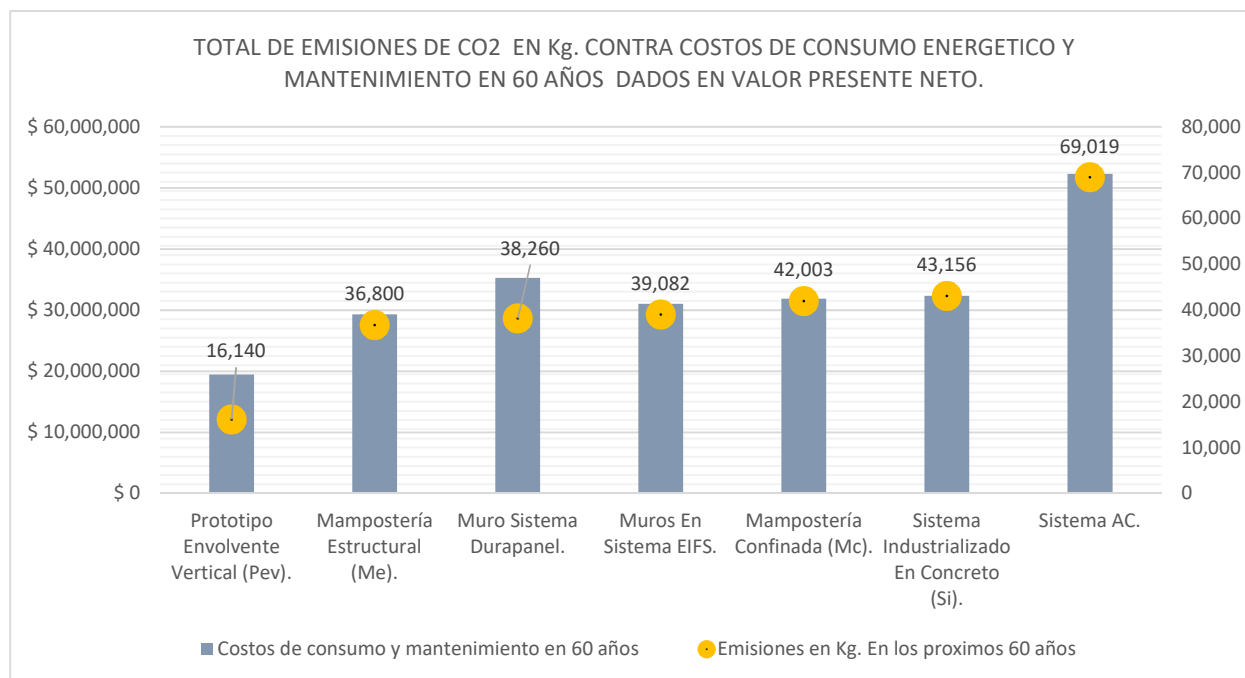


Ilustración 52. Gráfica de la totalidad de emisiones en kg de CO2 de cada alternativa contra los gastos económicos derivados del consumo de energía eléctrica. Ordenada en función de producción de CO2 en kg. Fuente: elaboración propia.

Discusión de Resultados Capítulo IV - Análisis Económico e Impacto Ambiental

Mediante la metodología de análisis de costo-beneficio, Valor Presente Neto y Análisis de Ciclo de Vida, fue posible establecer la idoneidad económica-ambiental del prototipo, cumpliendo el cuarto objetivo del proyecto de investigación; al compararlas con las soluciones constructivas de mayor uso en Colombia, junto con otras dos alternativas pasivas y una solución de climatización activa.

En Relación al Análisis Económico Costo Beneficio ACB

- El valor de implementación de la envolvente propuesta supera hasta en 4 veces las alternativas analizadas de acuerdo al análisis de precios unitarios. En lo que respecta al comportamiento a largo plazo supera a sus contrapartes, tanto en el índice costo-beneficio como en los flujos de caja llevados a valor presente neto, constituyendo la mejor opción de cerramiento de acuerdo al análisis.

- Por otro lado, envolventes de las que se esperaría un mejor desempeño como es el caso del Polimuro, tienen un comportamiento en el índice costo-beneficio bastante bajo, pero un mejor desempeño en los flujos de caja en VPN. Esto genera preguntas acerca de la confiabilidad de utilizar el ACB como único parámetro de decisión. Los demás resultados confirman esta disonancia entre los dos índices, lo cual coincide con lo expuesto por Hernandez (2013), cuando afirma que a pesar de que el ACB describe beneficios netos unitarios, se queda corto en relación con los beneficios netos producidos por el proyecto.

En Relación al Análisis de Ciclo de Vida CDV

En términos generales la envolvente propuesta supera a las demás alternativas en ahorro de costos económicos y en la reducción en la producción de CO₂. Constituyéndose como la mejor opción en el plazo de 60 años. Al comparar las líneas base entre sí se destaca el buen comportamiento de la mampostería estructural (ME) con respecto a mampostería confinada (MC) y los sistemas industrializados en concreto (SI) obteniendo una reducción del 13.57 % en emisiones y 10 % en costos.

Capítulo V. Conclusiones

El presente capítulo reúne los hallazgos de los anteriores cuatro apartados, producto de los objetivos trazados y de la metodología planteada; con el fin de crear una envolvente vertical opaca diseñada especialmente para el clima cálido tropical que ayude a combatir la insatisfacción térmica en las viviendas sociales (VIS) en altura, y de paso que disminuya el impacto ambiental y económico, producto del uso extendido de sistemas de climatización activa.

Este se divide en cuatro partes; en la primera se exponen las conclusiones relacionadas con el objetivo general y los objetivos específicos, en la segunda se discuten las preguntas e hipótesis de investigación, en la tercera se muestran los aportes dados a la disciplina, finalmente en la cuarta y última se proponen trabajos futuros que podrían ser una proyección de lo aquí encontrado.

En Relación a los Objetivos

Objetivo principal: Desarrollar y evaluar un Prototipo de Envolvente para la optimización del confort térmico en la vivienda Social del clima cálido.

Se propuso una envolvente opaca para la vivienda de interés social (VIS) en la tipología multifamiliar para el clima cálido tropical la cual integro estrategias como el auto sombreado, el intercambio de calor por evaporación con esferas de hidrogel, el aislamiento reflectivo y el uso del PETg como material de baja transmitancia térmica. Con la cual fue posible mejorar la comodidad térmica en la vivienda al compararse con los sistemas constructivos más utilizados en las envolventes verticales como los sistemas industrializados en concreto (SI), la mampostería estructural (ME) y la mampostería confinada (MC).

Este análisis arroja que la envolvente propuesta aumenta en un 39.24% las horas de satisfacción térmica en los apartamentos tipo (VIS) en altura con respecto al promedio de las líneas base. Pasando de 52% a 83% de horas al año en confort como se aprecia en la ilustración 52 del capítulo 3. En el análisis económico se demostró por medio del análisis costo beneficio (ACB) en el capítulo 4, ilustración 55. El prototipo fue la única envolvente que regreso la inversión con un índice de 3.05 o lo que es igual a retornar tres veces la inversión inicial después de 60 años.

En el análisis de ciclo de vida la envolvente como se corroboró en la ilustración 57 del capítulo 4, la propuesta es la alternativa de menores costos e impacto en producción de CO₂, con 16,140 kg de CO₂ producidos durante su vida útil y \$19,456,268 pesos colombianos entre gastos de implementación y energía usada para la climatización, Seguida por la mampostería estructural (ME) con \$29,315,181 COP y 36,800 kg de CO₂, la mampostería confinada con \$31,875,474 y 42,000 kg, los sistemas industrializados en concreto con \$32,342,584 y 43,156 kg y el sistema de climatización activa con \$48,809,451 y 61,387 kg de gases de efecto invernadero.

Objetivo Específico 1: Diseñar y Fabricar un Prototipo de Envolvente Opaca para el Clima Cálido Tropical

Este objetivo se llevó a cabo en el capítulo 1 en donde se realizó la conceptualización, diseño y fabricación del prototipo, empezando por una revisión de las estrategias recomendadas por varios autores para el clima cálido. Los cuales materializaron un concepto el cual se plasmó en un diseño de envolvente multicapa opaca para una Vis típica, ajustada a unas dimensiones físicas para ser producida digitalmente bajo el método de impresión en 3D.

Objetivo Específico 2: Determinar el Confort Térmico que un espacio (VIS) puede alcanzar con el prototipo de envolvente desarrollado.

Este objetivo pudo ser cumplido en el capítulo 3, los datos obtenidos en las pruebas experimentales del capítulo 2 sirvieron como insumo para estudiar la optimización del confort térmico en una vivienda de interés social en altura a través de la simulación energética; en donde se pudieron realizar comparaciones entre las líneas base y el prototipo. Con este estudio se pudo corroborar un aumento promedio en las horas de comodidad térmica frente a las líneas base de 39.24% distribuidos de la siguiente forma; un 39.7% frente a los sistemas industrializados en concreto (SI), 39.4% con respecto a la mampostería confinada (MC) y 38.6% de la mampostería estructural (ME), determinando de esta forma el impacto de mejora en el confort térmico en una (VIS) en altura en Cali durante gran parte de su vida útil.

Objetivo Específico 3: Evaluar la Relación Costo-Beneficio e Impacto Ambiental de la Solución Planteada Versus las Líneas Base y un Sistema de Climatización Activa

Para alcanzar este objetivo, se realizó un análisis costo beneficio de la propuesta y de cada línea base; contrastándose con los años 2020, 2030, 2040, 2050 y 2080, exceptuando la propuesta ninguna de las tipologías de cerramiento analizadas alcanza la factibilidad; es decir, ninguno de los índices supera o iguala el valor de la inversión inicial en el tiempo estudiado.

Posteriormente se analizaron los flujos de caja netos originados de cada una de las alternativas; encontrándose que los costos de energía utilizada para mantener las condiciones de comodidad térmica van aumentando y superando aproximadamente cuatro veces el valor de la construcción en cada una de las líneas base, exceptuando la envolvente propuesta que recupera aproximadamente el 3.05 veces su inversión inicial. Hay que señalar que esta comparación se realizó obteniendo el valor por m² de la envolvente basada método de López, (2015) para la estimación de coste de piezas plásticas por inyección, por lo que se considera que existe un amplio margen de mejora.

Para el análisis de impacto ambiental se realizó un estudio de ciclo de vida (ACV), el cual valoró las cargas ambientales asociadas a las líneas base, al prototipo y a un sistema de climatización activa; identificando tanto el uso de materia y energía, así como los impactos al entorno. La envolvente propuesta es la alternativa con menores costos e impacto en producción de CO₂; con 16.140 kg de CO₂ producidos durante su vida útil y \$19.456.250 pesos colombianos en gastos de implementación. Es decir, sus emisiones de dióxido de carbono de la propuesta de envolvente plástica multicapa son menores en un 33% que la mampostería estructural, en un 38% con respecto a la mampostería confinada, un 40% menor que los sistemas industrializados en concreto y produce durante su vida útil 76% menos emisiones que un sistema de climatización activa.

Respuestas a las Preguntas de Investigación

¿Cómo puede estar compuesta una envolvente vertical para VIS de formato multifamiliar que haga uso de múltiples estrategias bioclimáticas para mejorar el problema de insatisfacción térmica en la vivienda social en altura?

Como se vio en la tabla 2 del capítulo 1 los autores citados coinciden en ambientes tropicales y cálidos en minimizar las ganancias de calor mediante control solar apoyado por otras estrategias que mejoren el aislamiento térmico como el aislamiento reflectivo en materiales de alta inercia térmica como el PETg que fue seleccionado para construir las probetas. En especial en la vivienda social (VIS) se debe prever su fácil actualización ante las situaciones futuros incrementos en la temperatura producto del cambio climático como las observadas en la ilustración 41 del capítulo 3.

La envolvente como elemento arquitectónico, va mucho más allá de generar algunas condiciones de confort y cumple con otras características según lo menciona Varini (2016) como; delimitar, mediar, identificar y comunicar. Por lo que no hay un solo camino para el desarrollo de este tipo de dispositivos, sin embargo, la vinculación con la sostenibilidad reduciendo su impacto económico y ambiental, debería siempre ser el punto de partida.

Esta búsqueda vinculada a una visión de sostenibilidad, implica considerar numerosos factores como el confort térmico y lumínico, el ahorro económico, energético y emisiones. Un aspecto que no puede ser dejado de lado, es este comportamiento a lo largo de su vida útil, que podría garantizar resiliencia frente al cambio climático, como se vio en los ahorros económicos y energéticos de la ilustración 52 del capítulo 4.

¿Qué tan sustancialmente se puede impactar el confort térmico interior de una VIS al cambiar el sistema constructivo y geometría en la envolvente vertical?

Utilizando el método adaptativo se pudo observar un aumento promedio del 39.24% horas anuales de comodidad térmica dentro de las 80% de aceptabilidad con respecto a los sistemas constructivos mampostería confinada, mampostería estructural y sistemas industrializados en concreto, implementando la envolvente propuesta en un ambiente típico VIS y de un incremento 8.22% horas anuales de confort para el mismo apartamento, pero con la condición de cubierta (último piso). Estos datos solo reflejan la diferencia de confort entre los apartamentos tipo y los de esta condición en donde una estrategia de mayor impacto sería el tratamiento de la cubierta.

Estos porcentajes de mejora hacen referencia a un periodo de sesenta años teniendo en cuenta el incremento de temperatura producto del cambio climático en la ciudad de Santiago de Cali y tomando como referencia la herramienta desarrollada por El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el *Cambio Climático (IPCC)*.

¿Qué tan viable económica y ambientalmente puede ser una envolvente opaca diseñada para el trópico utilizando impresión digital y tecnologías bioclimáticas como el auto sombreado, hidrogel, y barrera radiante?

En el aspecto económico el retorno de la inversión fue de un 305% de acuerdo al análisis de costo-beneficio con \$15,383,626 pesos colombianos como se explicó en la conclusión del objetivo general, En la viabilidad ambiental la propuesta superó con amplio margen a los cerramientos más usados en el país en la VIS. La diferencia en el apartamento 301 elegido como el comportamiento promedio de una vivienda en un multifamiliar con la mampostería estructural fue de un 33% en lo que refiere a costos y a 56% en emisiones, para la mampostería confinada fue de 39% a costos y 62% en emisiones y los sistemas constructivos en concreto con 40% para costos y 63% para emisiones siendo la línea base frente a la cual presento mayor mejora.

En Relación a la Hipótesis

Hipótesis; la mejora de la vivienda de interés social a través de la implementación de una envolvente diseñada especialmente para el clima cálido, permite alcanzar los niveles mínimos de confort térmico, es decir un PPD menor al 20%.

Tal como se aprecia en la tabla 29, de acuerdo a la estimación de confort adaptativo, la envolvente propuesta durante su vida útil tan solo alcanza un promedio de 73.20 % de horas anuales de satisfacción térmica. Aunque, superior al 52.39% de horas anuales de comodidad térmica alcanzado por la envolvente fabricada con sistemas industrializados en concreto (SI), al 52.53% de la mampostería confinada (MC) y 52.80% de la mampostería estructural (ME).

Aportes a la Disciplina

Considerando que la inclusión de diversas estrategias bioclimáticas en un solo elemento no es una idea novedosa por sí misma, ésta permite dar pistas de cómo se diseña, construye y comporta un elemento de estas características en un contexto de clima tropical. De manera que su aporte a la disciplina en el estado del arte de las envolventes verticales puede ser enumerado de la siguiente manera:

1. Introduce una metodología propia para diseñar, evaluar y comparar el desempeño térmico de tratamientos para envolventes verticales opacas mediante la simulación-experimentación y fabricación digital.
2. Se propone una línea base alternativa tomando la resolución 0549 y lo estipulado por el DOE para simulación de vivienda multifamiliar en altura.
3. Recomienda la discusión sobre nuevas soluciones constructivas innovadoras a bajo costo para reducir la insatisfacción térmica, lo cual es útil no solo a nivel local puntual con la VIS de Cali, sino en las edificaciones en general, pertenecientes a zonas geográficas de climas calurosos durante todo el año o parte de él.
4. Se desarrolló la solución constructiva que combinó el auto sombreado, la evaporación, mediante esferas de hidrogel, el aislamiento reflectivo y rotura de puente térmico. Esta alternativa en 0.18 m supero en desempeño a sistemas de cerramientos alternativos como el dura panel (polimuro) y a otros tradicionales como el EIFS.

Trabajos Futuros

Continuar con el desarrollo de estos elementos de fachada que incluyan materiales de ciclos de recuperación como los plásticos en especial el PET que además contribuyan al confort térmico en ambientes tropicales.

Es necesario un desarrollo constructivo que lo hagan de fácil fabricación y montaje en obra incluso sobre métodos de construcción ya existentes. Por otro lado, el empleo de energías alternativas para el funcionamiento de los equipos de fabricación, puede ser un camino viable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de este tipo de elementos.

Como vio en el capítulo 3 en la evaluación del confort térmico para el apartamento 301 y 501 no se alcanzó el 100% horas anuales dentro del 80% de satisfacción térmica, a partir de lo cual se plantea la hipótesis que estos índices pueden ser fácilmente superados con la inclusión de la ventilación natural como estrategia para ambos casos y de la protección adicional a la radiación en la cubierta del apartamento 501. Se recomienda ahondar en este aspecto en trabajos futuros.

Se recomienda revisar las variables que no fueron tenidas en cuenta, ya sea por tiempo o por recursos en el presente trabajo, como, por ejemplo; el índice de reflectancia solar, un estudio en mayor detalle del ciclo de vida, así como también durabilidad y resistencia a los impactos. Ya que solo se abordó la optimización del confort en la VIS mediante la envolvente vertical, está claro que esto solo es una de las estrategias; la comodidad térmica debe ser evaluada en relación junto con todos los demás componentes y estrategias, como lo son la envolvente horizontal, la distribución arquitectónica, interior, de las ventanas y la ventilación natural.

A pesar de que las pruebas de caja caliente usando la plataforma electrónica basada en Arduino, para el proceso y recolección de datos por medio del módulo de temperatura DHT11, cumplió satisfactoriamente su función, se recomienda el uso de sensores de temperatura de mayor precisión y de rangos en las muestras, con el fin de obtener mayor fiabilidad y mayor nivel de detalle en las pruebas. Como el sensor DTH 22 e incluso se recomienda la utilización de otra plataforma como la Raspberry pi, ya que al ser un mini pc permite llevar más procesos al

tiempo, por lo que no tendría limitaciones en los bits de información como una plataforma Arduino.

Se propone como estudio futuro una revisión de la metodología, que permita encontrar una tasa de descuento apropiada para el análisis económico de estrategias bioclimáticas, ya que asumir el 10% como tasa de interés fue una medida arbitraria, y según la revisión de la literatura no hay consenso o guía en esta particularidad.

El análisis costo-beneficio no es totalmente confiable como herramienta de decisión; porque a semejanza de la TIR; puede resultar ofreciendo valores iguales para proyectos cuyos valores actuales netos son sumamente distintos; pues ambos describen beneficios netos unitarios, pero no dicen nada acerca de la totalidad de los beneficios netos producidos por el proyecto. Se hace indispensable el uso del VAN¹⁶ como instrumento de decisión para fines de selección entre proyectos mutuamente excluyentes, complementando el análisis CB.

Es necesario alinearnos con la tendencia mundial de integrar nuevos procesos junto con lo vernáculo, ampliando y estableciendo nuevos límites en torno a la impresión 3D como técnica de producción en la arquitectura. Las ventajas que posee como; la variabilidad de formas, modificación y personalización de acuerdo a variables, no fueron exploradas en la presente investigación, por lo que su capacidad como herramienta de diseño no fue aprovechada totalmente. Se recomienda la integración de esta tecnología junto con un flujo de trabajo que permita crear y materializar diseños performativos de acuerdo a múltiples variables.

¹⁶ Valor actual neto.

Bibliografía

AIA. (2012). *INTEGRATING ENERGY MODELING*.

Aksamija, A. (2015). High-Performance Building Envelopes: Design Methods. *BEST4 Conference*, 256. https://www.brikbase.org/sites/default/files/BEST4_4.2
Aksamija.paper_.pdf%0Ahttp://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118458605.html

Alfonso Garzón, C. A. (2018). *Análisis de diferentes clases de vidrio, para la elaboración de una ayuda gráfica como soporte técnico, que considere sus características térmicas, físicas y ópticas*. 68.

Alonso, C., Oteiza, I., & Navarro, J. G. (2009). *Criterios para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el proyecto de fachadas de edificios de viviendas*.
https://www.researchgate.net/publication/279499494_Criterios_Para_La_reduccion_de_emisiones_de_gases_de_efecto_invernadero_en_el_proyecto_de_fachadas_de_edificios_de_viviendas

Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., & Alonso, F. (2013). F2TE3: Sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres. *Informes de La Construcción*, 65(532), 443–456. <https://doi.org/10.3989/ic.12.068>

Andrade Santos, R., Flores-Colen, I., Simões, N., & Silvestre, J. D. (2020). Auto-responsive technologies for thermal renovation of opaque facades. *Energy and Buildings*, 217, 109968. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109968>

Arturo, R., & Gonz, C. (2017). *Principios para el diseño de vivienda social resiliente frente al cambio*. October.

Bano, F., & Kamal, M. A. (2016). Examining the Role of Building Envelope for Energy Efficiency in Office Buildings in India. *Architecture Research*, 6(5), 107–115.
<https://doi.org/10.5923/j.arch.20160605.01>

- Baumberger, C., Knutti, R., & Hirsch Hadorn, G. (2017). Building confidence in climate model projections: an analysis of inferences from fit. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(3), 1–20. <https://doi.org/10.1002/wcc.454>
- Bedoya, C. M. (2012). *SOSTENIBILIDAD TECNOLOGÍA Y HUMANISMO Viviendas de Interés Social y Prioritario Sostenibles en Colombia – VISS y VIPs – Sustainable Social and Priority Housing in Colombia Descriptores / Key Words*. 27–36.
http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/11911/27-36_Bedoya.pdf
- Bedoya Montoya, C. M. B. (2011). Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo. In *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* (Issue 6). [UPC, Servei de Biblioteques i Documentación].
<https://upcommons.upc.edu/handle/2099/11911>
- Bodach, S., & Hamhaber, J. (2010). Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Energy Policy*, 38(12), 7898–7910.
<https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.09.009>
- Campbell-Lendrum, D., & Corvalán, C. (2007). Climate Change and Developing-Country Cities: Implications For Environmental Health and Equity. *Journal of Urban Health*, 84(S1), 109–117. <https://doi.org/10.1007/s11524-007-9170-x>
- Campos, J., & Serebrisky, T. (2016). Social discount rate and project evaluation Some practical reflections for Latin America and the Caribbean. *Banco Interamericano de Desarrollo*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tasa-de-descuento-social-y-evaluación-de-proyectos-algunas-reflexiones-prácticas-para-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Chen, Z., Xie, Y. M., Wu, X., Wang, Z., Li, Q., & Zhou, S. (2019). On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties. *Materials and Design*, 183(August). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108109>
- Cox, R. A., Drews, M., Rode, C., & Nielsen, S. B. (2015). Simple future weather files for

- estimating heating and cooling demand. *Building and Environment*, 83, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.006>
- Cui, S., Ahn, C., Wingert, M. C., Leung, D., Cai, S., & Chen, R. (2016). Bio-inspired effective and regenerable building cooling using tough hydrogels. *Applied Energy*, 168, 332–339.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.058>
- CVC, DAGMA, & CIAT. (2016). *Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali*. 44.
- DANE. (2018). *Boletín Técnico Censo de Edificaciones (CEED)*.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ceed/bol_ceed_IVtrim18.pdf
- Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Rosenberg, M., Yazdanian, M., Huang, J., & Crawley, D. (2011). U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock. *Publications (E), February 2011*, 1–118. http://digitalscholarship.unlv.edu/renew_pubs/44
- Erba, S., Causone, F., & Armani, R. (2017). The effect of weather datasets on building energy simulation outputs. *Energy Procedia*, 134, 545–554.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.561>
- Erika, M. (n.d.). *Día del Reciclaje: ¿Qué tanto se recicla en América Latina? | La Onda Verde | NRDC*. 2017. Retrieved January 2, 2022, from <https://www.nrdc.org/es/experts/erika-moyer/dia-reciclaje-tanto-recicla-america-latina>
- Excellent CO2 balance | PET Recycling Team - A Member of the ALPLA Group*. (n.d.). Retrieved August 22, 2021, from <https://petrecyclingteam.com/en/excellent-co2-balance>
- Flandez, M. (2017). *Análisis Costo-Beneficio al Implementar Mejoras Constructivas Térmicas para Lograr Una Mayor Calificación Energética*.
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143343/analisis-costo-beneficio-de-mejoramientos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fonseca Díaz, N., & Tibaquirá Giraldo, J. (2008). Método para la estimación experimental de la

- conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R. *Scientia et Technica*, 2(39), 464–469. <https://doi.org/10.22517/23447214.3185>
- Gamboa, J., Posillo, R., Herrera, C., Lopez, O., & Iglesias, V. (2011). *CONFORT AMBIENTAL en la vivienda de Interés Social en Cali*. Universidad del Valle.
- Generador de precios de la construcción. Colombia. CYPE Ingenieros, S.A.* (n.d.). Retrieved March 22, 2021, from <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>
- Giraldo, C., Bedoya, C., & Alonso, L. (2015). Eficiencia Energética Y Sostenibilidad En La Vivienda De Interés Social En Colombia. *Greencities & Sostenibilidad. Convocatoria de Comunicaciones Científicas, Edición, 23*.
http://oa.upm.es/42543/1/INVE_MEM_2015_229809.pdf
- Giraldo C., W. (2018). *OPTIMIZACION DEL CONFORT TÉRMICO EN CLIMA ECUATORIAL CON TECNOLOGIAS PASIVAS EN FACHADA. CASO VIS CALI*. Universidad Nacional de La Plata.
- Giraldo, W. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y Desarrollo*, 3461, 78–101.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85248898006>
- Haddad, S., Barker, A., Yang, J., Kumar, D. I. M., Garshasbi, S., Paolini, R., & Santamouris, M. (2020). On the potential of building adaptation measures to counterbalance the impact of climatic change in the tropics. *Energy and Buildings*, 229, 110494.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110494>
- Hernandez, D. (n.d.). *Indicadores económicos para el análisis de proyectos - Monografias.com*. 2013. Retrieved March 23, 2021, from
<https://www.monografias.com/trabajos97/indicadores-economicos-analisis-proyectos/indicadores-economicos-analisis-proyectos.shtml>
- Ibrahim, A. (2019). 3D Printing Clay Facade walls Integrating Ventilation systems into printing process. In *Http://Www.Globalview.Gr* (Vol. 578, Issue July).

<http://www.globalview.gr/2016/06/30/62949/>

International Energy Agency, I. (2018). *The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable*. www.iea.org/t&c/

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis*. (2015th ed.).

Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L., & Bahaj, A. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514–524.

<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.12.049>

Jeyakumar, N., Jeyakumar, N., Program, M., & Seering, W. (2017). Diseño de sección de parteluz de muro cortina de alto rendimiento con varias densidades de giroide. In *博士论文* (Issue 2000).

Katili, A. R., Boukhanouf, R., & Wilson, R. (2015). Space Cooling in Buildings in Hot and Humid Climates—A Review of the Effect of Humidity on the Applicability of Existing Cooling Techniques. *Proceedings of 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET)*, August, 25–27. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3011.5287>

Kwong, Q. J., Adam, N. M., & Sahari, B. B. (2014). Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. *Energy and Buildings*, 68, 547–557. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.034>

Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo | ONU DAES | Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (n.d.). Retrieved December 28, 2020, from <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>

Latha, P. K., Darshana, Y., & Venugopal, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review. *Journal of Building Engineering*, 3, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>

- Lee, S. W., Lim, C. H., & Salleh, E. @. I. Bin. (2016). Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 643–661. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.07.002>
- López, G. D. (2015). *Costeo de piezas plásticas moldeadas por inyección - Plástico*. <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/147288-Costeo-de-piezas-plasticas-moldeadas-por-inyeccion.html>
- Lucchi, E., Roberti, F., & Alexandra, T. (2018). Definition of an experimental procedure with the hot box method for the thermal performance evaluation of inhomogeneous walls. *Energy and Buildings*, 179, 99–111. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.049>
- Luo, J. W., Chen, L., Min, T., Shan, F., Kang, Q., & Tao, W. Q. (2020). Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore-scale studies: Permeability, diffusivity and thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118837. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118837>
- Manuel, J., López, A., Morillón, D., & Rodríguez, L. (n.d.). *ANÁLISIS COSTO-BENEFICO ENTRE UN DISEÑO TRADICIONAL Y UN DISEÑO BIOCLIMÁTICO*.
- María, D., & Parra, B. (n.d.). *LA PROFUNDIDAD DE LA ENVOLVENTE*.
- Mason, R. B. (2002). Thermal Insulation with Aluminum Foil. *Industrial and Engineering Chemistry*, 25(3), 245–255. <https://doi.org/10.1021/IE50279A002>
- Medina-Patrón, N., & Escobar-Saiz, J. (2018). *Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales*.
- Medina-Patrón, N., & Escobar-Saiz, J. (2019). Envoltentes eficientes: relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura*, 21(1). <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>
- Misawa, Y., Hikone, S., Nakamura, M., Iwamoto, S., & Iwata, M. (2015). Diagonally arranged louvers in integrated facade systems - effects on the interior lighting environment. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(3–4), 163–182. <https://doi.org/10.3233/fde-150018>

- Modelos de circulación general* - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved January 1, 2021, from https://es.wikipedia.org/wiki/Modelos_de_circulación_general
- Mora, C., Frazier, A. G., Longman, R. J., Dacks, R. S., Walton, M. M., Tong, E. J., Sanchez, J. J., Kaiser, L. R., Stender, Y. O., Anderson, J. M., Ambrosino, C. M., Fernandez-Silva, I., Giuseffi, L. M., & Giambelluca, T. W. (2013). The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature*, 502(7470), 183–187. <https://doi.org/10.1038/nature12540>
- Osuna-Motta, I., Herrera-Cáceres, C., & López-Bernal, O. (2017). Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. *Revista de Arquitectura*, 19.
- Piccioni, V., Turrin, M., & Tenpierik, M. (2020). *A Performance-Driven Approach for the Design of Cellular Geometries with Low Thermal Conductivity for Application in 3D-Printed Façade Components*. 37(8), 1253–1264.
- Rathee, A., Mitrofanova, E., & Santayanon, P. (2014). *Hydroceramic* [IAAC]. https://issuu.com/akanksharathi/docs/final_booklet
- Resumen anual: El año 2018 en 14 gráficos*. (n.d.). Retrieved June 7, 2020, from <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/12/21/year-in-review-2018-in-14-charts>
- Rosillo, M., & Herrera, C. (2019). *CONFORT Y EFICIENCIA ENERGETICA EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES. UN ENFOQUE PRACTICO* (Universida).
- Rubiano Martín, M. A. (2016). La fachada ventilada y el confort climático: un instrumento tecnológico para edificaciones de clima cálido en Colombia. *Dearq Revista de Arquitectura / Journal of Architecture*, 18, 138–145. <https://doi.org/10.18389/dearq18.2016.08>
- Saavedra, A. (2014). *Revista BiT N°99*. Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT, de La Cámara Chilena de La Construcción, CChC. https://issuu.com/revista_bit/docs/bit_99
- Sadek, A. H., & Mahrous, R. (2018). Adaptive glazing technologies: Balancing the benefits of outdoor views in healthcare environments. *Solar Energy*, 174, 719–727. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.032>

- Sarakinioti, M. V., Turrin, M., Konstantinou, T., Tenpierik, M., & Knaack, U. (2018). Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control. *Materials Today Communications*, 15(March), 275–279.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.027>
- Serje Martínez, M. C. (2018). *VIENDAS DE INTERÉS SOCIAL, EN LA ZONA EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS SUROCCIDENTE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA*.
- Sterner, C. (n.d.). *Avoiding “Garbage In, Garbage Out”: A QA Guide for Architects | Sefaira*. Sefaira Web Page. Retrieved July 12, 2020, from <https://sefaira.com/resources/avoiding-garbage-in-garbage-out-a-qa-guide-for-architects/>
- Strauß, H. (2013). *AM Envelope / The potential of Additive Manufacturing for façade construction*.
- Utama, A., & Gheewala, S. H. (2009). Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 41(11), 1263–1268.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.07.025>
- Vanegas, F. A., & Sierra, B. S. (2017). *SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CERÁMICO A BASE DE HIDROGELES HIDROTAB*. 66.
- Varini, C. (2016a). *Ecoenvolventes: Entre continuidad e innovación (Spanish Edition)* (Universidad Piloto de Colombia (Ed.); 1.). Universidad Piloto De Colombia, 2016.
- Varini, C. (2016b). Factores de forma para el mejoramiento del confort en clima tropical. *Arte & Diseño*, 12(2), 51. <https://doi.org/10.15665/ad.v12i2.705>
- Vásquez, M. R. G., & Molina-Prieto, L. F. (2018). Envolvente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad. *Arkitekturax Visión FUA*, 1(1), 49–62.
<https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/ark/article/view/201>
- Velasco, M. C. B. A. R. G. V. L. M. Q. (2012). Uso de una herramienta computacional evolutiva para el diseño y optimización de vanos residenciales en el trópico [Use of an evolutionary

computational tool for the design and optimization of residential openings in the tropic].

SIGraDi 2012 [Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics] Brasil

- *Fortaleza 13-16 November 2012, Pp. 462-466.* [http://papers.cumincad.org/cgi-](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?sigradi2012_125)

[bin/works/Show?sigradi2012_125](http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?sigradi2012_125)

Vethaak, A. D., & Leslie, H. A. (2016). Plastic Debris Is a Human Health Issue. *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6825–6826. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B02569>

Wong, N. H., & Yu, C. (2008). *Tropical Urban Heat Islands: Climate, Buildings and Greenery.* <https://doi.org/10.4324/9780203931295>

AIA. (2012). *INTEGRATING ENERGY MODELING.*

Aksamija, A. (2015). High-Performance Building Envelopes: Design Methods. *BEST4 Conference*, 256. https://www.brikbases.org/sites/default/files/BEST4_4.2

Aksamija.paper_.pdf%0Ahttp://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-1118458605.html

Alfonso Garzón, C. A. (2018). *Análisis de diferentes clases de vidrio, para la elaboración de una ayuda gráfica como soporte técnico, que considere sus características térmicas, físicas y ópticas.* 68.

Alonso, C., Oteiza, I., & Navarro, J. G. (2009). *Criterios para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el proyecto de fachadas de edificios de viviendas.* https://www.researchgate.net/publication/279499494_Criterios_Para_La_reduccion_de_emisiones_de_gases_de_efecto_invernadero_en_el_proyecto_de_fachadas_de_edificios_de_viviendas

Alonso, L., Bedoya, C., Lauret, B., & Alonso, F. (2013). F2TE3: Sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres. *Informes de La Construcción*, 65(532), 443–456. <https://doi.org/10.3989/ic.12.068>

- Andrade Santos, R., Flores-Colen, I., Simões, N., & Silvestre, J. D. (2020). Auto-responsive technologies for thermal renovation of opaque facades. *Energy and Buildings*, 217, 109968. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109968>
- Arturo, R., & Gonz, C. (2017). *Principios para el diseño de vivienda social resiliente frente al cambio. October*.
- Bano, F., & Kamal, M. A. (2016). Examining the Role of Building Envelope for Energy Efficiency in Office Buildings in India. *Architecture Research*, 6(5), 107–115. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20160605.01>
- Baumberger, C., Knutti, R., & Hirsch Hadorn, G. (2017). Building confidence in climate model projections: an analysis of inferences from fit. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(3), 1–20. <https://doi.org/10.1002/wcc.454>
- Bedoya, C. M. (2012). *SOSTENIBILIDAD TECNOLOGÍA Y HUMANISMO Viviendas de Interés Social y Prioritario Sostenibles en Colombia – VISS y VIPS – Sustainable Social and Priority Housing in Colombia Descriptores / Key Words*. 27–36. [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/11911/27-36 Bedoya.pdf](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/11911/27-36%20Bedoya.pdf)
- Bedoya Montoya, C. M. B. (2011). Revista internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo. In *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* (Issue 6). [UPC, Servei de Biblioteques i Documentación]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/11911>
- Bodach, S., & Hamhaber, J. (2010). Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Energy Policy*, 38(12), 7898–7910. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.09.009>
- Campbell-Lendrum, D., & Corvalán, C. (2007). Climate Change and Developing-Country Cities: Implications For Environmental Health and Equity. *Journal of Urban Health*, 84(S1), 109–117. <https://doi.org/10.1007/s11524-007-9170-x>
- Campos, J., & Serebrisky, T. (2016). Social discount rate and project evaluation Some practical

- reflections for Latin America and the Caribbean. *Banco Interamericano de Desarrollo*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tasa-de-descuento-social-y-evaluación-de-proyectos-algunas-reflexiones-prácticas-para-América-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Chen, Z., Xie, Y. M., Wu, X., Wang, Z., Li, Q., & Zhou, S. (2019). On hybrid cellular materials based on triply periodic minimal surfaces with extreme mechanical properties. *Materials and Design*, 183(August). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108109>
- Cox, R. A., Drews, M., Rode, C., & Nielsen, S. B. (2015). Simple future weather files for estimating heating and cooling demand. *Building and Environment*, 83, 104–114.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.006>
- Cui, S., Ahn, C., Wingert, M. C., Leung, D., Cai, S., & Chen, R. (2016). Bio-inspired effective and regenerable building cooling using tough hydrogels. *Applied Energy*, 168, 332–339.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.058>
- CVC, DAGMA, & CIAT. (2016). *Estudio para la Microzonificación Climática para el Municipio de Santiago de Cali*. 44.
- DANE. (2018). *Boletín Técnico Censo de Edificaciones (CEED)*.
https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ceed/bol_ceed_IVtrim18.pdf
- Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., Liu, B., Halverson, M., Winiarski, D., Rosenberg, M., Yazdanian, M., Huang, J., & Crawley, D. (2011). U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock. *Publications (E)*, February 2011, 1–118. http://digitalscholarship.unlv.edu/renew_pubs/44
- Erba, S., Causone, F., & Armani, R. (2017). The effect of weather datasets on building energy simulation outputs. *Energy Procedia*, 134, 545–554.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.561>
- Erika, M. (n.d.). *Día del Reciclaje: ¿Qué tanto se recicla en América Latina? | La Onda Verde | NRDC*. 2017. Retrieved January 2, 2022, from <https://www.nrdc.org/es/experts/erika->

moyer/dia-reciclaje-tanto-recicla-america-latina

Excellent CO2 balance | PET Recycling Team - A Member of the ALPLA Group. (n.d.).

Retrieved August 22, 2021, from <https://petrecyclingteam.com/en/excellent-co2-balance>

Flandez, M. (2017). *Análisis Costo-Beneficio al Implementar Mejoras Constructivas Térmicas para Lograr Una Mayor Calificación Energética.*

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/143343/analisis-costo-beneficio-de-mejoramientos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fonseca Díaz, N., & Tibaquirá Giraldo, J. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R. *Scientia et Technica*, 2(39), 464–469. <https://doi.org/10.22517/23447214.3185>

Gamboa, J., Posillo, R., Herrera, C., Lopez, O., & Iglesias, V. (2011). *CONFORT AMBIENTAL en la vivienda de Interés Social en Cali.* Universidad del Valle.

Generador de precios de la construcción. Colombia. CYPE Ingenieros, S.A. (n.d.). Retrieved March 22, 2021, from <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>

Giraldo, C., Bedoya, C., & Alonso, L. (2015). Eficiencia Energética Y Sostenibilidad En La Vivienda De Interés Social En Colombia. *Greencities & Sostenibilidad. Convocatoria de Comunicaciones Científicas, Edición, 23.*

http://oa.upm.es/42543/1/INVE_MEM_2015_229809.pdf

Giraldo C., W. (2018). *OPTIMIZACION DEL CONFORT TÉRMICO EN CLIMA ECUATORIAL CON TECNOLOGIAS PASIVAS EN FACHADA. CASO VIS CALI.* Universidad Nacional de La Plata.

Giraldo, W. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y Desarrollo*, 3461, 78–101.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85248898006>

Haddad, S., Barker, A., Yang, J., Kumar, D. I. M., Garshasbi, S., Paolini, R., & Santamouris, M. (2020). On the potential of building adaptation measures to counterbalance the impact of

climatic change in the tropics. *Energy and Buildings*, 229, 110494.

<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110494>

Hernandez, D. (n.d.). *Indicadores económicos para el análisis de proyectos - Monografias.com*.

2013. Retrieved March 23, 2021, from

<https://www.monografias.com/trabajos97/indicadores-economicos-analisis-proyectos/indicadores-economicos-analisis-proyectos.shtml>

Ibrahim, A. (2019). 3D Printing Clay Facade walls Integrating Ventilation systems into printing process. In *Http://Www.Globalview.Gr* (Vol. 578, Issue July).

<http://www.globalview.gr/2016/06/30/62949/>

International Energy Agency, I. (2018). *The Future of Cooling Opportunities for energy-efficient air conditioning Together Secure Sustainable*. www.iea.org/t&c/

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014. Informe de síntesis*. (2015th ed.).

Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L., & Bahaj, A. S. (2013). Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy*, 55, 514–524.

<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2012.12.049>

Jeyakumar, N., Jeyakumar, N., Program, M., & Seering, W. (2017). Diseño de sección de parteluz de muro cortina de alto rendimiento con varias densidades de giroide. In *博士论文* (Issue 2000).

Katili, A. R., Boukhanouf, R., & Wilson, R. (2015). Space Cooling in Buildings in Hot and Humid Climates—A Review of the Effect of Humidity on the Applicability of Existing Cooling Techniques. *Proceedings of 14th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET)*, August, 25–27. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3011.5287>

Kwong, Q. J., Adam, N. M., & Sahari, B. B. (2014). Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. *Energy and*

- Buildings*, 68, 547–557. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.034>
- Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo | ONU DAES | Naciones Unidas Departamento de Asuntos Económicos y Sociales.* (n.d.). Retrieved December 28, 2020, from <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Latha, P. K., Darshana, Y., & Venugopal, V. (2015). Role of building material in thermal comfort in tropical climates – A review. *Journal of Building Engineering*, 3, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.003>
- Lee, S. W., Lim, C. H., & Salleh, E. @. I. Bin. (2016). Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 643–661. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.07.002>
- López, G. D. (2015). *Costeo de piezas plásticas moldeadas por inyección - Plástico.* <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/147288-Costeo-de-piezas-plasticas-moldeadas-por-inyeccion.html>
- Lucchi, E., Roberti, F., & Alexandra, T. (2018). Definition of an experimental procedure with the hot box method for the thermal performance evaluation of inhomogeneous walls. *Energy and Buildings*, 179, 99–111. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.049>
- Luo, J. W., Chen, L., Min, T., Shan, F., Kang, Q., & Tao, W. Q. (2020). Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore-scale studies: Permeability, diffusivity and thermal conductivity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118837. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118837>
- Manuel, J., López, A., Morillón, D., & Rodríguez, L. (n.d.). *ANÁLISIS COSTO-BENEFICO ENTRE UN DISEÑO TRADICIONAL Y UN DISEÑO BIOCLIMÁTICO.*
- María, D., & Parra, B. (n.d.). *LA PROFUNDIDAD DE LA ENVOLVENTE.*
- Mason, R. B. (2002). Thermal Insulation with Aluminum Foil. *Industrial and Engineering Chemistry*, 25(3), 245–255. <https://doi.org/10.1021/IE50279A002>

- Medina-Patrón, N., & Escobar-Saiz, J. (2018). *Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales*.
- Medina-Patrón, N., & Escobar-Saiz, J. (2019). Envolventes eficientes: relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura*, 21(1). <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2140>
- Misawa, Y., Hikone, S., Nakamura, M., Iwamoto, S., & Iwata, M. (2015). Diagonally arranged louvers in integrated facade systems - effects on the interior lighting environment. *Journal of Facade Design and Engineering*, 2(3–4), 163–182. <https://doi.org/10.3233/fde-150018>
- Modelos de circulación general - Wikipedia, la enciclopedia libre*. (n.d.). Retrieved January 1, 2021, from https://es.wikipedia.org/wiki/Modelos_de_circulación_general
- Mora, C., Frazier, A. G., Longman, R. J., Dacks, R. S., Walton, M. M., Tong, E. J., Sanchez, J. J., Kaiser, L. R., Stender, Y. O., Anderson, J. M., Ambrosino, C. M., Fernandez-Silva, I., Giuseffi, L. M., & Giambelluca, T. W. (2013). The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature*, 502(7470), 183–187. <https://doi.org/10.1038/nature12540>
- Osuna-Motta, I., Herrera-Cáceres, C., & López-Bernal, O. (2017). Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. *Revista de Arquitectura*, 19.
- Piccioni, V., Turrin, M., & Tenpierik, M. (2020). *A Performance-Driven Approach for the Design of Cellular Geometries with Low Thermal Conductivity for Application in 3D-Printed Façade Components*. 37(8), 1253–1264.
- Rathee, A., Mitrofanova, E., & Santayanon, P. (2014). *Hydroceramic* [IAAC]. https://issuu.com/akanksharathi/docs/final_booklet
- Resumen anual: El año 2018 en 14 gráficos*. (n.d.). Retrieved June 7, 2020, from <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/12/21/year-in-review-2018-in-14-charts>
- Rosillo, M., & Herrera, C. (2019). *CONFORT Y EFICIENCIA ENERGETICA EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES. UN ENFOQUE PRACTICO* (Universida).

- Rubiano Martín, M. A. (2016). La fachada ventilada y el confort climático: un instrumento tecnológico para edificaciones de clima cálido en Colombia. *Dearq Revista de Arquitectura / Journal of Architecture*, 18, 138–145. <https://doi.org/10.18389/dearq18.2016.08>
- Saavedra, A. (2014). *Revista BiT N°99*. Corporación de Desarrollo Tecnológico, CDT, de La Cámara Chilena de La Construcción, CChC. https://issuu.com/revista_bit/docs/bit_99
- Sadek, A. H., & Mahrous, R. (2018). Adaptive glazing technologies: Balancing the benefits of outdoor views in healthcare environments. *Solar Energy*, 174, 719–727. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.032>
- Sarakinioti, M. V., Turrin, M., Konstantinou, T., Tenpierik, M., & Knaack, U. (2018). Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control. *Materials Today Communications*, 15(March), 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2018.02.027>
- Serje Martínez, M. C. (2018). *VIENDAS DE INTERÉS SOCIAL, EN LA ZONA EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS SUROCCIDENTE DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA*.
- Sterner, C. (n.d.). *Avoiding “Garbage In, Garbage Out”: A QA Guide for Architects* | Sefaira. Sefaira Web Page. Retrieved July 12, 2020, from <https://sefaira.com/resources/avoiding-garbage-in-garbage-out-a-qa-guide-for-architects/>
- Strauß, H. (2013). *AM Envelope / The potential of Additive Manufacturing for façade construction*.
- Utama, A., & Gheewala, S. H. (2009). Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 41(11), 1263–1268. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.07.025>
- Vanegas, F. A., & Sierra, B. S. (2017). *SISTEMA DE ENFRIAMIENTO CERÁMICO A BASE DE HIDROGELES HIDROTAB*. 66.
- Varini, C. (2016a). *Ecoenvolventes: Entre continuidad e innovación (Spanish Edition)*

(Universidad Piloto de Colombia (Ed.); 1.). Universidad Piloto De Colombia, 2016.

Varini, C. (2016b). Factores de forma para el mejoramiento del confort en clima tropical. *Arte & Diseño*, 12(2), 51. <https://doi.org/10.15665/ad.v12i2.705>

Vásquez, M. R. G., & Molina-Prieto, L. F. (2018). Envolvente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad. *Arkitekturax Visión FUA*, 1(1), 49–62.
<https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/ark/article/view/201>

Velasco, M. C. B. A. R. G. V. L. M. Q. (2012). Uso de una herramienta computacional evolutiva para el diseño y optimización de vanos residenciales en el trópico [Use of an evolutionary computational tool for the design and optimization of residential openings in the tropic]. *SIGraDi 2012 [Proceedings of the 16th Iberoamerican Congress of Digital Graphics] Brasil - Fortaleza 13-16 November 2012, Pp. 462-466*. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/Show?sigradi2012_125

Vethaak, A. D., & Leslie, H. A. (2016). Plastic Debris Is a Human Health Issue. *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6825–6826. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.6B02569>

Wong, N. H., & Yu, C. (2008). *Tropical Urban Heat Islands: Climate, Buildings and Greenery*.
<https://doi.org/10.4324/9780203931295>

Ilustraciones

Ilustración 1. Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad de acuerdo con el método gráfico del estándar ASHRAE 55. Fuente: Ordóñez (2021). **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 2. Captura de Pantalla web CBE Thermal Confort Tool. Fuente:
<https://comfort.cbe.berkeley.edu/>..... **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 3. Rangos de temperatura operativa aceptable para edificios ventilados naturalmente según el ASHRAE-55. **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 4. Mapa conceptual del marco teórico propuesto para la investigación en diseño de envolventes. Fuente: elaboración propia	41
Ilustración 5. La vivienda social se ha priorizado la masificación sobre el confort térmico y la sostenibilidad a lo largo de su vida útil. Sistemas industrializados en concreto. Fuente: iStock.	16
Ilustración 6. Imágenes térmicas del interior de una VIS construida con sistema industrializado en Concreto. Fuente Barona (2016).	17
Ilustración 7.. Sistemas constructivos en el mercado de Vivienda en 2019. Fuente: tomado de DANE (2019).....	18
Ilustración 8. Metros cuadrados de Vivienda en Colombia en 2019. Fuente: tomado de DANE (2019).....	19
Ilustración 9. Efecto de los materiales en la envolvente, Fotografía e imagen térmica de la fachada oeste del conjunto Calicanto en Cali a las 2pm. Tomado de Gamboa, Rosillo, Herrera, López & Iglesias (2011).....	20
Ilustración 10. Árbol de problemas, causas y efectos que derivan en la insatisfacción térmica en la vivienda social en altura. Fuente: elaboración propia.....	22
Ilustración 11. Árbol de objetivos propuesto. Fuente: elaboración propia.	27
Ilustración 12. Porcentaje de consumo energético y emisiones por industria. Fuente: “IEA Word Energy Statistics and Balances” y “Energy Technology Perspectives”	30
Ilustración 13. Porcentaje de consumos estimados para edificios en el trópico. Fuente: Katili et al., (2015).....	30
Ilustración 14. Comparación entre el porcentaje de envolventes entre tipologías unifamiliar y multifamiliar para un área habitable de 57.6m ² , con una WWR de 31% y una altura entre pisos de 2.7m. Fuente: elaboración propia.....	31
Ilustración 15. Desarrollo de la investigación, objetivos y las conexiones entre los diferentes datos. Fuente: elaboración propia.	56

Ilustración 16. Dibujo conceptual propuesta por Varini 2014. Fuente: elaboración propia.	60
Ilustración 17. Dos tipos de superficies orgánicas; a la izquierda, estructura de piel humana, a la derecha la de una hoja. Ambas imágenes tienen en común estructuras complejas, órganos y células especializadas que desempeñan también diferentes funciones. Una de la más importantes, funcionar como un filtro entre el adentro y el afuera, bloqueando o transfiriendo energía entre el exterior y el interior, de acuerdo a la necesidad. Fuente: elaboración propia.....	61
Ilustración 18. “Un muro para todas las estaciones”, modelo de envolvente adaptativa creada por Mike Davies en 1978, el cual planteaba superar los problemas energéticos derivados de las fachadas de vidrio miesiánicas. Este modelo es una analogía orgánica de estructuras naturales como las de la ilustración 2, en su condición de regulador de procesos. Fuente: RIBA Journal (1981).....	61
Ilustración 19. Concepto de diseño de fachada adaptada para el trópico, tomando como núcleo el aislamiento reflectivo planteado por Giraldo (2018) y las ideas de Mike Davies 1980 y Varini 2014, entre otros. Fuente: elaboración propia.	63
Ilustración 20. Componentes de la Envolvente Opaca; 1 Auto sombreado, 2 Hidrocapa, 3 Aislamiento Reflectivo, 4 Base. Fuente: elaboración propia.	64
Ilustración 21. Estructura usada como auto sombreado compuesta por giroides. Fuente: elaboración propia.....	66
Ilustración 22. Gráfica comparativa entre las opciones de protección solar estudiada. Fuente: elaboración Propia.	67
Ilustración 23. Basada Rathee et al., (2014) Los hidrogeles funcionan como redes tridimensionales de polímero, en donde el agua llena el espacio entre moléculas. A través de su enorme capacidad para recolectar y liberar humedad pueden contener hasta el 90% de su peso en este líquido aumentando hasta 5 veces su volumen. Fuente Rathee et al., (2014).....	70

Ilustración 24.. Giroide Shwarz P. (1865) usado de forma repetitiva para alojar el hidrogel.

Fuente: elaboración propia.....70

Ilustración 25. Sección A. Giraldo (2018) solución constructiva de aislamiento reflectivo. Planta

B. propuesta de aislamiento constructivo para su impresión 3D. E inserción en el modelo

de fachada opaca. Fuente: elaboración propia.....73

Ilustración 26. Simulación Térmica en FUSION 360 licencia estudiantil. Se aplicó sobre la

carga exterior una carga directa de 300 W/m². Fuente: elaboración propia.73

Ilustración 27. Pasos adoptados para el desarrollo del prototipo. Fuente: elaboración propia. .77

Ilustración 28 Fotografía de las Pruebas de Retracción efectuadas. Fuente: elaboración

propia.80

Ilustración 29. Fotografía a la izquierda, normal funcionamiento de la impresora fabricando el

auto sombreado, a la derecha error en la fabricación por dejar la impresora funcionando

sin supervisión al correrse el volumen que fabricaba. Fuente: elaboración propia.....80

Ilustración 30. Producto final armado, probeta del prototipo de envolvente diseñada para el

trópico. Fuente: elaboración propia.80

Ilustración 31. Diagrama de la vista frontal y sección del calorímetro. Fuente: elaboración

propia.¡Error! Marcador no definido.

Ilustración 32. Fotografía de Rack para la toma de datos. Fuente: elaboración propia..... ¡Error!

Marcador no definido.

Ilustración 33. Fotografía de la instalación en sitio de las probetas. Fuente: elaboración propia.

.....¡Error! Marcador no definido.

Ilustración 34. Gráfica comparativa entre temperatura exterior y módulo testigo. Fuente:

elaboración propia.....¡Error! Marcador no definido.

Ilustración 35. Comparativa entre los promedios de humedad. Fuente: elaboración propia.

.....¡Error! Marcador no definido.

Ilustración 36. Comparativa entre los promedios de temperaturas. Fuente: elaboración propia.	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 37. Diseño de la Caja Caliente, en donde se aprecia la ubicación de la probeta, así como los diferentes sensores de captura de datos. Fuente: elaboración propia.....	83
Ilustración 38, Fotografías del calorímetro a) imagen del calorímetro con instalación, b) imagen del calorímetro en funcionamiento con la probeta instalada. Fuente: elaboración propia. .	84
Ilustración 39. Comparación entre los resultados obtenidos por el prototipo frente a otras alternativas de cerramiento presentes en el estado del arte. Fuente: elaboración propia. .	89
Ilustración 41. Comparación entre los diferentes modelos geométricos para la simulación energética. Fuente: elaboración propia.	102
Ilustración 42. Planta modelo de distribución propuesta para tipologías VIP y VIS, el sombreado amarillo corresponde a los apartamentos, las áreas naranjas a las circulaciones verticales. Fuente: elaboración propia.....	102
Ilustración 43. Ubicación de los espacios elegidos para la obtención de resultados de la simulación. Fuente: elaboración propia.	102
Ilustración 44. Modelo geométrico para la simulación de la envolvente, realizado con los datos del capítulo 2. Fuente elaboración propia.....	104
Ilustración 45. Modelo geométrico para la simulación de la envolvente con la disminución en su WWR y con protección solar en su fachada norte. Fuente elaboración propia.	105
Ilustración 46. A la izquierda la estación climatológica de la Universidad del Valle tomado de “INFORME ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA Univalle Cali,” (n.d.) a la derecha localización en un punto rojo, tomada de la plataforma DHIME del IDEAM. Fuente: elaboración propia.	106
Ilustración 47. Variación en proyecciones de temperatura de bulbo seco para la ciudad de Santiago de Cali, producto de CCWorldWeatherGen sobre los años 2020, 2050 y 2080 para la hora crítica de las 14Hrs. Fuente: elaboración propia.	108

Ilustración 48. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema industrializado en concreto (SI). Fuente: elaboración propia.....	110
Ilustración 49. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020, y proyectada para los años 2050, y 2080. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema Mampostería Confinada (MC). Fuente: elaboración propia.....	112
Ilustración 50. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema Mampostería Estructural (ME). Fuente: elaboración propia.....	113
Ilustración 51. Gráfica de la comodidad térmica alcanzada en el año 2020. Para la tipología VIS en su apartamento 301 construida con el Sistema de Envolvente Propuesto Fuente: elaboración propia.....	115
Ilustración 52. Gráfica comparativa de aceptabilidad térmica entre los sistemas constructivos y su proyección en el tiempo, para el apartamento 301 en la tipología VIS. Fuente: elaboración propia.....	117
Ilustración 53. Gráfica comparativa de aceptabilidad térmica entre los sistemas constructivos y su proyección en el tiempo, para el apartamento 501 en la tipología VIS. Fuente: elaboración propia.....	117
Ilustración 54. Fórmula de la gráfica realizada en Excel para la opción de aire acondicionado. Encontrada al tomar el mínimo de personas dentro del 80% de aceptabilidad y la tasa en que desmejora el confort térmico en el tiempo a partir de las líneas base. Fuente: elaboración propia.....	124
Ilustración 55. Análisis de Coste-Beneficio dados por alternativa en un período de 60 años. Fuente: elaboración propia.....	130
Ilustración 56. Flujo de caja en Valor Presente Neto de cada alternativa en un período de 60 años. Fuente: elaboración propia.	130

Ilustración 57. Gráfica de la totalidad de emisiones en kg de CO₂ de cada alternativa contra los gastos económicos derivados del consumo de energía eléctrica. Ordenada en función de producción de CO₂ en kg. Fuente: elaboración propia.134

Ecuación 1. Fórmula explicativa del análisis de costo- beneficio, a la derecha los resultados esperados.122

Ecuación 2. Fórmula para encontrar el valor presente neto.122

Ecuación 3. Forma en que se determinó el consumo anual para el sistema de aire acondicionado, como el área del apartamento evaluado no es menor a 60 m², un solo equipo de 12000 Btu. Es insuficiente por lo cual su número aumento a 3 equipos. Fuente: elaboración propia.....124

Ecuación 4. Ecuación final para obtener el consumo eléctrico para la opción de la envolvente propuesta tomando como base la fórmula de tendencia de la ilustración 54.125

Ecuación 5. Desglose del costo beneficio.126

Tablas

Tabla 1. Comparativa entre los Autores. Fuente: elaboración propia.....50

Tabla 2. Estrategias bioclimáticas en envolventes para el clima tropical. Fuente: elaboración propia.59

Tabla 3 Comparativa entre varios tipos de sombreado versus el propuesto por giroides. Fuente: elaboración propia.....68

Tabla 4. Comparativa entre simulación de tipos de relleno para el soporte. La primera fila corresponde al gasto de material y tiempo de impresión en un software de laminado, la segunda fila corresponde a las fuerzas verticales de peso propio y a las cargas de viento en donde las partes amarillas y rojas indican la mayor deformación, y la tercera corresponde al paso de calor a través de cada pieza y su resistencia térmica en donde se entiende que a razón de existir una mayor conexión entre superficies debido al número de celdas que hacen de “puente térmico” la opción de 12 celdas sea la que menor resistencia térmica presenta entre las alternativas. Fuente: elaboración propia.75

Tabla 5. Comparación entre los principales materiales usados para la fabricación aditiva. Fuentes: (Ultimate 3D Printing Material Properties Table, n.d.), Technical Data Sheet www.sd3d.com, y Title Unit Emisión factor Canadá goverment.	78
Tabla 6. Resultados de la calibración. Fuente: elaboración propia	88
Tabla 7. Línea base de la Vivienda de Interés Social VIS y Vivienda Social Prioritaria VIP según la 0549. Fuente: elaboración propia.	96
Tabla 8. Especificaciones construcción nueva edificio de vivienda de mediana altura según el Estándar ASHRAE 90.1-2004	98
Tabla 9. Especificación de la línea base Vivienda Social. Según el DTS del código construcción sostenible. Fuente: elaboración propia.	99
Tabla 10. Definición de los valores U de la envolvente con los sistemas constructivos más utilizados en Colombia. Junto con la definición del ASHRAE y la resolución 0549. Para mayor información sobre cómo se llegaron a estos valores Fuente: elaboración propia..	100
Tabla 11. Línea base propuesta para el modelado energético en donde se incorpora tanto los sistemas constructivos más utilizados como también una geometría más definida inspirada en el ejemplo del modelo de ASHRAE. Fuente: elaboración propia.	103
Tabla 12. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción Industrializado aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.....	111
Tabla 13. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción de Mampostería Confinada aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.....	112
Tabla 14. Cuadro comparativo de los resultados dados por el sistema de construcción de Mampostería Estructural aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.....	113
Tabla 15. Cuadro comparativo de los resultados dados por Sistema de Envolvente Propuesto aplicados a la tipología de Vivienda de Interés Social. Fuente: elaboración propia.	114
Tabla 16. Memoria de cálculo de precio por unidad de envolvente en la producción por inyección bajo la metodología planteada por G. López (2015), la unidad consta de 7 piezas como diseño en el capítulo 1, para determinar el área del edificio a cubrir se tomó la geometría del modelo de simulación del capítulo 3.	127
Tabla 17. Costes directos de cada alternativa. Fuente: elaboración propia.	127

Tabla 18. Análisis costo beneficio línea base aire acondicionado, aquí los ingresos son cero debido a que esta es la opción que no presenta ahorro en el costo de la energía. Fuente: elaboración propia.....	128
Tabla 19. Análisis costo beneficio de la envolvente propuesta. Fuente: elaboración propia.....	129
Tabla 20. Análisis de Ciclo de Vida. Fuente: elaboración propia.....	132

ANEXOS

Anexo 1

Transmitancia térmica de cerramientos verticales.

Tabla 1.

Calculo de valor U de un Muro en Concreto de 10cms en Sistemas industrializados (SI)

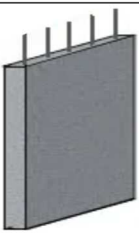
Capa.	Material.	Valor-R	Imagen
1	Superficie de aire exterior	0,06 m ² °K/W	
2	Acabado exterior granisplast Beige 1.5 mm.	0.002 m ² °K/W	
3	Muro en Concreto armado 10 cms	0.250 m ² °K/W	
4	Estuco y pintura blanca	0.037 m ² °K/W	
5	Superficie de aire interior en calma	0.12 m ² °K/W	
Total Valor-R		0.409 m ² °K/W	
Total valor U = 1/R		2.45 W/m ² °K	

Tabla 2.

Calculo de valor U de un Muro en de Mampostería de Arcilla confinada de 15 cms. (MC)

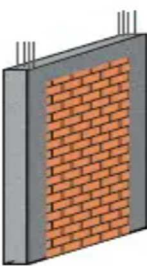
Capa.	Material.	Valor-R	Imagen
1	Superficie de aire exterior	0,06 m ² °K/W	
2	Muro en ladrillo cerámico hueco E=15cms	0.505 m ² °K/W	
3	Estuco y pintura blanca	0.037 m ² °K/W	
4	Superficie de aire interior en calma	0,12 m ² °K/W	
5	Vigas y Columnas dimensiones 15x30	0.092 m ² °K/W	
Valor R x seccion		0.542 m ² °K/W	
Porcentaje x seccion		80% 20%	
Total Valor-R		0.45205 m ² °K/W	
Total valor U = 1/R		2.21 W/m ² °K	

Tabla 3.

Calculo de valor U de un Muro en de Mampostería Estructural de 15 cms. (ME)

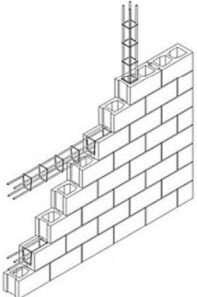
Capa.	Material.	Valor-R	Imagen
1	Superficie de aire exterior	0,06 m ² °K/W	
2	Muro en ladrillo arcilla	0.180 m ² °K/W	
3	Capa de aire	0.18 m ² °K/W	
3.1	Grouting relleno dovelas	0.070 m ² °K/W	
4	Estuco+pintura	0.037 m ² °K/W	
5	Superficie de aire interior en calma	0,12 m ² °K/W	
Valor R x seccion		0.287 m ² °K/W	
Porcentaje x seccion		20% 80%	
Total Valor-R		0.375 m ² °K/W	
Total valor U = 1/R		2.667 W/m ² °K	

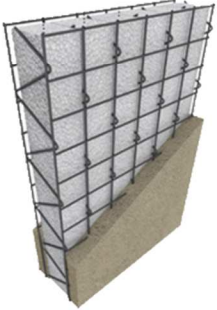
Tabla 4.

Calculo de valor U de un Muro en Poliestireno Expandido de 12 cm

Capa.	Material.	Valor-R	Imagen
1	Superficie de aire exterior	0.060 m ² °K/W	
2	Poliestireno expandido 1 m ² x 0.12 m densidad 10 kg/m ³	3.42 m ² °K/W	
4	Superficie de aire interior en calma	0.120 m ² °K/W	
Total Valor-R		3.540 m ² °K/W	
Total valor U = 1/R		0.282 W/m ² °K	

Tabla 4.

Calculo de valor U de un Muro en Poliestireno Expandido de alta densidad+Concreto de E=12 cm

Capa.	Material.	Valor-R	Imagen
1	Superficie de aire exterior	0,06 m ² °K/W	
2	Estuco+pintura	0.037 m ² °K/W	
3	Mortero 1:4	0.070 m ² °K/W	
4	Malla Electrosoldada	0.00016 m ² °K/W	
5	Durapanel, Panel x 1 m ² x 0.04 m	1.2 m ² °K/W	
6	Malla Electrosoldada	0.00016 m ² °K/W	
7	Mortero 1:4	0.070 m ² °K/W	
8	Estuco+pintura	0.037 m ² °K/W	
9	Superficie de aire interior en calma	0,12 m ² °K/W	
Total Valor-R		1.414 m ² °K/W	
Total valor U = 1/R		0.707 W/m ² °K	