

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Maestría en Construcciones Cohorte 1

Análisis Térmico Comparativo de las Cubiertas Mayormente Utilizadas en la Ciudad de Cuenca, a Partir de Simulación Digital Térmica.

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Magíster en Construcciones

Autor:

Jonnathan Daniel Villa Enderica

Director:

Jefferson Eloy Torres Quezada

ORCID:  0000-0002-1832-1369

Cuenca, Ecuador

2024-02-21



AUTOR:
ARQ. JONNATHAN DANIEL VILLA

DIRECTOR:
ARQ. PHD. JEFFERSON TORRES QUEZADA

CUENCA - ECUADOR
2023/09/21

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES
COHORTE 1

**ANÁLISIS TÉRMICO COMPARATIVO DE LAS CUBIERTAS
MAYORMENTE UTILIZADAS EN LA CIUDAD DE
CUENCA, A PARTIR DE SIMULACIÓN DIGITAL TÉRMICA**

Resumen

La envolvente es el medio físico por el cual la edificación se relaciona con el medio ambiente. En edificaciones cerca del 33% de la pérdida de calor se da a través de las paredes. Sin embargo, en países con latitudes bajas, la estructura crítica es la cubierta, debido que representa el componente principal expuesto a la radiación solar que intercambia alrededor del 50 y 60% de energía térmica entre el interior y el exterior.

En las últimas décadas, Cuenca y el Ecuador ha experimentado un cambio importante en sus sistemas constructivos. Estos cambios han desplazado la construcción vernácula con nuevos sistemas más industrializados que buscan una mayor productividad en tiempos y costos de construcción, dejando a un lado las características climáticas del lugar. Este hecho ha provocado que las cubiertas livianas de teja con carrizo, barro y estuco, sean sustituidas completamente por cubiertas con otras tecnologías.

La metodología se basa en simulaciones digitales con el uso del software Design Builder y el motor de cálculo Energy Plus. Los casos de estudio analizados corresponden a las tipologías de cubierta más utilizadas en la construcción Cuenca.

El estudio determino la importancia de la masa térmica, cavidad de aire y la optimización de las propiedades radiativas sobre la superficie exterior de la cubierta. Puesto que al aplicar estas estrategias el flujo de calor se regularizo y resulto en oscilaciones térmicas bajas y mejores condiciones de temperatura interior, mejorando el comportamiento de una cubierta pesada, pero sobretodo potenciando significativamente a la cubierta liviana en nuestro entorno climático.

Palabras Clave: Flujo de Calor, Oscilación térmica, Reflectividad, Emisividad.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The building envelope is the part of the structure that interacts with the environment. In buildings, approximately 33% of heat loss occurs through the walls. However, in countries with low latitudes, the roof is the critical structure because it is the main component exposed to solar radiation, which accounts for about 50 to 60% of the thermal energy exchange between the interior and exterior.

In recent decades, Cuenca and Ecuador have undergone significant changes in their construction systems. The displacement of vernacular construction with new, more industrialized systems has resulted in greater productivity in construction time and costs, but has also led to the neglect of the climatic characteristics of the place. As a consequence, light tile roofs made of reed, mud, and stucco have been completely replaced by roofs with other technologies.

The methodology used for this study is based on digital simulations utilizing the Design Builder software and the Energy Plus calculation engine. The analyzed case studies pertain to the most commonly used roof types in Cuenca construction.

The study concluded that optimizing the radiative properties on the exterior surface of the roof, along with thermal mass and air cavity, is crucial. By applying these strategies, we were able to regularize the heat flow, resulting in low thermal oscillations and improved interior temperature conditions. This led to better performance for a heavy roof and, most importantly, significantly enhanced the performance of a light roof in our climatic environment.

Keywords: Heat Flux, Thermal Oscillation, Reflectivity, Emissivity.



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Introducción.....	12
Problemática	13
Justificación	15
Objetivos	17
Hipótesis.....	17
Metodología.....	18

Capítulo 1: Marco teórico

22

1.1 La envolvente.....	22
1.1.1 Antecedentes históricos.....	22
1.1.2 Rol de la cubierta en el Ecuador.....	23
1.2 La cubierta en el clima andino de Ecuador	24
1.2.1 La región andina-sierra del Ecuador (ubicación-clima)	24
1.2.2 Cubiertas en la región andina.....	25
1.2.3 Cubiertas en la ciudad de Cuenca.....	25
1.3 Estado del arte	30
1.3.1 Comportamiento térmico de la cubierta.....	30
1.3.2 Estrategias de estudios previos.....	34
1.3.3 Simulación digital en el análisis térmico del edificio y la cubierta.....	39
1.4 Resumen del capítulo.....	41

Capítulo 2: Parámetros y modelo de estudio

44

2.1. Configuración del software.....	44
2.2. Caso de estudio.....	44
2.2.1. Características físicas.....	44
2.2.2. Características térmicas.....	46
2.3. Periodos de simulación.....	46

Índice de contenido

2.3.1. Fichero climático.....	46
2.4. Variables de estudio.....	48
2.4.1. Doble capa y asilamiento térmico.....	48
2.4.2. Reflectividad	48
2.4.3. Emisividad	48

Capítulo 3: Resultados

54

3.1 Análisis por variables	54
3.1.1 Doble capa y asilamiento térmico.....	54
3.1.2 Reflectividad	61
3.1.3 Emisividad	63
3.2 Resultados generales.....	64

Capítulo 4: Conclusiones

68

4.1 Conclusiones.....	68
4.2 Recomendaciones generales	69
4.3 Futuras investigaciones	70

Referencias

74**Anexos**

82

Índice de figuras

Figura 01: Centro Histórico, Cuenca Ecuador.....	12
Figura 02: Cubiertas Cuenca sector Medio Ejido	13
Figura 03: Flujo de calor en Envolventes	14
Figura 04: Río Tomebamba, Cuenca Ecuador	16
Figura 05: Teja colonial.....	17
Figura 06: Envolvente arquitectónica.....	22
Figura 07: Arquitectura como medio de Protección.....	22
Figura 08: Revolución Industrial.....	23
Figura 09: Mapa mundial, ubicación Ecuador.....	24
Figura 10: Cubierta, climas Andinos de Ecuador.....	24
Figura 11: Mapa, Regiones del Ecuador.....	24
Figura 12: Materiales predominantes en cubiertas de la región Andina, Ecuador.....	25
Figura 13: Cubiertas de Teja Cuenca, Ecuador.....	25
Figura 14: Medio Ejido, Cuenca - Ecuador.....	26
Figura 15: Materiales predominantes en cubiertas Cuenca, Ecuador.....	26
Figura 16: Fibrocemento Ondulado.....	27
Figura 17: Detalle constructivo cubierta Fibrocemento ondulado.....	27
Figura 18: Sección Cubierta Fibrocemento	27
Figura 19: Teja Cerámica.....	28
Figura 20: Detalle constructivo cubierta de Teja.....	28
Figura 21: Sección Cubierta de Teja sobre fibrocemento.....	28
Figura 22: Detalle constructivo cubierta Hormigón aligerado.....	29
Figura 23: Sistema Constructivo Losa Colaborante.....	29
Figura 24: Detalle constructivo cubierta Hormigón Colaborante.....	29
Figura 25: Transferencia de calor sobre la Cubierta.....	30
Figura 26: Radiación Electromagnética.....	31
Figura 27: Fotografía, cámara Higrotérmica, Regiones del espectro electromagnético.....	31
Figura 28: Reflectividad Solar y Emisividad infrarroja.....	32
Figura 29: Aislamiento térmico en cubiertas.....	35
Figura 30: Reflectividad y emisividad en 3 tipos de cubiertas.....	36
Figura 31: Detalle Constructivo, Cubierta Verde.....	38
Figura 32: Cubierta doble capa DSR y InsR.....	38
Figura 33: Transferencia anual de calor y Resistencia térmica de DSR e InsR en diversos climas.....	39
Figura 34: Cubiertas en Cuenca Ecuador.....	44
Figura 35: Modelo base (axonometría).....	45
Figura 36: Modelo base (Sección).....	45
Figura 37: Modelo base (planta alta).....	45
Figura 38: Promedio mensual de temperatura exterior del Aire Cuenca, Ecuador.....	47
Figura 39: Promedio mensual de HR Cuenca, Ecuador.....	47
Figura 40: Temperatura exterior del Aire día frío y día caliente en Cuenca Ecuador.....	47
Figura 41: Radiación Solar, Cuenca, Ecuador.....	47
Figura 42: Variables de estudio.....	48
Figura 43: Configuración de cubiertas CL y CP.....	50
Figura 44: Tai CL1, Doble Capa y Aislamiento térmico.....	55
Figura 45: Tai CL2, Doble Capa y Aislamiento térmico.....	56
Figura 46: Tai CP1, Doble Capa y Aislamiento térmico.....	57
Figura 47: Tai CP2, Doble Capa y Aislamiento térmico.....	58
Figura 48: Oscilación Térmica interior CL y CP para las variables Doble capa y Aislamiento.....	59
Figura 49: Oscilación Térmica interior CL y CP para la variable Reflectividad en el día frío.....	61
Figura 50: Oscilación Térmica interior CL y CP para la variable Emisividad en el día frío.....	63
Figura 51: Oscilación Térmica interior CL y CP emisividad y reflectividad óptima, día frío.....	65
Figura 52: Temperatura del ambiente interior, MAT original, día frío cubierta CL y CP.....	82
Figura 53: Temperatura del ambiente interior, MAT original, día caliente cubierta CL y CP.....	82

Figura 54: Temperatura del ambiente interior, Doble capa, día frío cubierta CL y CP	83
Figura 55: Temperatura del ambiente interior, Doble capa, día caliente cubierta CL y CP	83
Figura 56: Temperatura del ambiente interior, Aislamiento, día frío cubierta CL y CP	84
Figura 57: Temperatura del ambiente interior, Aislamiento, día caliente cubierta CL y CP	84
Figura 58: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CL1	85
Figura 59: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CL1	85
Figura 60: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CL2	86
Figura 61: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CL2	86
Figura 62: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CP1	87
Figura 63: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CP1	87
Figura 64: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CP2	88
Figura 65: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CP2	88
Figura 66: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CL1	89
Figura 67: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CL1	89
Figura 68: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CL2	90
Figura 69: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CL2	90
Figura 70: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CP1	91
Figura 71: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CP1	91
Figura 72: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CP2	92
Figura 73: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CP2	92
Figura 74: Temperatura del ambiente interior, día frío, Optimizada CL y CP	93
Figura 75: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Optimizada CL y CP	93

Índice de tablas

Tabla 01: <i>Zonas Climáticas Ecuador</i>	24
Tabla 02: <i>Tipologías de Cubiertas CL y CP</i>	27
Tabla 03: <i>Valores de Reflectividad Solar y Emisividad infrarroja</i>	33
Tabla 04: <i>Coeficiente de transferencia de calor para zona climática 3 NEC</i>	34
Tabla 05: <i>Proyección de ocupación del suelo Urbano, Cuenca</i>	45
Tabla 06: <i>Propiedades térmicas, materiales construcción</i>	46
Tabla 07: <i>Tipología de Cubiertas CL y CP</i>	48
Tabla 08: <i>Valores óptimos para reflectividad y emisividad CL y CP</i>	93

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría, durante este proceso.

A mis padres, quienes han sido una fuente constante de apoyo, aliento y amor a lo largo de mi vida profesional. Su dedicación y sacrificio han sido fundamentales para que yo haya llegado hasta aquí. Siempre estaré agradecido por sus palabras de aliento y su confianza en mí.

A mi esposa, quien junto a mis queridos hijos me han inspirado a superar obstáculos y a esforzarme por alcanzar mis metas.

También quiero expresar mi agradecimiento a todos los involucrados en el desarrollo de esta investigación. Su apoyo, conocimientos y colaboración han sido esenciales para llevar a cabo este proyecto de investigación.

Introducción

La arquitectura que se preocupa por el bienestar de los habitantes y que brinde confort térmico es porque ha consultado el clima del entorno. El clima da forma a los edificios, el clima da forma a la arquitectura (USG LATM, 2018). Es importante Hacer un uso responsable de la energía por que la mejor energía es la que no se consume (Cuerdo and National, 2021).

El presente estudio analiza el comportamiento térmico de las tipologías constructivas de cubierta de mayor aplicación en la ciudad de Cuenca mediante simulación digital, con el fin de identificar los parámetros y establecer recomendaciones de aplicación de manera que se mejore las condiciones interiores térmicas de una edificación en el área de diseño, o corrección de una sección existente.

En nuestro medio la norma ecuatoriana de la construcción, condiciona a los fabricantes a entregar fichas técnicas de sus productos con el fin de conocer las propiedades para aplicar de manera correcta los materiales de construcción. La producción artesanal y falta de control de calidad aporta que la mayoría de constructores carezcan de estos conocimientos y conformen envolventes tomando en cuenta otros factores, tales como sociales y económicos. Dejando por detrás las condiciones de temperatura

interior que puedan ofrecer dichas envolventes.

Para el desarrollo del estudio se identificó los principales sistemas constructivos de cubiertas, materialidades y propiedades térmicas del conjunto de materiales que conforman las envolventes de mayor uso en la ciudad de Cuenca, Para determinar estos indicadores y analizar el flujo de calor para las diferentes secciones homogéneas y heterogéneas.

La investigación no pretende que un área, sistema constructivo, o vivienda específica llegue al confort interior térmico. La investigación pretende analizar e identificar el comportamiento térmico de las secciones constructivas (específicamente para cubiertas) mediante el análisis de flujo de calor para obtener criterios de aplicación. Es importante conocer cómo influye cada tipología en la temperatura interior térmica y como se podría mejorar el sistema constructivo si fuese necesario para alcanzar mejores niveles de temperatura (confort).

Un gran porcentaje de edificaciones a nivel mundial, sin dejar a Cuenca como excepción a demostrado que sus proyectistas no consideran al clima como elemento prioritario al momento de diseñar un proyecto. Hecho que conlleva a ser parte de la principal problemática global de uso ineficiente de las energías y proveer arquitectura que no brinda confort.



Figura 01: Centro Histórico, Cuenca Ecuador.

Fuente: Propia.

Problemática

En la actualidad a nivel mundial es de gran importancia reducir el consumo energético durante el periodo de consolidación y uso de las edificaciones. La energía consumida por el sector de la construcción ocupa aproximadamente un 40% del margen mundial, atribuyendo la mayor parte de este consumo a sistemas de climatización en los sectores residencial y comercial con el fin de generar confort interior (Castilla et al., 2010).

La demanda de energía crece paralelamente con la expansión urbana, en el mundo alrededor del 50% de la población vive en áreas urbanas y se tiene una proyección que para el año 2040 incrementara a un 70%. Esta demanda que causa el crecimiento del sector inmobiliario contribuye al calentamiento global y a la emisión de gases de efecto invernadero (Akbari. H, Hdamon Mattherws, 2012). Este fenómeno climático está modificando el hábitat en nuestro planeta e involucra a tener climas con mayor impacto en las edificaciones por lo que obliga a los usuarios a utilizar sistemas de calefacción o refrigeración.

La mayoría de investigaciones en países con climas fríos, centran su estudio al uso de aislamiento térmico como estrategia

para mejorar las condiciones de temperatura interior, pero no siempre esta estrategia es la única vía de solución, debido que los estudios se adaptan a condiciones climáticas extremas que no se correlacionan con el clima local de la ciudad de Cuenca, además de factores económico sociales que condicionan su aplicación en nuestro medio local.

El medio físico por el cual la edificación se ve directamente relacionada con el medio ambiente y la radiación solar es a través de la envolvente. En edificaciones cerca del 33% de la pérdida de calor se da a través de las paredes (Al-Tamimi et al., 2020). Sin embargo, la estructura critica por la cual la edificación incrementa o pierde temperatura en países con latitud cero o cercanas a este valor, es mediante la envolvente horizontal (techo), debido que representa el componente principal expuesto a la radiación solar. Se estima que por la cubierta se intercambia alrededor del 50 al 60% de energía térmica entre el interior y el exterior. Lo que puede modificar la temperatura y poner en riesgo el confort interior térmico, si no se tiene un debido cuidado de su composición (Mohan Rawat, R. N. Singh, 2022).



Figura 02: Cubiertas Cuenca sector Medio Ejido.

Fuente: Propia.

En consecuencia, del auge económico petrolero en el Ecuador, el sector de la construcción cambia sus estándares, adaptándose a sistemas internacionales con la importación de nuevas tecnologías en materiales y morfologías arquitectónicas que estaban en tendencia. Este hecho desplazó la arquitectura tradicional vernácula y genero un estándar constructivo a nivel nacional, sin tomar en cuenta las regiones y sus características climáticas. Con esta nueva tendencia la arquitectura en el Ecuador evolucionó con la implementación en el mercado constructivo de materiales como el hormigón y el acero entre 1960 y 1970. También se volvió muy relevante la utilización de materiales más livianos en las envolventes horizontal y vertical (Torres Quezada Jefferson & Torres Avilés Ana, 2023). Este hecho condujo a un cambio en el horizonte terracota que producía la teja colonial en el paisaje urbano de la ciudad a tener terminados fríos y metalizados en consecuencia del uso del hormigón, fibrocemento ondulado y zinc. Pero además de cambiar la estética que consecuencias se producen en el ambiente interior con el uso de estas materialidades bajo las condiciones climáticas de la ciudad.

En la figura 03 se puede observar como la envolvente arquitectónica en la ciudad de Cuenca ha evolucionado tras la aplicación de tecnologías industrializadas que tratan de optimizar la construcción para reducir tiempos de montaje, cargas muertas y ahorros económicos. En el caso del plano horizontal (Cubiertas) se nota que a medida que se reduce el peso, se reduce la masa, por ende, se obtienen flujos de calor más pronunciados lo que repercute en oscilaciones térmicas elevadas durante el día y obliga a tener sistemas de climatización activa para refrigeración como para calefacción, lo que se resume en alto consumo energético (Torres Quezada Jefferson & Torres Avilés Ana, 2023).

Entonces como está afectando la inserción de nuevas tecnologías a la región andina bajo las características climáticas de la sierra, si la aplicación de materiales

livianos con poca masa térmica permiten oscilaciones de temperatura mayores y una elevada transmitancia térmica, en contraste con la arquitectura vernácula muy bien adaptada a la región andina, que utilizaba materiales pesados con altas inercias térmicas con el fin de retener energía durante el día para liberarla en la noche de manera que mejoren las condiciones de temperatura interior.

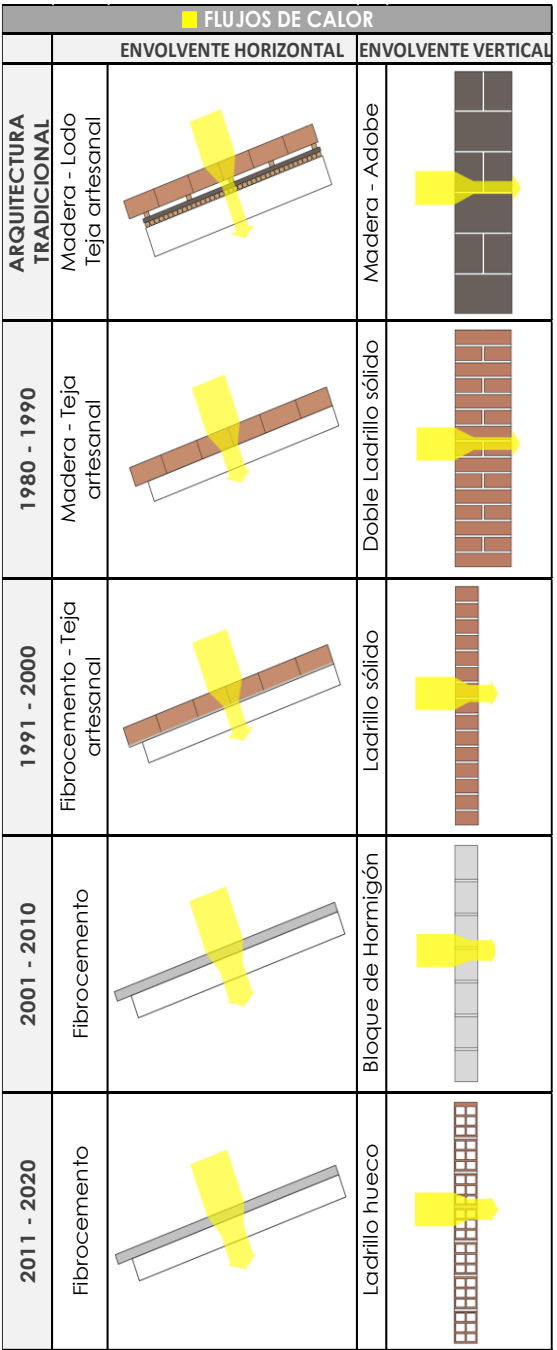


Figura 03: Flujo de Calor en Envolventes.
Fuente: Elaboración propia a partir de (Torres Quezada Jefferson & Torres Avilés Ana, 2023).

Justificación

La construcción dentro del territorio ecuatoriano está en pleno desarrollo. De acuerdo al Boletín técnico N°01-2022-ESED (Estadística de edificaciones), para el año 2021 las construcciones nuevas en el territorio ecuatoriano representaron el 89.5%, utilizando como material principal al hormigón armado para cimientos 95.0%, estructuras 85.8%, y cubierta de hormigón 47.4%.

En el caso específico de los materiales predominantes en cubiertas podemos observar que en la región de la Amazonia y Costa las láminas metálicas de zinc son las más utilizadas, en la región Sierra (climas fríos) se tiene al hormigón 67.6%, fibrocemento ondulado 16.1%, laminas metálicas zinc 10.25%. Sin embargo, para el medio focal del presente estudio, ciudad de Cuenca, se tiene al fibrocemento ondulado con el 65.0%, seguido del hormigón armado 21.0%, laminas metálicas zinc 1.23%, y otros 12.8% entendiéndose por otros a las cubiertas de Teja principalmente, todas estas corresponden a las materialidades de mayor influencia (ESED 2021).

En el Ecuador nos encontramos ubicados geográficamente en latitud 0 donde la incidencia solar es perpendicular a la superficie terrestre lo que significa que durante el día se recibe 12 horas de radiación solar, los 365 días del año, por lo cual nos demuestra que el elemento más crítico de la envolvente en nuestro territorio es la cubierta (Portilla F, 2018). Que como ya se mencionó con anterioridad a través de la cubierta se puede intercambiar hasta un 70 % de energía con el ambiente exterior.

Estos índices nos indican que existe una necesidad latente de tener un control térmico, calidad constructiva y una óptima aplicación de los sistemas constructivos utilizados en la cubierta, para reducir el flujo de calor con el fin de mejorar las condiciones de confort y regular las oscilaciones térmicas dentro de la edificación.

Uno de los inconvenientes principales de nuestra región se debe al bajo o escaso

control de calidad de los materiales utilizados para la construcción. De acuerdo a la norma ecuatoriana de la construcción NEC, en el capítulo de eficiencia energética, los fabricantes de materiales utilizados en la construcción deben ofrecer fichas técnicas que indiquen el comportamiento térmico de los productos. Bajo estas exigencias los constructores o profesionales a cargo de una obra deberán garantizar que los materiales utilizados cumplan la normativa. En el caso de no contar con esta información que normalmente no proveen las industrias artesanales, se permite aplicar métodos de cálculo para la aproximación de indicadores térmicos y que estos sean los que avalen el cumplimiento de la normativa (MIDUVI, 2018).

Por normativa se define indicadores térmicos para los materiales, sin embargo, no siempre la resistencia térmica puede estar definida a partir de la conductividad térmica del material, esto aplica para materiales de estructuración homogénea. en el caso de los materiales heterogéneos o compuestos, se tiene al ladrillo cerámico hueco, un bloque de hormigón, un sistema compuesto por capas que es el caso específico de los materiales que estructuran la cubierta, etc. Los indicadores y el comportamiento térmico dependerán del flujo de calor y como este actúa en el interior del material relacionando el flujo entre sólidos y vacíos (Maristany, 2017).

Es importante analizar y conocer estos indicadores para la correcta aplicación en las envolventes con los materiales locales de la ciudad de Cuenca en las diversas configuraciones de forma y tamaño y espesor, con el fin de obtener espacios confortables que aprovechan las energías pasivas y minimizan el uso de energías activas.

Bajo las características constructivas actuales que no consideran la aplicación de estrategias para regular la temperatura,

como materiales aislantes o incorporación de masa térmica. Nos seguimos viendo afectados a un de esta transición arquitectónica a morfologías en tendencia. Sin embargo, por factores económicos o sociales no permiten una evolución óptima que garantice el confort interior térmico de las unidades habitacionales mediante la aplicación de estrategias pasivas de climatización. Por ende, el mercado de la construcción deberá promover "Pautas" para fomentar arquitectura que responda a las condiciones climáticas de cada región y mejorar las condiciones de confort interior térmico de los usuarios que habiten las edificaciones (Torres Quezada Jefferson-Torres Avilés Ana, 2023).

La investigación se centra en el estudio netamente de la cubierta debido a los altos índices de incidencia solar que actúan sobre esta cara de la envolvente en consecuencia, de la latitud que se encuentra emplazada la ciudad de Cuenca. Además, que responde a la estructura con mayor intercambio de energía entre el interior y el exterior. Por tal motivo es importante identificar los flujos de calor a través del análisis de las oscilaciones térmicas que provoca cada sistema constructivo con mayor implementación en el mercado local, con el fin de mejorar las condiciones de temperatura interior.

Para ello la investigación establecerá observaciones y recomendaciones que sirvan de guía a constructores y diseñadores sobre las repercusiones que están implícitas en cada tipología de cubierta y como a través del uso de ciertas variables se podría optimizar las condiciones de confort térmico interior de manera que responda al contexto climático local.

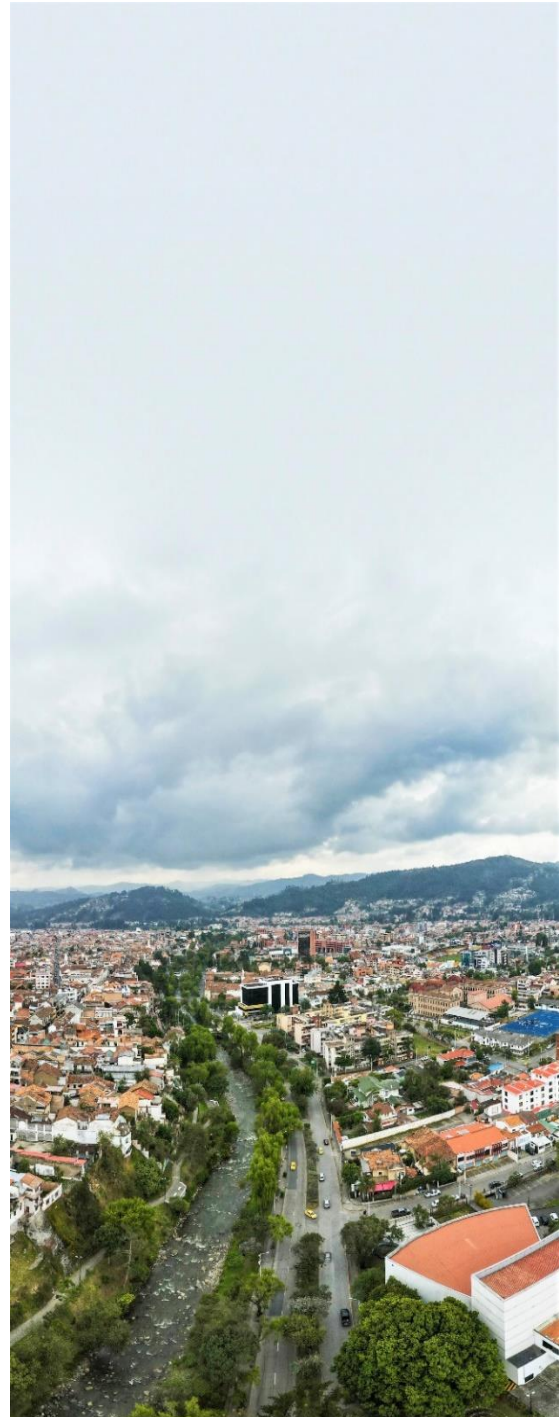


Figura 04: Rio Tomebamba, Cuenca Ecuador.
Fuente: Propia.

Objetivos

Objetivo general

- Caracterizar el comportamiento del flujo de calor en las diferentes tipologías de cubiertas mayormente utilizadas en la ciudad de Cuenca, a partir de simulación digital térmica para establecer recomendaciones de aplicación de manera que se mejore las condiciones interiores térmicas.

Objetivos específicos

- Identificar los sistemas constructivos que predominan el mercado de la construcción cuencana y propiedades térmicas de las materialidades que conforman las cubiertas.
- Determinar el comportamiento de flujo de calor de las cubiertas identificadas bajo las condiciones térmicas del piso climático Zt3 correspondiente a la ciudad de Cuenca, mediante simulación digital térmica.
- Diferenciar los resultados obtenidos de las diferentes cubiertas para detallar recomendaciones de aplicación de acuerdo al uso requerido.

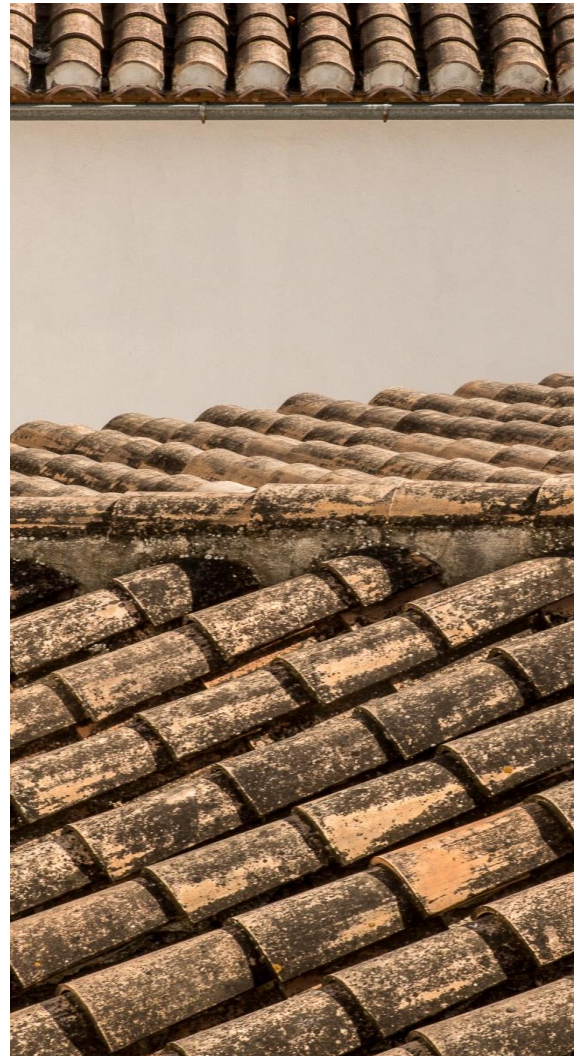


Figura 05: Teja colonial.
Fuente: Freepik.

Hipótesis

La Caracterización térmica mediante el análisis de flujo de calor en las diversas configuraciones de cubiertas de mayor uso en la ciudad de Cuenca, proporciona una evidencia para la correcta aplicación de acuerdo al uso requerido, de manera que se mejore las condiciones interiores térmicas.

Metodología

La metodología que se utilizará Con el propósito de alcanzar los objetivos planteados se basa en el estudio comparativo de simulaciones digitales térmicas. Para el desarrollo de la investigación y alcanzar el objetivo general se tomará como referencia a la normativa ecuatoriana vigente, investigaciones semejantes, y recomendaciones de los autores consultados. La investigación se desarrollará por fases bajo las siguientes acciones.

Como primera etapa, Capítulo 1, se realizará una investigación bibliográfica para determinar el rol de la cubierta en el Ecuador y las características climatológicas correspondientes al área de estudio (piso climático zt3). Consecuentemente se identificará los métodos constructivos predominantes para cubiertas en la ciudad de Cuenca en base a las estadísticas de edificaciones, que nos servirá para elaborar los detalles constructivos de las tipologías en tendencia para cubierta liviana y cubierta pesada.

Adicional a ello se complementará con un estado de arte que ayude a comprender todos los conceptos térmicos que se abordarán en la investigación tales como la masa térmica, reflectividad, emisividad, etc. Las mismas que estarán soportadas por investigaciones realizadas para situaciones semejantes a nuestro entorno climático. Finalmente se introducirá las características del software Design Builder como herramienta de simulación energética.

En la segunda etapa, Capítulo 2, se configurará el software Desing Builder de acuerdo a las especificaciones que indica el Congreso nacional del medio ambiente en su comunicación técnica *"La simulación energética como herramienta de predicción, normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes"* con el fin de realizar una simulación que conlleve a obtener datos muy aproximados a la realidad. Apegándose al modelo de la "Caja Gris"

El cual busca reducir el número de incertidumbres para la generación de un modelo térmico geométrico. Es decir, se eliminan las cargas energéticas que resultan de equipos y ocupación.

Posterior a ello se determinará la tipología constructiva para vivienda unifamiliar con mayor auge en la ciudad de Cuenca y se establecerán las características físicas del modelo base (caso de estudio) acogiéndose al PDOT de Cuenca para un PIT urbano. Una vez delimitado el modelo se identificará las características térmicas de los materiales que conforman cada sistema constructivo.

En este punto se determinará los periodos de simulación, día extremo frío y día extremo caliente en base al fichero climático Cuenca_Hour-EPW proporcionado por la Universidad de Cuenca. Finalmente se determinarán las variables de estudio con mayor importancia para la investigación.

En la tercera etapa, Capítulo 3, se obtendrá los resultados de las simulaciones energéticas correspondientes a cada variable, teniendo como objetivo generar una visión clara que determine las cubiertas o características constructivas que potencien un buen comportamiento térmico del ambiente interior. Finalmente, con estos criterios constructivos se podrá simular e identificar un caso óptimo para cada cubierta.

La investigación en su etapa final, Capítulo 4, establecerá las conclusiones pertinentes en relación a los resultados y brindará recomendaciones de aplicación en base a las ventajas y desventajas de cada sistema constructivo analizado, con el fin de mejorar las condiciones de temperatura interior en base al uso del espacio. Es importante conocer cómo influye cada envolvente en la temperatura interior térmica y como se podría mejorar el sistema constructivo si fuese necesario para alcanzar mejores niveles de confort.



1

CAPÍTULO

1. Marco teórico

En la búsqueda de mejorar las condiciones de confort, es importante que el sector de la construcción utilice los recursos naturales de manera óptima (Correa Álvarez et al., 2016). Los estudios en este campo se deberán enfocar principalmente a desarrollar y proponer soluciones con respecto al comportamiento térmico de las envolventes (Castillo Quimis et al., 2019). El presente capítulo abarca las propiedades y características que están implícitas en el comportamiento térmico de la envolvente horizontal en función del clima local de Cuenca, aplicado a las tipologías constructivas de mayor implementación en la zona de estudio.

1.1 La envolvente

Entendemos como envolvente figura 06, al elemento tridimensional que recubre los objetos arquitectónicos, y sobre el que se da la interacción entre las áreas interiores con su entorno físico inmediato, mediante el intercambio de luz, aire y energía (Bustamante, 2014).



Figura 06: Envolvente arquitectónica.
Fuente: Elaboración Propia

La envolvente de una edificación va más allá de la sumatoria de sus fachadas con la cubierta, y de ser entendido como

planos divisorios entre el interior y exterior. Puesto que debe ser diseñada integralmente para trabajar como protector e intercambiador de la energía térmica de manera que regule los flujos de viento, iluminación y temperatura, como respuesta al clima local (González Vásquez and Molina-Prieto, 2018).

1.1.1 Antecedentes históricos

Desde las civilizaciones más remotas los seres humanos han elaborado su habitar como medida de protección ambiental y climática de su entorno. A partir de recursos naturales propios de la zona. En la figura 07 podemos observar la evolución de la envolvente a través de la historia.



Caverna - Neandertal



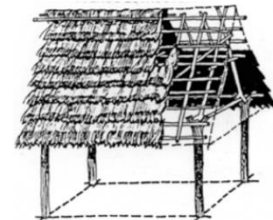
Iglú - Esquimal



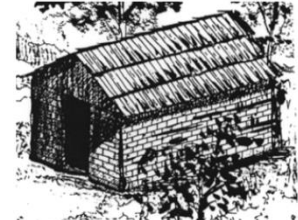
Cabaña - Neolítico



Construcción - Inca



Construcción - Latina



Construcción - Vernácula

Figura 07: Arquitectura como medio de Protección.

Fuente: Elaboración Propia a partir de Mendoza, 2016.

Durante el periodo Paleolítico superior (35000 – 10000 años a.C.) las civilizaciones construyeron cavernas naturales y entre las rocas, cabañas de ramas y hojas, tiendas nómadas confeccionadas con pieles entre varias soluciones (Kantner, 2000),

(Mendoza, 2016). Posteriormente durante el periodo Neolítico (6000 – 3000 años a.C.) se empezó a utilizar materiales sólidos y duraderos como la madera, el bambú, piedra, tierra y la arcilla. Todos ellos elaborados a partir de conocimientos empíricos generando así arquitectura que responde al clima (Feathers, Johnson & Kembel, 2008).

Un hecho trascendental se dio a partir de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, figura 08, con ella nació la era de la explotación irracional de los recursos naturales que daban paso a lo que hoy en día conocemos como la crisis ecológica mundial, que aún no podemos superar (Bennett, 2016).

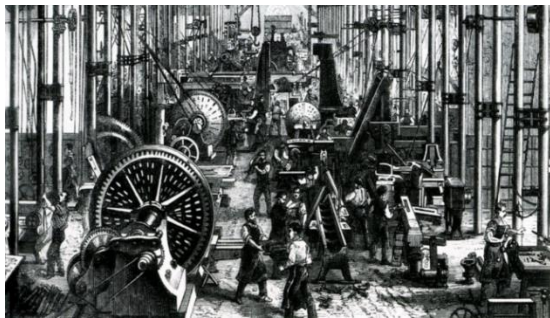


Figura 08: Revolución Industrial.
Fuente: Gayubas Augusto, 2017.

A partir del siglo XX las estrategias pasivas para la optimización de la temperatura interior de una edificación fueron abandonadas tras el auge de los sistemas alimentados por el petróleo (combustibles fósiles) bien conocidas como estrategias de climatización activas, entre ellas el aire acondicionado, calefacción, ventilación e iluminación artificial (Ackermann, 2013). En síntesis, se puede decir que, durante el auge de la revolución industrial y el bajo costo de la energía, la arquitectura ya no consultaba el clima, la arquitectura ya no incorporaba estrategias pasivas, la arquitectura ya no responde al lugar (Brown, Flavin y French, 2000).

De esta manera se genera una concientización para reducir los consumos de energía en las ciudades y se hace un llamado a los profesionales de la construcción a liderar y buscar la autosuficiencia energética en las edificaciones e implementar un correcto

diseño de las envolventes arquitectónicas (Janda, 2011).

La población está en constante incremento, paralelo a ello la utilización de recursos no renovables. Un correcto diseño de la envolvente aporta a mitigar de manera significativa el cambio climático debido a la optimización del consumo energético, en consecuencia, del aprovechamiento de la energía pasiva. Al momento de optimizar una envolvente se debe considerar todos los elementos implícitos, tales como paredes, ventanas, pisos y cubiertas. Sin embargo, para la presente investigación se analiza la influencia térmica de la envolvente horizontal (techo) debido que representa la estructura crítica con mayor intercambio de energía térmica entre el exterior e interior de una edificación.

1.1.2 Rol de la cubierta en el Ecuador

El Ecuador está ubicado geográficamente en el continente americano, específicamente al noroeste del hemisferio Sur, figura 09, tiene un área de 256 mil kilómetros cuadrados aproximadamente y una población que ronda cerca de los 18 millones de habitantes. El país está dividido por la línea ecuatorial y sus ciudades tienen latitudes cercanas a 0° (Portilla F, 2018).

Por tal motivo las edificaciones en el Ecuador reciben un índice de radiación solar muy alto sobre el plano horizontal (cubiertas) durante todo el año, a diferencia del plano vertical correspondiente a mamposterías.

Por ende, es importante utilizar estrategias térmicas pasivas sobre la cubierta, que mitiguen este impacto, debido que representa la superficie que mayor energía térmica transfiere hacia el interior. Además, que en el Ecuador la tipología de vivienda de 1 planta representa la más construida (ESED 2022). Por lo que las características constructivas de las cubiertas y materialidades implícitas serán responsables del flujo de calor actuante y de la temperatura interior.



Figura 09: Mapa mundial, ubicación Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Freepik.

1.2 La cubierta en el clima andino de Ecuador.



Figura 10: Cubierta, climas Andinos de Ecuador.

Fuente: INPC, 2011.

1.2.1 La región andina-sierra del Ecuador (ubicación-clima).

La región Andina o Sierra ecuatoriana es una de las 4 regiones geográficas del país figura 11. Está ubicada en la cordillera de los Andes, se caracteriza principalmente por sus montañas que alcanzan hasta los 6310 metros sobre el nivel del mar (Portilla F, 2018).

El clima de la región Sierra es muy variado y la norma ecuatoriana de la construcción, clasifica al clima en función de la altitud en 6 zonas climáticas, que podemos observar en la Tabla 01.

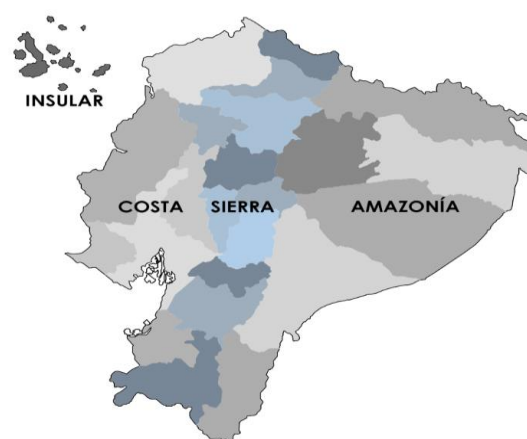


Figura 11: Mapa, Regiones del Ecuador.

Fuente: Elaboración Propia.

Zona Climática	Nombre	Criterio Térmico
1	Húmeda muy Calurosa	$500 < CDD10^{\circ}C$
2	Húmeda Calurosa	$3500 < CDD10^{\circ}C \leq 5000$
3	Continental Lluviosa	$CDD10^{\circ}C \leq 2500$ y $HDD18^{\circ}C \leq 2000$
4	Continental Templado	$2000 < HDD18^{\circ}C \leq 3000$
5	Fría	$CDD10^{\circ}C \leq 2500$ y $HDD18^{\circ}C \leq 2000$ $2000 < HDD18^{\circ}C \leq 3000$ $3000 \text{ m} < \text{Altura (m)} \leq 5000 \text{ m}$
6	Muy Fría	$CDD10^{\circ}C \leq 2500$ y $HDD18^{\circ}C \leq 2000$ $2000 < HDD18^{\circ}C \leq 3000$ $5000 \text{ m} < \text{Altura (m)}$

Tabla 01: Zonas Climáticas Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de MIDUVI, 2018.

En la región andina se ubica el cantón Cuenca a 2560msnm. Conforme a la normativa ecuatoriana, se localiza en la zona climática 3 debido a su altitud y condiciones climáticas. La temperatura promedio fluctúa entre 14°C y 18°C, con una humedad relativa entre 59% y 66% (MIDUVI, 2018). En la zona climática 3 se concentra la mayor cantidad de población del país, además es muy frecuente las lluvias y granizo (MIDUVI, 2011a).

1.2.2 Cubiertas en la región andina.

La cubierta representa el elemento más crítico de la envolvente en países con latitudes cercanas a 0°, debido a la gran exposición de radiación solar sobre el plano horizontal. Como ya se mencionó con anterioridad, por la cubierta se intercambia alrededor del 50 al 60% de energía térmica con el interior de la edificación (Mohan Rawat & R.N. Singh, 2022).

En el Ecuador para caso específico de los materiales de construcción predominantes en cubiertas se pudo constatar que en la región de la Amazonia y Costa las láminas metálicas de zinc son las más utilizadas. Sin embargo, para la región Andina-Sierra se tiene al hormigón armado como el principal material de construcción para el sector residencial, con el 69.2%, seguido del fibrocemento ondulado 15.1%, láminas metálicas zinc 9.3%, y otros 6.4%, como las materialidades de mayor influencia (ESED 2022). Figura 12.

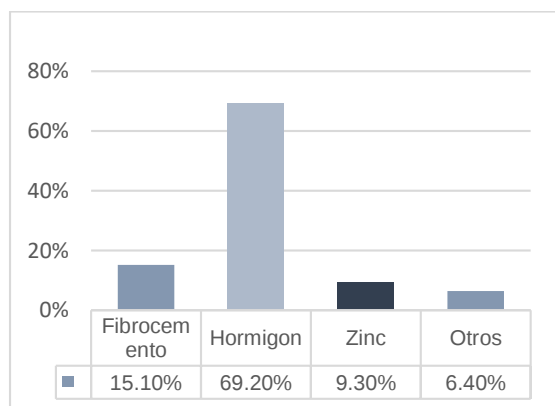


Figura 12: Materiales predominantes en cubiertas de la región Andina, Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de ESED, 2022.

Debido al clima frío que predomina en la región, la construcción vernácula ha venido implementando muy bien las estrategias pasivas para mejorar las condiciones de temperatura interior, mediante la aplicación de masa térmica en su envolvente. Con el uso de grandes paredes de adobe o ladrillo y cubiertas que implementan en su estructura la madera, carrizo, lodo, teja y paja. Es importante mencionar nuevamente que hoy en día la arquitectura se adaptado a tendencias internacionales, este hecho ha provocado que el uso de materiales industrializados con poca masa térmica repercuta en la calidad de la temperatura interior (Torres Quezada Jefferson- Torres Avilés Ana, 2023).

1.2.3 Cubiertas en la ciudad de Cuenca.

La estructura y materialidad de la cubierta en la ciudad de Cuenca ha tenido una evolución a través de los años. En la época de la colonia con la llegada de los españoles se evidencia bibliográficamente que la utilización de cubiertas de paja pierde popularidad y son remplazadas por las cubiertas de teja. Durante el desarrollo de la ciudad por el año de 1582 las viviendas fueron construidas con piedra, lodo, adobe y cubiertas de teja (Jamieson, 2003). Figura 13.



Figura 13: Cubiertas de Teja Cuenca, Ecuador.
Fuente: Antonio Medina, 2019.

Sin embargo, después de la segunda guerra mundial y el auge de la revolución industrial se empieza a incorporar nuevas materialidades como símbolo de la modernidad (Torres Quezada Jefferson & Torres Avilés Ana, 2023). El uso del techo de metal corrugado y consecuentemente con los años la incorporación del hormigón y fibrocemento ondulado fueron tomando

popularidad para las construcciones nuevas a las afueras del centro histórico, figura 14.



Figura 14: Medio Ejido, Cuenca - Ecuador.
Fuente: Carlos Palacios, 2022.

Es importante mencionar que la popularidad por la materialidad de teja en cubiertas continua hasta la actualidad, en menor escala que otras materialidades, pero con gran fuerza de identidad y contraste con la ciudad de techos rojos Cuenca.

En la ciudad de Cuenca la construcción de cubiertas tiene gran preponderancia al uso de techos inclinados debido a los altos índices de pluviosidad. La tipología de cubiertas con pendientes entre 0 y 30 grados supera el 90% de uso en las edificaciones locales (ARCH-Azuay, & Centrosur 2017). Estudios revelan que debido a la latitud que se encuentra ubicado la zona de estudio el índice de radiación solar es muy elevado sobre cualquier inclinación u orientación que se encuentre emplazada la edificación, sin embargo, la radiación es mínimamente mayor cuando la inclinación de la cubierta es baja (Zalamea and Barragán-Escandón, 2020). Por tanto, para el presente estudio se tiene que analizar la situación más crítica por lo que se designa a la cubierta plana como modelo base de estudio, pues mientras menor sea la inclinación de la cubierta, mayor incidencia de radiación solar recibe.

Tipología de cubiertas

Para delimitar las tipologías de cubiertas con mayor implementación en el mercado local de la construcción, que serán utilizadas en la presente investigación y de

acuerdo a la Estadística de Edificaciones (ESED 2022). En la Ciudad de Cuenca el principal material de construcción en el sector residencial para la configuración de cubiertas nuevas se tiene al fibrocemento ondulado con el 65.0%, seguido del hormigón armado 21.0%, laminas metálicas zinc 1.23%, y otros 12.8% entendiéndose por otros a las cubiertas de teja principalmente, figura 15.

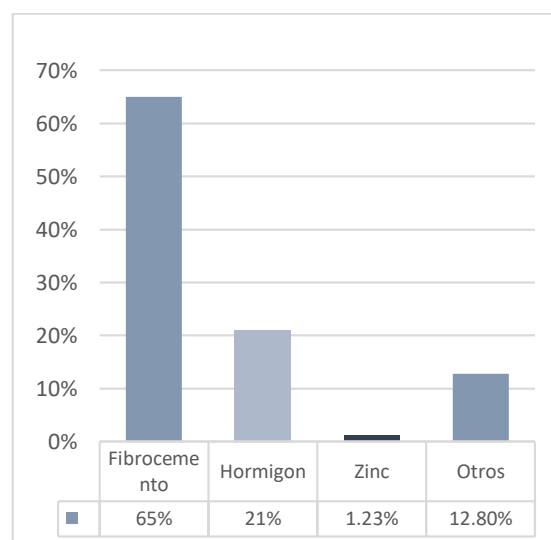


Figura 15: Materiales predominantes en cubiertas Cuenca, Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de ESED, 2022.

De acuerdo a las estadísticas, nuevamente se puede constatar que la construcción local ha priorizado el uso de materiales industrializados con poca masa térmica, como es el caso del fibrocemento ondulado y se está dejando atrás la cultura constructiva con teja, que además de ser característico de la identidad constructiva cuencana, brinda mejores condiciones térmicas a menor costo. Es importante analizar más adelante como repercute estos materiales con las oscilaciones térmicas del ambiente interior.

Una vez identificadas las características físicas de las cubiertas mayormente implementadas en la construcción de viviendas nuevas unifamiliares de 2 pisos, correspondientes a las estadísticas del año 2022, para la presente investigación se las ha clasificado en 2 categorías: Cubierta liviana (CL) y Cubierta pesada (CP). Tabla 02.

CATEGORÍA	TIPO	CUBIERTA
CL	CL1	FIBROCEMENTO ONDULADO
	CL2	FIBROCEMENTO ONDULADO + TEJA
CP	CP1	LOSA NERVADA ALIGERADA
	CP2	LOSA COLABORANTE

Tabla 02: Tipologías de Cubiertas.

Fuente: Elaboración propia.

Cubiertas livianas CL

CL1: Cubierta de Fibrocemento Ondulado.

Representa la principal tipología de cubierta utilizada en la ciudad de Cuenca con el 65% de implementación en la construcción local para viviendas nuevas (ESED, 2022). Las cubiertas de fibrocemento ondulado están conformadas por placas prefabricadas compuestas por la mezcla de cemento con fibras de amianto o sintéticas + aditivos, figura 16.



Figura 16: Fibrocemento Ondulado.

Fuente: ArchDaily, 2023.

Su forma ondulada aporta a la resistencia estructural de la placa y a canalizar de manera óptima las aguas lluvias. Además, su peso ligero de 11.4 kg/m² en comparación con otras tipologías constructivas, permite una fácil y rápida instalación en obra, figura 17 y figura 18.

Sus características térmicas nos indica que refleja el 40% de la radiación solar, es decir absorbe el 60% de la energía térmica incidente, esto quiere decir que, debido a su poca masa, podría presentar flujos de calor muy elevados, por ende, es necesario saber cómo afectaría en las condiciones de temperatura interior, al implementar este sistema constructivo en una edificación.

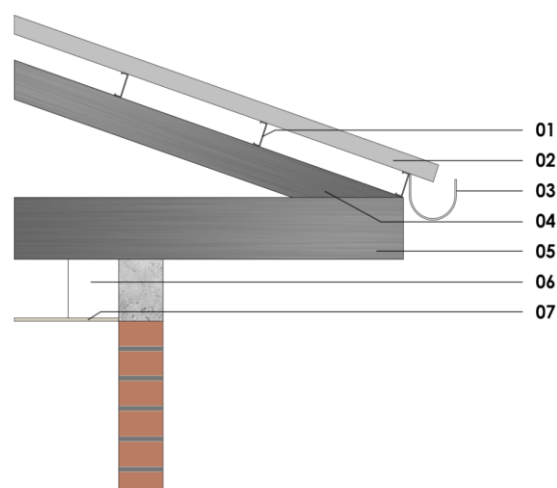


Figura 17: Detalle constructivo cubierta Fibrocemento ondulado.

Fuente: Elaboración propia.

- 01 Correa metálica G 80x50x15x2mm @1.15m
- 02 Plancha de Fibrocemento e=0.53 cm
- 03 Canal de agua lluvia de zinc e=0.75mm
- 04 Vigueta metálica 2G 150X50X15X3mm @2.4m
- 05 Viga metálica 2G 200X50X15X3mm
- 06 Cámara de Aire No ventilada e=15cm
- 07 Cielo raso de yeso cartón e=12mm

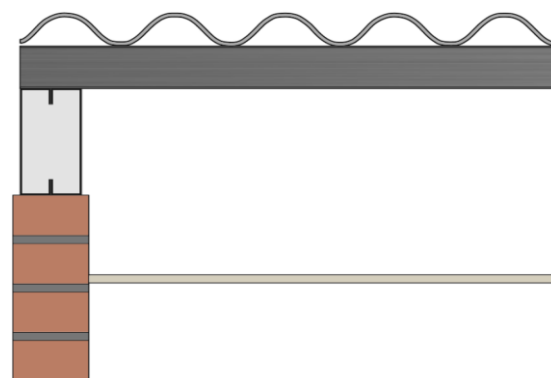


Figura 18: Sección Cubierta Fibrocemento.

Fuente: Elaboración propia.

CL2: Cubierta de Fibrocemento + Teja. En la ciudad de Cuenca, la cubierta de teja es muy popular en el sector inmobiliario. Su implementación en la construcción local remonta hacia el periodo de la colonia con la llegada de los españoles y la cultura constructiva, debido que permite la evacuación rápida y eficaz de las aguas lluvias. Antiguamente se colocaba sobre una cama de carrizo llamada enchagliado o enchacliado. Su principal componente es la arcilla que se moldea en forma ovalada y se quema al horno (Jamieson, 2003), figura 19. Su peso

aproximado esta entre 35 a 50Kg/m² depende del fabricante y espesor. Dentro de sus características térmicas refleja el 31% de la radiación solar, es decir absorbe el 69 % de la energía térmica, por ende, regula los flujos de calor y aporta con masa térmica al sistema constructivo.



Figura 19: Teja Cerámica.
Fuente: ArchDaily, 2023.

En la actualidad su uso sigue siendo muy frecuente debido a la identidad que representa, su aplicación se da en la mayoría de ocasiones sobre planchas de fibrocemento ondulado por un tema netamente estético. Sin embargo, ya no representa la materialidad más utilizada en la ciudad, pero su aplicación esta entre las 3 principales (ESED, 2022). Figura 20.

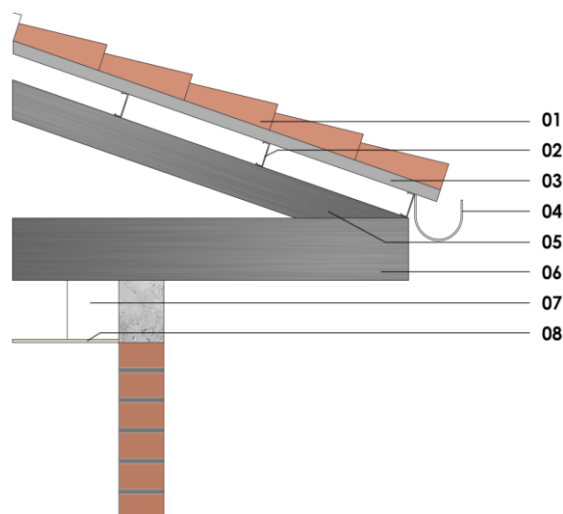


Figura 20: Detalle constructivo cubierta de Teja.
Fuente: Elaboración propia.

- 01 Teja Cerámica colonial curva e= 1 cm
- 02 Correa metálica G 80x50x15x2mm @1.15m
- 03 Plancha de Fibrocemento e=0.53 cm

- 04 Canal de agua lluvia de zinc e=0.75mm
- 05 Vigueta metálica 2G 150X50X15X3mm @2.4m
- 06 Viga metálica 2G 200X50X15X3mm
- 07 Cámara de Aire No ventilada e=15cm
- 08 Cielo raso de yeso cartón e=12mm

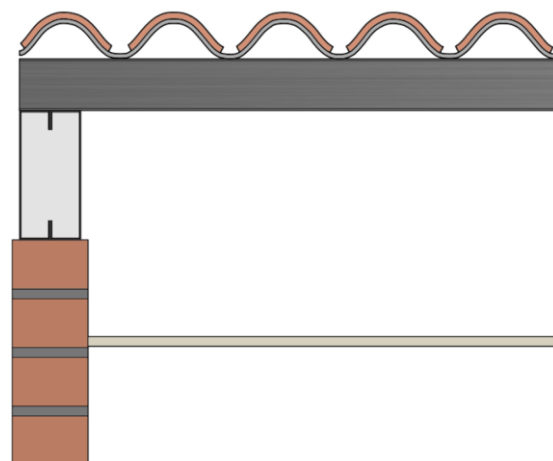


Figura 21: Sección Cubierta de Teja sobre fibrocemento.
Fuente: Elaboración propia.

Como se observó en la figura 21, el método de colocación actual de la teja, en la mayoría de los casos se utiliza solo como tapa, esto implica a tener una gran área descubierta lo que neutraliza el trabajo térmico óptimo de la materialidad, es decir cumple un rol netamente estético, por ende, para la investigación se analizará la teja con el método de colocación vernácula, es decir con tapa y canal, debido que de esa manera se obtiene una capa homogénea y se potencializa su optima función térmica dentro del sistema constructivo.

Cubierta pesada de hormigón armado CP.

Representa la segunda tipología de cubierta más utilizada en la ciudad de Cuenca con el 21% de implementación en la construcción local para viviendas (ESED, 2022). Térmicamente, la cubierta de hormigón refleja el 40% de la radiación solar actuante, es decir, tiene una absorción térmica del 60% de la radiación solar incidente sobre la cubierta, Sin embargo, pese a ser una cubierta que permite absorber gran cantidad de calor, podría ser beneficioso debido a su gran masa térmica ya que mantiene esa energía para liberarla progresivamente en la noche. Es decir, permite controlar los

flujos térmicos y regularlos, esto podremos observar más adelante mediante las oscilaciones de temperatura interior.

Existen 2 tipologías constructivas principales para las cubiertas pesadas de Hormigón: Losa de hormigón aligerada mediante bloques de pómez, CP1 y Losa de hormigón mediante la utilización de placa colaborante, CP2.

CP1: Losa de hormigón Aligerada. La losa nervada aligerada, se estructura mediante nervios de acero más una chapa de compresión. Proporcionan rigidez en una o dos direcciones, su uso es óptimo para cubrir grandes luces. Con el fin de aligerar la carga muerta de la estructura se colocan por lo general bloques de pómez. Son utilizadas para la construcción de entrepisos y cubiertas.

La cubierta de Hormigón aligerado con bloques de pómez de 20cm tiene un peso aproximado de 300 kg/m² y está conformado de acuerdo a la figura 22.

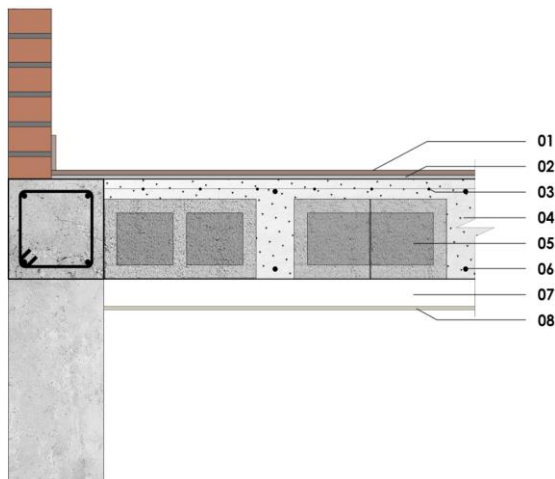


Figura 22: Detalle constructivo cubierta Hormigón aligerado.

Fuente: Elaboración propia.

- 01 Recubrimiento Cerámico e= 1cm.
- 02 Mortero Bondex e=1cm.
- 03 Malla electro soldada R84.
- 04 Losa de Hormigón f'c= 240 Kg/cm², e=5cm.
- 05 Bloque hueco de pómez 40x20cm, e=15cm.
- 06 Varilla de refuerzo 1 Ø de 12mm.
- 07 Cámara de Aire No ventilada e=10cm.
- 08 Cielo raso de yeso cartón, e=12mm.

CP2: Losa de hormigón colaborante: Consiste en una losa de hormigón armado

combinado con una placa de acero galvanizado que en conjunto sirven para resistir cargas a compresión y flexión. La placa colaborante se apoya sobre un sistema de vigas y cumple la función de encofrado base donde se vierte el hormigón, además de distribuir y resistir cargas de flexión, resulta un sistema constructivo que minimiza tiempos en el montaje. Figura 23.

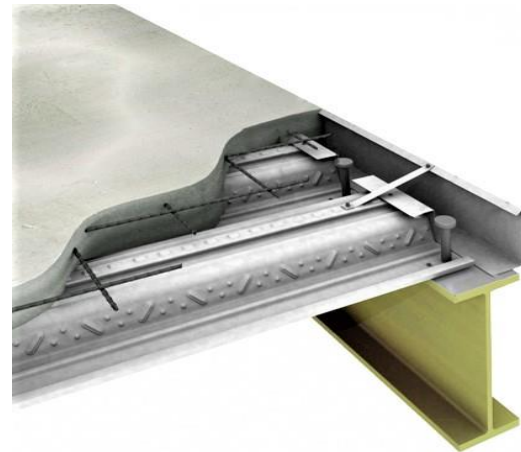


Figura 23: Sistema Constructivo Losa Colaborante.

Fuente: Fierrodeck,2023

El sistema constructivo con placa colaborante y hormigón se utiliza para losas y cubiertas, y tiene un peso aproximado de 200kg/m² y está conformado de acuerdo a la figura 24.

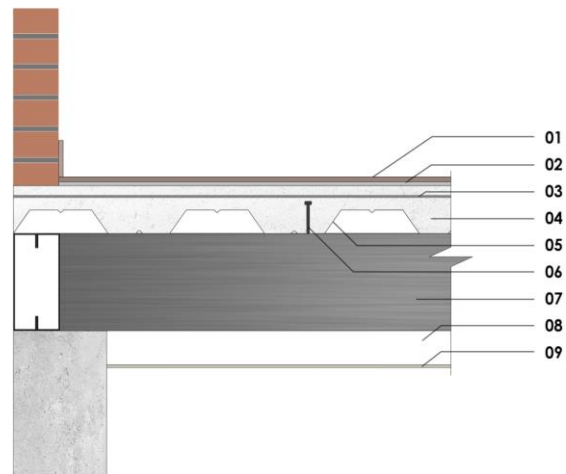


Figura 24: Detalle constructivo cubierta Hormigón Colaborante.

Fuente: Elaboración propia.

- 01 Recubrimiento Cerámico e= 1cm.
- 02 Mortero Bondex e=1cm.
- 03 Malla electro soldada R84.

- 04 Losa de Hormigón $f'c = 240 \text{ Kg/cm}^2$.
- 05 Placa colaborante $h = 55 \text{ mm}$, $e = 76 \text{ mm}$.
- 06 Conectores de cortante $c/50 \text{ cm}$ $f'y = 450 \text{ MPa}$.
- 07 Viga metálica 2G 200X50X15X3mm.
- 08 Cámara de Aire No ventilada $e = 10 \text{ cm}$.
- 09 Cielo raso de yeso cartón.

1.3 Estado del arte

Para el desarrollo de presente investigación es necesario entender cómo actúa el flujo de calor en la cubierta, para determinar cómo repercute en la temperatura interior tomando como parámetro de comparación las oscilaciones de temperatura resultante de cada sistema constructivo.

En la arquitectura para climas fríos, la mejor condición de temperatura interior y bienestar de los usuarios, se logra a través de la correcta implementación de los recursos pasivos, aplicados a la optimización de la envolvente, tales como la regulación de los flujos de calor, conservación de la energía térmica, ventilación óptima de los espacios, entre otros (Robledo-Fava, R. et al, 2019). En la ciudad de Cuenca, estos criterios se deben implementar con mayor rigurosidad a la cubierta por las condiciones físicas a las que se ve expuestas. Como se mencionó con anterioridad, la cubierta se ve sometida a radiación solar constante a lo largo de todo el año por latitudes cercanas a 0 durante el día y climas fríos debido a su altitud durante la noche. Es por ello que mejorar las condiciones físicas y térmicas de la parte más crítica de la envolvente ayudará a mejorar las condiciones de temperatura interior que están ligadas a una mejor calidad de vida, es decir la salud física y mental.

1.3.1 Comportamiento térmico de la cubierta

Para el desarrollo sostenible de la industria de la construcción, es un tema clave analizar el comportamiento térmico, de la cubierta, debido que la cubierta es el elemento más crítico de la envolvente, por su alta susceptibilidad a la radiación solar, hecho que influye en gran medida con las condiciones de confort interior térmico. Como ya se mencionó con anterioridad, se estima que por la cubierta se intercambia

alrededor del 50 al 60% de energía térmica entre el interior y el exterior de una edificación (Mohan Rawat & R.N. Singh, 2022).

Flujo de calor

El flujo de calor actuante sobre las diferentes capas que estructuran la cubierta, repercute significativamente en el comportamiento térmico del ambiente interior, depende específicamente de las propiedades térmicas de cada material que conforma el sistema constructivo implícito. Se define como el proceso por el cual la energía térmica se transfiere de la superficie exterior hacia la superficie interior, este intercambio de energía térmica puede variar constantemente, dependiendo del sentido del salto térmico actuante. Según los principios térmicos, la transferencia de calor indica que la temperatura fluye desde el lado más caliente hacia el lado más frío (Maristany, 2017). Para medir los flujos de calor en la presente investigación se tomará como variable las oscilaciones térmicas resultantes del flujo de cada sistema constructivo.

El flujo de calor ocurre en todo sistema compuesto de la envolvente, para el caso específico de la cubierta se da por radiación de onda corta, radiación infrarroja, por conducción y por convección, como se observa en la figura 25 (Torres, Quezada, 2018).

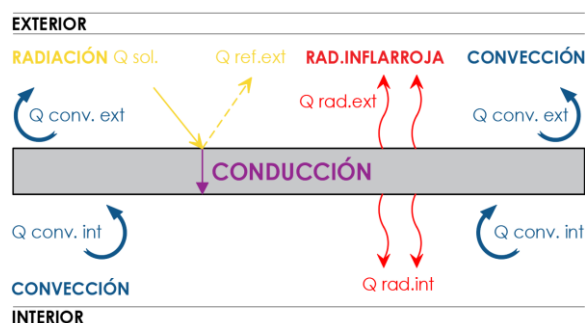


Figura 25: Transferencia de calor sobre la Cubierta.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Torres, Q, 2018).

Radiación: Se refiere a la transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas. No requiere de un material específico para

propagarse, por lo que puede transmitirse en el vacío. Un ejemplo común es el calor que recibimos del sol, el cual llega a la Tierra a través de la radiación por ondas, como se puede observar en la figura 26 (Conesa, 2013).

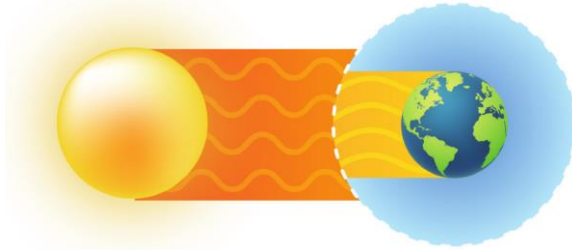


Figura 26: Radiación Electromagnética.
Fuente: (Lira-oliver, 2017).

La radiación visible que el ser humano percibe de la radiación electromagnética, se da en forma de luz, sin embargo, existen otras radiaciones más allá del campo visible a nuestros ojos. Entre ellas están la radiación ultra violeta e Infrarroja (Lira-oliver, 2017).

Las proporciones de energía térmica que recibimos son: ultravioleta 3%, visible 53% e infrarrojo 44%. En conjunto son muy importantes para el desarrollo de la vida y tienen gran impacto en el confort interior térmico. Sin embargo se puede observar que la radiación infrarroja forma una parte importante y significativa que deberá ser estudiada (Lira-oliver, 2017).

La radiación infrarroja se encuentra en el espectro de energía invisible. Juega un papel importante en la transferencia de calor debido que es un método pasivo para tematizar un ambiente. En climas cálidos se deberán buscar materialidades que reflejen o emitan estas radiaciones con el fin de no tener sobrecalentamiento de los espacios internos. Y en climas fríos se deberá buscar un equilibrio para calentar las áreas internas y almacenar la energía (Lira-oliver, 2017).

Hoy en día es posible detectar la radiación infrarroja a través de la termografía la cual nos permite observar en imágenes y mediante el color visualizar la temperatura irradiada por la masa de un material (emisividad), Figura 27. Con este recurso es muy práctico analizar la relación de

absorción y emisión de temperatura de la envolvente y sus diversas materialidades, puesto que la materia no emite luz, pero si calor (Lira-oliver, 2017).

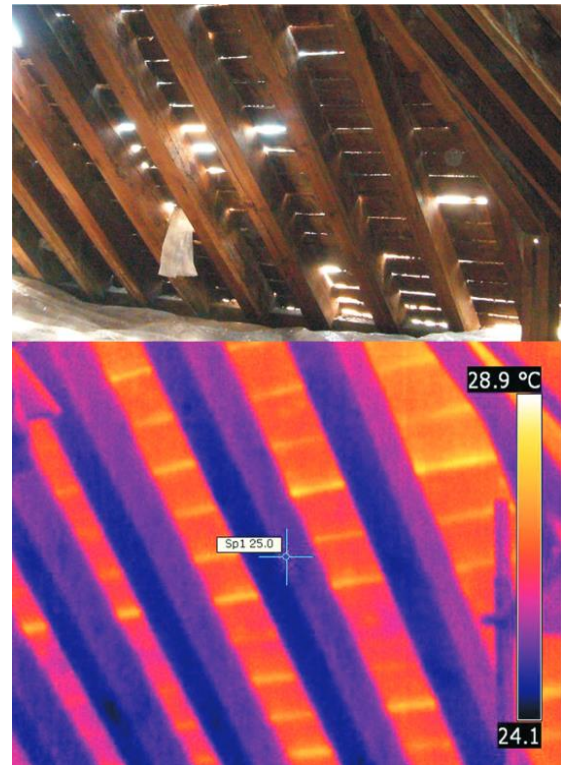


Figura 27: Fotografía, cámara Higrotérmica, Regiones del espectro electromagnético.
Fuente: C. Rodríguez, 2011.

El flujo de calor por radiación solar en cubiertas puede afectar significativamente la condición interior térmica de una edificación, debido a la radiación solar absorbida. Para minimizar este flujo de energía térmica es relevante utilizar materiales con una adecuada reflectividad al visible y emisividad solar puesto que de esta propiedad se determinará la porción reflejada de radiación solar visible e infrarroja cercana que incide sobre el plano de la envolvente horizontal (cubierta), (Berdahl and Bretz, 1997) (Bergman et al., 2011). Bajo estos criterios se considera importante estudiar la reflectividad al visible y emisividad infrarroja que están directamente relacionada con las propiedades de los materiales y la radiación solar. Por ende, serán consideradas como variables para la presente investigación.

Reflectividad y emisividad

Se entiende por reflectividad a la capacidad de la materialidad para reflejar la radiación solar. Durante la incidencia solar directa sobre un elemento arquitectónico, este recibe el 100% de energía en forma de calor, pero la materialidad tiene la capacidad de reflejar una fracción de energía, debido a su forma, textura, acabado y color. Por otro lado, la emisividad se refiere a la capacidad que tiene la materialidad para emitir energía como radiación térmica es decir radiación infrarroja o radiación de onda larga. En otras palabras, devolver al ambiente el calor absorbido (Mario Chavez, et al, 2015). Figura 28.

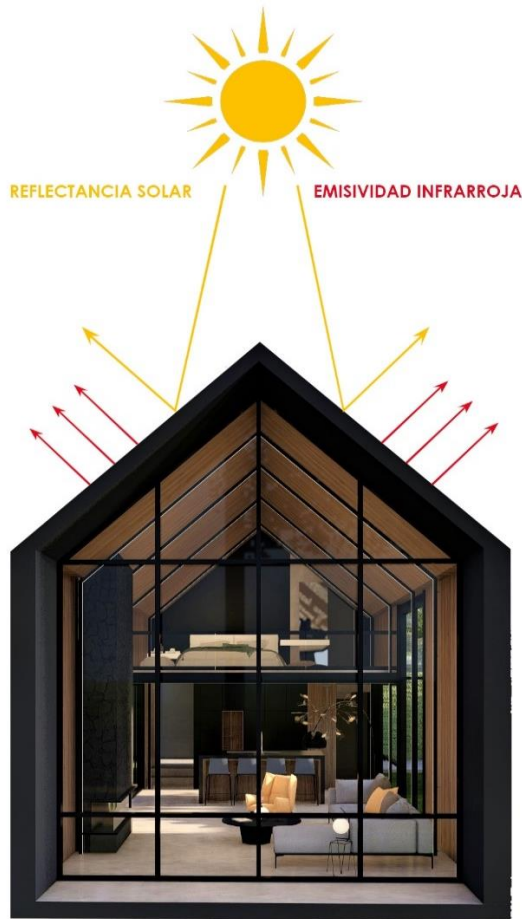


Figura 28: Reflectividad Solar y Emisividad infrarroja.

Fuente: Elaboración Propia.

Estudios de (Alchapar y Correa, 2013), concluyeron que uno de los factores más importantes para la reflectividad, es la temperatura superficial exterior. No obstante, existen otros factores como la textura, composición y envejecimiento de

la materialidad. Con esto se pueden lograr variaciones térmicas de hasta 3 grados en urbes y hasta 12 grados en la temperatura superficial exterior de las envolventes. Esto significa una gran contribución para disminuir la demanda de energía activa en las edificaciones y mejorar la sustentabilidad ambiental.

El valor de la reflectividad, se representa entre 0 y 1, si el valor es 0 significa que toda la energía es absorbida y si el valor es 1 significa que toda la energía es reflejada, en otras palabras, en cuanto mayor sea el valor del IRS menor absorción térmica tiene el material, lo que aportaría a una menor temperatura superficial exterior (Alchapar, et al, 2020).

Las cubiertas con alta reflectividad solar y alta emisividad infrarroja aportan a tener una temperatura superficial exterior más baja debido a que inhiben la conducción de calor hacia el interior. Los materiales de construcción incorporados en cubiertas normalmente tienen una reflectividad entre 0.05 y 0.25, a comparación de un techo reflectivo puede aumentar a más de 0.6 y una emisividad infrarroja de 0.85 o superior.

No todos los materiales con alta reflectividad son óptimos para su uso en cubiertas, es el caso de los metales que tienen una reflectividad superior de 0.6 pero emisividad infrarrojas muy bajas de 0.25 es decir tienden a calentarse. Y no pueden emitir de manera efectiva la radiación absorbida (Liu, K. K. Y, 2006).

La incorporación de materiales reflectivos, es la estrategia pasiva más incorporada a nivel mundial, con el fin de evitar el sobrecalentamiento interior. Un adecuado índice de reflectividad solar puede beneficiar al confort interior térmico, ahorro de energía y ahorro económico (Akbari and Konopacki, 1998) (N. L. Escalón Alchapar, 2011). Las cubiertas que tienen una alta reflectividad pueden aportar con un ahorro de carga de refrigeración entre el 5 y 40% (Sadineni, Madala, and Boehm, 2011). Por ende, es importante analizar estas variables para las condiciones climáticas de Cuenca.

Por otro las propiedades emisivas de los materiales son un punto determinante en las condiciones de confort, si bien es cierto no es una variable muy aplicada debido que su estudio se encuentra en desarrollo es importante mencionar que el propósito de los materiales de baja emisividad en climas fríos, se centra en reducir la transferencia de calor por radiación, que puede darse hacia el interior o hacia el exterior de una edificación con el fin de regular la temperatura interior y evitar oscilaciones térmicas elevadas, además de retener la energía térmica. Su implementación consiste en formar una barrera radiante a través de las propiedades bajo emisivas de un material o pintura para disminuir la conductividad térmica y aumentar la resistencia térmica del sistema constructivo (Jelle, Kalnaes, and Gao, 2015) (Peng et al., 2022). A continuación, se muestran los valores de reflectividad y emisividad que se utilizarán en la investigación, tabla 03.

MATERIALES SUP.EXT	PROPIEDADES TÉRMICAS		FUENTE
	EMISIVIDAD	REFLECTIVIDAD	
	e	α	
HORMIGÓN	0.9	0.40	Aidico, 2014
FIBROCEMENTO	0.9	0.40	Bergman, et.al
PINTURA BLANCA	0.9	0.80	Alchapar, 2011
PINTURA NEGRA	0.9	0.05	Alchapar, 2011
PINTURA TERRACOTA	0.9	0.33	H.Akbari.2006
TEJA COLONIAL (TERRACOTA)	0.9	0.31	Alchapar, 2011
CERÁMICA	0.9	0.40	Design Builder

Tabla 03: Valores de Reflectividad Solar y Emisividad infrarroja.

Fuente: Elaboración Propia

Es importante analizar estas variables de reflectividad y emisividad para el clima local de Cuenca, con el fin de potenciar su estudio para futuras investigaciones.

Convección: Se refiere a la transmisión de calor por el movimiento de un fluido (líquido o gas) que se desplaza de una zona de alta temperatura a otra de baja temperatura. La convección se produce tanto en líquidos como en gases, y su velocidad depende de la densidad y viscosidad del fluido. Un ejemplo común de convección es el aire caliente que se eleva y produce corrientes de convección en una habitación. Mientras que el aire frío desciende esto es conocido como el

efecto Stack (Conesa, 2013). Se puede concluir que debido a este efecto existen grandes pérdidas de energía térmica especialmente en la noche a través de la cubierta de una edificación.

Conducción: Se refiere a la transferencia de calor a través de un medio material debido al choque de moléculas entre sí. Este mecanismo se produce en sólidos y líquidos y se transmite desde las zonas de mayor temperatura a las de menor temperatura. Los metales son buenos conductores de calor, mientras que el aire o gases son malos conductores por ende se denominan aislantes (Conesa, 2013).

El flujo de calor por conducción está directamente relacionado por la transmitancia térmica (U), sin embargo, también depende de la masa térmica y calor específico, factores que modifican el tiempo de retraso del flujo de calor (Torres, quezada, 2018).

Pero no siempre la resistencia térmica puede ser definida mediante el análisis de la conductividad térmica esto sería apropiado y coherente en materiales más o menos homogéneos en donde su estructuración es sólida, por ejemplo, un ladrillo macizo. En el caso de las estructuras y materiales que conforman las cubiertas, su composición es heterogénea en donde entran en relación un sistema de materiales, esto implica un comportamiento térmico diferente, debido a su forma que contiene cavidades internas de aire, esta propiedad puede ser identificada a través del análisis del flujo de calor y dependerá de la forma en que se coloque el material y su sistema de capas (Maristany, 2017).

Masa Térmica: Se entiende por masa térmica o inercia térmica a la capacidad calorífica de los materiales, los cuales absorben la energía en forma de calor, la almacenan y la liberan progresivamente.

La inercia térmica aplica para todos los componentes de la envolvente, incluso para pisos y mobiliario interior (Antinucci et al., 1992). Se optimiza con una adecuada orientación de la edificación un correcto aislamiento térmico, control de la

ventilación e infiltraciones. Con esta se puede regularizar la temperatura interior y mejorar las condiciones de confort interior térmico. Su óptima aplicación como método de ahorro energético es más efectivo cuando la diferencia de temperatura atmosférica entre el día y la noche es elevada. Su valor se expresa en kJ. ($m = V \cdot C_p \cdot p$) (Quezada Vanegas, 2019).

Donde:

m=inercia térmica

V=volumen

C_p=calor específico

p=densidad aparente

Transmitancia Térmica (U). (W/m²K): Se refiere a la transferencia de calor en un tiempo determinado mediante un material o sistema constructivo, promovida por la diferencia de temperatura entre 2 ambientes de un elemento constructivo. El factor U se expresa en W/m²K (Quezada Vanegas, 2019). A mayor Transmitancia térmica, menor aislación del material o sistema constructivo, por ende, se tienen mayores pérdidas de energía térmica, por lo contrario, a menor transmitancia térmica, mayor aislación del material o sistema constructivo, por ende, menores pérdidas de energía térmica.

Es importante mencionar que en climas correspondiente al piso climático 3 donde se encuentra ubicado la ciudad de Cuenca, la Norma Ecuatoriana de la Construcción establece los valores recomendados para de transmitancia térmica (U), y resistencia térmica (R). que deben cumplir los sistemas constructivos. Tabla 04.

ELEMENTOS OPACOS	HABITABLE		NO HABITABLE	
	NO CLIMATIZADO		Montaje Maximo	Valor Minimo. R de Aislamiento
	Montaje Maximo	Valor Minimo. R de Aislamiento		
CUBIERTAS	U = 2.9	U = 0.89	U = 4.7	U = 0.21

Tabla 04: Coeficiente de transferencia de calor para zona climática 3 NEC.

Fuente: Elaboración propia a partir de MIDUVI, 2018.

Conductividad Térmica (λ). (W/mK): La conductividad térmica es una constante de un material que refleja el flujo de calor. Su causa se debe a la diferencia de temperaturas, es decir la facilidad con la

que el calor se propaga a través de un material. A mayor conductividad térmica la energía se transfiere rápidamente por ejemplo un metal y a menor conductividad térmica el material trabaja como aislante debido a la resistencia para transferir el calor por ejemplo la fibra de vidrio (Quezada Vanegas, 2019).

La resistencia y transmitancia térmica están en función del espesor del material y la conductividad térmica. Sin embargo, como ya se mencionó con anterioridad no todo material o sistema constructivo es homogéneo para poder definir de manera matemática su comportamiento térmico, en el caso de materiales de construcción heterogéneos como el bloque o ladrillo tochano, que presenta cavidades internas o sistemas constructivos que incorporan varias capas resulta impredecible de manera acertada (Maristany, 2017). por ende, a través de la simulación digital se puede tener una aproximación apegada a la realidad.

Dicho esto, es importante analizar las condiciones energéticas que se ven involucradas sobre las diversas materialidades que conforman la cubierta. Y considerar el uso de aislación térmica para un correcto funcionamiento que hace referencia a la retención de calor en días fríos (invierno - noche) y reflexión de radiación para evitar sobrecalentamiento en días calurosos (verano - mañana), con el fin de mejorar las condiciones térmicas en el ambiente interior.

1.3.2 Estrategias de estudios previos

Materialidad

Estudios similares se plantean en la Costa ecuatoriana específicamente en regiones con un clima cálido húmedo en donde se busca comparar el comportamiento térmico de 2 tipologías de cubierta (hormigón y metálica de zinc) para establecer su desempeño térmico y analizar cual funciona mejor para el clima especificado con el fin de construir arquitectura enfocada a la eficiencia energética. El estudio concluyó que para la región estudiada la cubierta ligera metálica presenta mejores ventajas con respecto a la cubierta de hormigón en

aspectos térmicos, energéticos, económicos y medio ambiental, debido a los valores de emisividad y reflectividad superior a 0.7 que se puede obtener si se aplica el uso de pinturas adecuadas. De la misma forma en horas nocturnas la cubierta metálica ligera presenta mejores temperaturas interiores a las que ofrece la cubierta de hormigón (Torres, quezada,2018). Sin embargo, en nuestro entorno es preciso definir el comportamiento energético de las tipologías de mayor implementación en la industria de la construcción local, correspondiente al piso climático Zt3, ya mencionadas con anterioridad.

Por otra parte, investigaciones mencionan que la selección y uso de una materialidad específica para envolventes resulta un inconveniente, debido al consecuente cambio climático y las condiciones térmicas de las áreas de estudio. La investigación evalúa y sugiere la mejor propuesta constructiva de envolventes con el fin de mejorar las condiciones térmicas internas (Medina-Patrón & Escobar-Saiz, 2019). En el estudio digital térmico se simula un caso de estudio con diversas materialidades:

"1. Materiales tradicionales como: concreto, ladrillo, madera, yeso, bloques de hormigón, aluminio, vidrio 3 mm, teja de barro, teja de PVC, teja de zinc, cemento, caucho y asfalto.

2. Materiales de vanguardia como: vidrios dobles o vidrios con cámara de aire, concreto de agregados livianos, yeso cartón, poliéster en fibra de vidrio, fibrocemento, policarbonato, lana de vidrio y acero galvanizado.

3. Materiales de innovadores como: poliestireno expandido, aluminio poroso, Aero gel de polietileno, ETFE, vidrios con gas argón y vidrios con paneles solares".

El estudio concluyó que en las semanas frías los materiales tradicionales presentan mejores condiciones térmicas en el interior y las semanas calientes los materiales innovadores presentan mejores condiciones de aislación térmica debido a que mantienen una temperatura

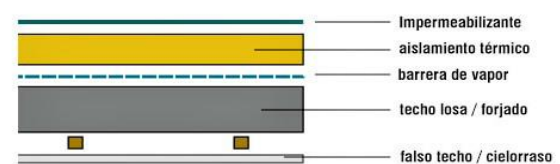
operativa constante. Sin embargo, ninguno de estos sistemas constructivos llegó a confort interior térmico (Medina-Patrón & Escobar-Saiz, 2019). Este hecho es muy particular para la ciudad de Cuenca pues nuestra temperatura durante el día puede oscilar aproximadamente 10 grados de temperatura por los altos índices de radiación solar durante el día y bajas temperaturas durante la noche.

Aislamiento térmico

Se entiende como aislamiento térmico a un material o combinación de materiales que tienen la capacidad de retardar la tasa de flujo de calor. La velocidad de paso de energía depende netamente de las propiedades del material o del conjunto de materiales y su resistencia térmica. La óptima utilización del aislamiento reduce sustancialmente el uso de energía activa (Papadopoulos, A. M. 2005), (MIDUVI, 2018).

Para un mejor rendimiento del aislamiento térmico en regiones donde la carga de calefacción es predominante se debe incorporar cerca de la superficie interior mientras que en regiones donde la refrigeración es predominante, el aislamiento debe estar colocado cerca de la superficie Exterior. Figura 29.

TECHOS CALIENTES



TECHOS FRIOS

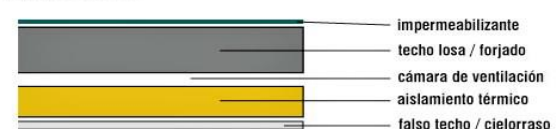


Figura 29: Aislamiento térmico en cubiertas.

Fuente: Solucinesespeciales.net, 2023.

El 60% de las pérdidas de energía térmica se da a través de la cubierta, por lo que el aislamiento térmico juega un papel muy importante al momento de construir la parte más crítica de la envolvente. Si se tiene un adecuado control de la cubierta se podría tener ahorros de cargas de

refrigeración y calefacción en una edificación. Si además del material aislante se incorpora una superficie exterior reflectante se considera como una barrera radiante debido a su condición de emisividad infrarroja. Los aislamientos como el poliestireno extruido EPS o el poliuretano mejoran las condiciones térmicas de hasta un 50% con respecto a una edificación que no implementa estas estrategias pasivas (Sanjay, M., & Prabha Chand, 2008).

En el caso que una edificación implemente aislamiento térmico, de toda la energía actuante sobre la envolvente, solo un cierto porcentaje penetra hacia el interior, pues el aislamiento térmico será quien defina la cantidad del flujo de energía en función de las propiedades térmicas del componente de materiales. El aislamiento térmico es la estrategia más efectiva para los climas cálidos y fríos (Díaz Vicente, M. Á, 2015).

A nivel mundial varios investigadores analizan el impacto que tiene una edificación al mejorar su envolvente en general. Se registró ahorros de entre el 31.4 y 36.8% de energía incorporando estrategias pasivas de eficiencia energética. Entre dichas estrategias se encuentra la incorporación de aislamiento térmico de poliestireno Expandido (EPS) y el blanqueamiento de la envolvente (Cheung et al., 2005).

Otro estudio en Grecia concluyó que incorporar aislamiento térmico en paredes, cubiertas y pisos, adicional a tener bajas infiltraciones, el consumo energético disminuyó entre el 20% al 40% (Balaras et al., 2000).

Considerando este aspecto antes mencionado en base a la bibliografía estudiada. En teoría en nuestra ciudad se deberá implementar aislamiento térmico como método pasivo para tener un control del flujo entrante y saliente de energía térmica con el fin de priorizar las mejores condiciones de temperatura en la noche en base al uso y ocupación horaria de la planta alta y de los espacios emplazados en ella acorde al diseño de viviendas unifamiliares de 2 pisos. En las horas de alta

radiación solar que comúnmente se dan al medio día, con el fin de evitar el sobrecalentamiento se podrá utilizar otras estrategias como la ventilación natural cruzada.

Reflectividad en cubiertas

Se refiere a una estrategia en cubiertas para aumentar o reducir el flujo de energía térmica hacia el interior proveniente de la radiación solar, esta estrategia incorpora una capa de color sobre la superficie exterior de la cubierta para controlar la reflectividad al visible (Díaz Vicente, M. Á, 2015).

Los flujos de calor se pueden disminuir significativamente mediante la aplicación de materiales reflectantes en la superficie exterior de la cubierta pues al reflejar la radiación solar, se reducirá la absorción térmica y la temperatura superficial exterior e interior (Uemoto, Sato, and John, 2010). En la figura 30 se puede observar como mediante el uso del color y materialidad se puede controlar los valores de reflectividad (U.S. EPA, 2010).

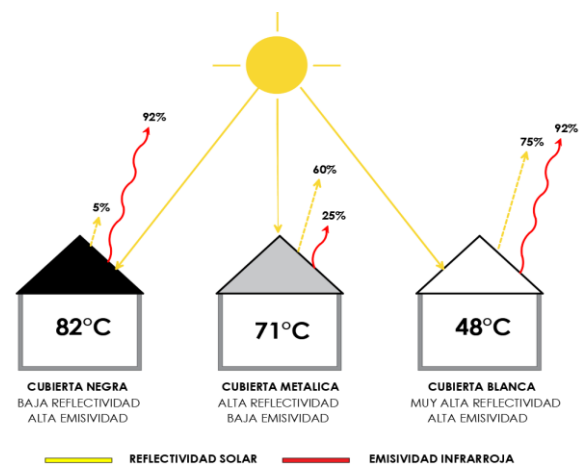


Figura 30: Reflectividad y emisividad en 3 tipos de cubiertas.

Fuente: Elaboración propia a partir de (U.S. EPA, 2010).

La aplicación de cubiertas reflectivas es un proceso relativamente económico sobre todo para viviendas que no tienen aislamiento térmico debido que se interviene en la capa superficial exterior de la cubierta (Levinson & Akbari, 2010). Estudios que plantearon una reflectividad alta para cubiertas y paredes mediante el

uso de colores claros, pudieron constatar una reducción en la carga de enfriamiento en un 30%. (Balaras et al., 2000).

Investigadores sugieren esta estrategia para edificaciones con poco o sin aislamiento por ende es importante hacer un paréntesis para el caso específico de Cuenca que, si bien es cierto, la Norma Ecuatoriana de la Construcción nos clasifica como promedio un clima Templado - Húmedo, donde posiblemente la estrategia de reflectividad podría estar bien aplicada en nuestro entorno. Sin embargo, durante el transcurso de un día podemos tener oscilaciones térmicas elevadas, es decir, picos de calor al medio día y frío en horas de la noche. Para esto se deberá considerar en la investigación si esta estrategia es aplicable o no en nuestra ciudad y sobretodo que nivel o porcentaje de reflectividad sería óptimo para las condiciones climáticas de Cuenca.

Pinturas bajo emisivas

La aplicación de pinturas bajo emisivas en la envolvente de una edificación es considerada una estrategia apta para climas fríos, su aplicación sugiere dejar entre la barrera radiante una cámara de aire en ambos sentidos de un mínimo de 4 a 5 cm, para evitar el contacto con otros materiales y producir una transferencia de calor por conducción (RIMA, 2012). Estudios que usaron pinturas bajo emisivas, buscan en las edificaciones absorber el calor y mantenerlo.

Las pinturas bajo emisivas pueden estar compuestas por aluminio, polvo de plata, perlas de cerámica o micro esferas de boro silicato de sodio (Principi & Fioretti, 2012). Estudios que implementaron pinturas bajo emisivas en climas fríos demostraron que su aplicación en superficies interiores genero ahorros debido que se redujo las cargas de calefacción requeridas sin embargo en verano se requirió mayores cargas de refrigeración.

Generalmente los materiales de construcción tradicional tienen emisividad térmica elevada, lo que significa un

intercambio intenso de calor por radiación (Albatici, et al, 2013). Por lo tanto las edificaciones en climas cálidos como fríos sin protección térmica pueden ganar y perder energía térmica por radiación con facilidad (Peng et al., 2022). Debido a las oscilaciones de temperatura y exposición solar que se puedan tener en las diferentes condiciones climáticas se recomienda realizar los estudios que respondan al sitio local (Jelle et al., 2015).

Los materiales inorgánicos no metálicos como las tejas y el fibrocemento presentan propiedades térmicas indeseables en climas fríos debido que son muy emisivos (Uemoto et al., 2010). Sin embargo, al utilizar este tipo de estrategias podrían presentar limitaciones estéticas debido a su terminado tipo metalizado (Peng et al., 2022). Sobre todo, para la ciudad de Cuenca que tiene una identidad marcada por sus cubiertas terracotas. Este hecho nos incentiva a investigar el comportamiento térmico al aplicar esta estrategia para las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca y de ser apropiado para mejorar las condiciones de confort, incentivar estudios posteriores que adapte la estrategia y contraste con las cubiertas de la ciudad.

Otro estudio de la Universidad de California Berkeley, plantea la utilización de pinturas bajo emisivas con el fin de equilibrar la temperatura interior, es decir regular el rango de temperatura, con el fin de obtener ahorros de energía durante todo el año, para calefacción y refrigeración. Una pintura bajo emisiva no solo cumple un rol de recubrir una superficie, su aplicación está diseñada para reducir y regular la radiación infrarroja. Sin embargo, para obtener este funcionamiento se necesita contenido metálico que resulta ser una limitación estética por su terminado metálico-gris. No obstante, los investigadores han desarrollado gran variabilidad de colores que se adaptan a las necesidades bajo emisivas puesto que el color da apariencia, identidad, satisfacción al entorno (Peng Yucan, et al, 2023).

En climas fríos el revestimiento bajo emisivo mejora la resistencia térmica puesto que

regula la absorción y emisión de la energía térmica e impide la pérdida de calor por radiación. Se ha demostrado que la utilización de esta estrategia reduce eficazmente la necesidad de calefacción en aproximadamente un 36% (Peng Yucan, et al, 2023).

Cubierta verde

La cubierta verde se considera como una estrategia óptima para climas fríos debido que trabaja como una capa adicional complementaria de aislamiento térmico que sirve para retener la energía térmica en el interior con mayor eficacia, debido a la gran masa térmica que aporta al sistema constructivo (Ray, 2010). Figura 31.

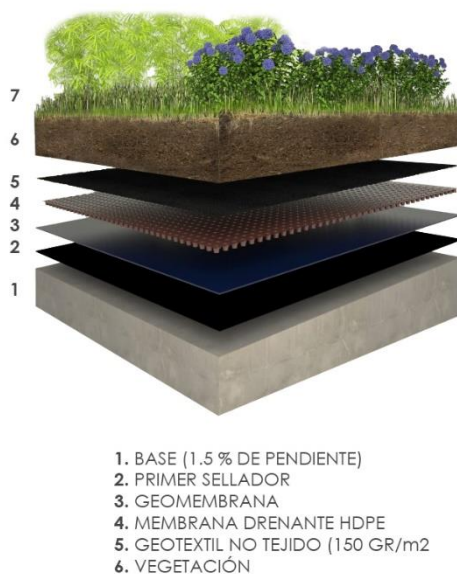


Figura 31: Detalle Constructivo Cubierta Verde.
Fuente: Gania, 2023.

Una cubierta verde puede alcanzar una reflectividad solar de hasta 0.85. Los investigadores han demostrado su eficacia, sin embargo, no debe sustituir la capa de aislamiento. Representan soluciones económicamente elevadas por la complejidad del sistema constructivo y costos de mantenimiento (Castleton et al., 2010). Los techos verdes reflejan de manera más eficiente la radiación a comparación de otras cubiertas convencionales, con la implementación de este sistema constructivo se obtuvo una disminución de pérdida de calor en invierno entre el 10 y 30% adicional, debido a su gran masa térmica que retiene la

energía durante el día para liberarla en la noche hacia el interior, este hecho regula los flujos de calor y permite tener una temperatura constante del ambiente interior.

Cubierta doble capa no ventilada

Una cubierta doble capa no ventilada, se estructura en base a 2 materiales separados entre sí que forman una cámara de aire estático, para disminuir la transmisión de calor mediante la resistencia térmica que el aire proporciona al sistema constructivo (Zingre et al., 2017).

Estudios plantean una comparativa entre una cubierta doble capa ventilada (DSR) y una cubierta sin ventilación con aislamiento térmico (insR), figura 32. El estudio indica que la DSR tiene un buen comportamiento térmico por que actúa como barrera a la radiación solar y proporciona sombra a la cubierta principal reduciendo significativamente el flujo de calor, adicional a ello se genera un vacío beneficioso por las propiedades térmicas del aire que tiene una baja conductividad térmica de 0.025 (W/m k). Se debe tomar en cuenta que el comportamiento térmico de esta estrategia depende de factores ambientales externos como la velocidad del viento y la temperatura ambiente (Zingre et al., 2017).

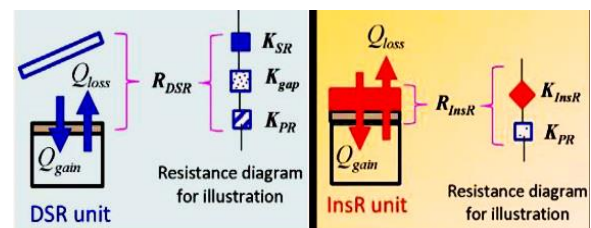


Figura 32: Cubierta doble capa DSR y InsR.
Fuente: Zingre et al., 2017.

El estudio concluyó que el flujo de calor de la (DSR) fue 34% menor que la (insR) en días soleados y 28% menor en días nublados. Sin embargo, en horas de la noche (frío) las cubiertas ventiladas DSR permiten 3-5 veces mayores pérdidas de energía térmica desde el interior que una (insR). Lo que nos indica que el comportamiento térmico dinámico de la cubierta doble capa ventilada DSR cambia según el flujo de calor (Zingre et al., 2017). Figura 33.

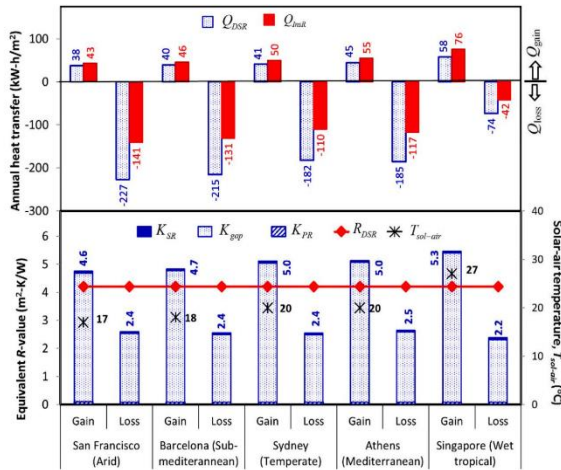


Figura 33: Transferencia anual de calor y Resistencia térmica de DSR e InsR en diversos climas.

Fuente: Zingre et al., 2017.

En síntesis, la cubierta ventilada tiene un mejor rendimiento para prevenir ganancias térmicas, pero también presenta mayores pérdidas de energía en contraste con una cubierta no ventilada (Zingre et al., 2017).

En conclusión, una cubierta doble capa ventilada funciona de manera óptima para climas cálidos en donde predomine la refrigeración como recurso activo de climatización. Sin embargo, para el caso específico de Cuenca y las condiciones climáticas donde predomina el frío, es importante incorporar estrategias que eviten la pérdida de energía térmica en horas de la noche, como el aislamiento mediante cámara de aire no ventilada o el uso de fibras naturales o sintéticas. Por ende, en base a la bibliografía consultada una cubierta doble capa no ventilada sería una variable de estudio óptima para la presente investigación.

Otro estudio realizado en Canadá por el consejo nacional de investigación, indica que una cavidad de aire estático restringe la pérdida de energía térmica en invierno y la ganancia de calor en verano. El estudio recalca la importancia de reducir las fugas de aire con el fin de maximizar la resistencia térmica. Además, que en climas frío húmedo, el tener una cámara de aire ventilada empeora los problemas de humedad interna y presentan mayores pérdidas de energía. Lo que repercute en mayor demanda de energía activa. Por

ende, la mejor solución para el clima de estudio sería cámara de aire no ventilada (Schreiber H. et al, 2021).

1.3.3 Simulación digital en el análisis térmico del edificio y la cubierta

Para una aproximación del rendimiento térmico de una edificación mediante simulación digital térmica Existen parámetros que no son cuantificables con exactitud, como los horarios de ocupación precisa de las áreas internas, tipo de actividad desarrollada, sensaciones térmicas de cada usuario (usuarios friolentos o calurosos), variabilidad de ocupantes, etc. Estos son parámetros no se pueden estimar de modo fiable y proporcionarían datos o resultados alejados de la realidad para la investigación. Se debe considerar a la envolvente como el elemento más importante sobre el cual se puede analizar, modificar y pronosticar un comportamiento muy acercado a la realidad mediante simulaciones digitales térmicas que posterior a una correcta ejecución de la obra garantizaría que la edificación se comporte térmicamente como estaba estudiada (Cuerdo and National, 2021).

Dentro del campo de la investigación existe gran incertidumbre sobre la aplicación de metodologías predictivas a través del uso de programas de simulación energética para edificaciones, debido a la fiabilidad de los resultados. En consecuencia, de la gran cantidad de variables de entrada que manejan dichos programas y que muchas veces son difíciles de predecir con exactitud.

Por tal motivo, el software Design Builder será configurado de acuerdo a las especificaciones que indica el Congreso nacional del medio ambiente en su comunicación técnica "La simulación energética como herramienta de predicción, normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes", que plantea una metodología para proyectos de investigación sobre la utilidad de instrumentos informáticos de simulación energética en proyectos arquitectónicos relacionados con la

sostenibilidad y el cuidado ambiental utilizando el Software Design Builder y su motor de simulación Energy Plus. La metodología implementa los parámetros de la envolvente a una volumetría sencilla conocida como "La Caja Gris" basada en protocolos de validación para softwares alternativos elaborado por "El ministerio de Industria, Turismo y Comercio y la Dirección General de Urbanismo y Política de Vivienda (Cuerdo and National, 2021).

Design builder

Building Energy Modeling (BEM), Design Builder es un software de simulación energética utilizado en la industria de la construcción, este software permite a los arquitectos, ingenieros y diseñadores de edificios modelar el comportamiento térmico y energético de las edificaciones mediante simulaciones dinámicas. Dentro de sus principales características incluyen la capacidad de modelar el clima y la ubicación geográfica del edificio, la simulación de sistemas de climatización y ventilación, la evaluación del rendimiento energético y la optimización del diseño de edificios para maximizar la eficiencia energética y reducir el consumo de energía. (web oficial de Design Builder: <https://designbuilder.co.uk/>)

Además, Design Builder cuenta con una interfaz gráfica de usuario fácil de usar, lo que facilita la creación de modelos de edificios y la evaluación del rendimiento energético de manera rápida y eficiente. En el ámbito arquitectónico Design Builder sirve analizar el desempeño térmico de las edificaciones que incorporan métodos de climatización pasivos y activos. Con el fin de conocer o mejorar su comportamiento térmico, y brindar mejores condiciones de habitabilidad (Calzada et al., 2014).

1.4 Resumen del capítulo

El Ecuador está dividido geográficamente por la línea ecuatorial, y sus ciudades tienen latitudes cercanas a 0. Por tal motivo las edificaciones en el Ecuador reciben un índice de radiación solar muy alto sobre el plano horizontal (cubiertas) durante todo el año. Para el desarrollo sostenible de la industria de la construcción, es un tema clave analizar el desempeño térmico de la cubierta, debido que representa el elemento más crítico de la envolvente, por su alta susceptibilidad a la radiación solar, hecho que influye en gran medida con las condiciones de confort interior térmico. Se estima que por la cubierta se intercambia alrededor del 50 al 60% de energía térmica entre el interior y el exterior de una edificación.

En las últimas décadas, en el Ecuador, el sector de la construcción ha cambiado sus estándares, para adaptarse a tecnologías industrializadas. Este hecho ha desplazado la arquitectura tradicional vernácula de cada región, para generar un estándar constructivo a nivel nacional, que no toma en cuenta las condiciones climáticas del entorno. Todo con el fin de optimizar los tiempos de montaje en obra, disminuir las cargas estructurales y tener ahorros económicos.

Dentro de la región Andina se encuentra ubicado la ciudad de Cuenca, específicamente en la zona climática 3, que representa el piso climático más poblado del país, posee una temperatura media entre 14°C y 18°C. Sin embargo, se pueden tener promedios de 7.6°C en la noche, debido a su altitud geográfica de 2560 msnm y un promedio de 20.85°C en el día, debido a la radiación solar alta ocasionada por la latitud ecuatorial.

En la ciudad de Cuenca la construcción de cubiertas tiene gran preponderancia al uso de techos inclinados debido a los altos índices de pluviosidad. La tipología de cubiertas con pendientes entre 0 y 30 grados supera el 90% de uso en las edificaciones locales. Estudios revelan que debido a la latitud que se encuentra

ubicado la zona de estudio el índice de radiación solar es muy elevado sobre cualquier inclinación u orientación que se encuentre emplazada la edificación, sin embargo, la radiación es mínimamente mayor cuando la inclinación de la cubierta es baja.

Los materiales más utilizados en la zona de estudio para la construcción de cubiertas, es el fibrocemento ondulado con un 65% de ocupación, seguido del hormigón aligerado con 21% y otros con el 12.80%, entendiéndose por otros a la cubierta de teja principalmente [4]. La principal problemática resulta de la poca masa térmica incorporada, por lo que se obtienen flujos de calor pronunciados, hecho que repercute en oscilaciones térmicas interiores elevadas durante el día y obliga a tener sistemas de climatización activa para acondicionar las ares interiores, lo que se resume en un alto consumo energético.

El flujo de calor por radiación solar en cubiertas afecta significativamente las condiciones de temperatura interior. Para minimizar este flujo que incide sobre el sistema constructivos es necesario aplicar estrategias que determinen la porción de energía absorbida y reflejada que incide sobre el plano de la envolvente horizontal (cubierta) de tal manera que mejore las condiciones interiores térmicas de un ambiente.

Para las simulaciones digitales térmicas se utilizará el Software Design Builder y su motor de simulación Energy Plus. La metodología implementa los parámetros de la envolvente térmica aplicados a una volumetría simple conocida como "La Caja Gris" basada en protocolos de validación para programas alternativos, que se basa en minimizar el número de variables no controladas con el fin de obtener un modelo constructivo más ajustado a la realidad.



2

CAPÍTULO

2.1. Configuración del software

La configuración del software se dará en base a "La Caja Gris" que busca reducir el número de incertidumbres para la generación de un modelo térmicamente adecuado dentro del software.

En primera instancia delimita una envolvente con sus cualidades térmicas y geométricas más parámetros exteriores que puedan influir como sombras o edificaciones adyacentes, Y elimina las acciones energéticas que vienen de la utilización de las áreas y otros factores como (Ocupantes, Cargas asociadas, Infiltraciones y acondicionamiento) debido al alto grado de variabilidad de estos parámetros,

El estudio "La simulación energética como herramienta de predicción, normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes", enfatiza que de esta manera se reduce el número de variables no controladas y realiza la configuración netamente de los materiales constructivos para obtener un modelo ajustado a la realidad (Cuerdo and National, 2021).

Sin embargo, en modelos más complejos seguirá siendo una incertidumbre acercarse a la realidad debido a la dificultad de calibración de los modelos informáticos y afinación de parámetros de entrada si se toman en cuenta la variabilidad que puede existir, por ejemplo, en infiltraciones constantes, apertura de ventanas, ocupación, cargas de electrodomésticos, vestimenta, orientación, etnia, etc., (Cuerdo and National, 2021).

2.2. Caso de estudio

Para la presente investigación, el modelo de estudio será realizado con las siguientes características. En primer lugar, se considera una cubierta plana, pues como ya se mencionó con anterioridad debido a la latitud, el índice de radiación solar es muy elevado sobre cualquier pendiente u orientación, sin embargo, la radiación es mínimamente mayor cuando la inclinación de la cubierta es baja (Zalamea and Barragán-Escandón, 2020). Por lo que se

considera a la cubierta plana como la más crítica. Por lo tanto, se configurará las materialidades de cubierta liviana y pesada, sin pendiente con el objetivo de analizar la situación menos favorable. No obstante, el estudio es válido para cualquier orientación y pendiente.

A través de esta condicionante se elimina la variable de orientación e inclinación del modelo base, pues solo se estudiará la incidencia térmica que tiene la envolvente horizontal. La envolvente vertical no será considerada una variable debido que será la misma para todas las simulaciones energéticas.

2.2.1. Características físicas.

Como mampostería de soporte para la cubierta y con el fin de formar la caja gris, se utilizará en todas las simulaciones, paredes de ladrillo, debido que representa el sistema constructivo para paredes de mayor uso en la ciudad de Cuenca (ESED 2022). Figura 34.



Figura 34: Cubiertas en Cuenca Ecuador.
Fuente: Propia.

De acuerdo al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) de Cuenca 2022, Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS, 2022), En la actualidad la vivienda unifamiliar, es la tipología constructiva de mayor implementación en la ciudad de Cuenca.

Como se puede observar en la tabla 05, la adquisición de predios para la construcción de viviendas unifamiliares alcanzó el 55.4%. Por lo que se toma las características mínimas para el emplazamiento de esta tipología de

vivienda según las normativas vigentes en la ciudad.

SUELO URBANO NO CONSOLIDADO	PREDIOS	Unifamiliares	4545	55,4%
		Multifamiliares	1215	26,7%
		Comercios/industrias	2434	3,5%
		Vacancia	10144	14,4%
PROYECCIÓN 2030	HOGARES	Unifamiliares	4545	53,5%
		Multifamiliares	3944	46,5%
		NUEVOS HOGARES	8489	100,0%

Tabla 05: Proyección de ocupación del suelo Urbano, Cuenca.

Fuente: Equipo PUGS.

De esta manera el Plan de Ordenamiento Territorial PDOT de Cuenca, establece que el tamaño mínimo del lote se define en cada Polígono de Intervención Territorial (PIT) de acuerdo a características físicas, urbanísticas, ambientales y modelo territorial. Por lo tanto, la investigación se encaja en un PIT urbano acogiéndose a las características mínimas de acuerdo a la normativa. Para ello se establece como lote mínimo el área de 120m² y el emplazamiento de la edificación bajo las siguientes consideraciones: Frente no inferior a 7m retiro frontal no inferior a 5m, retiro posterior no inferior a 3m, por lo que se genera un predio mínimo de 7x18m, el cual cumple la normativa y aplicado los retiros obligatorios tendríamos un bloque de 7x10m de 1 o 2 pisos adosada.

El ambiente interior servirá exclusivamente para determinar una temperatura generada por el flujo térmico de la cubierta y las oscilaciones térmicas que se presentan en los días de estudio, mas no para simular una aproximación de la realidad térmica del espacio interno debido que, para determinar la temperatura de ocupación interior intervienen todas las variables omitidas que no están directamente relacionadas con el objetivo del estudio.

Por otra parte, como ya se mencionó, la configuración del software se basa en reducir el número de variables que no se pueden controlar, y únicamente se consideran los materiales que conforman las cubiertas con mayor implementación en la construcción Cuencana, para obtener los flujos de calor incidentes desde la cubierta, lo más ajustado posible a la realidad.

De esta manera se establece como modelo base al siguiente bloque de 7mx10m, de dos niveles Figura 35, 36, 37. Sin embargo, para los cálculos energéticos se considerará únicamente a la planta alta, debido a la relación directa con la cubierta.

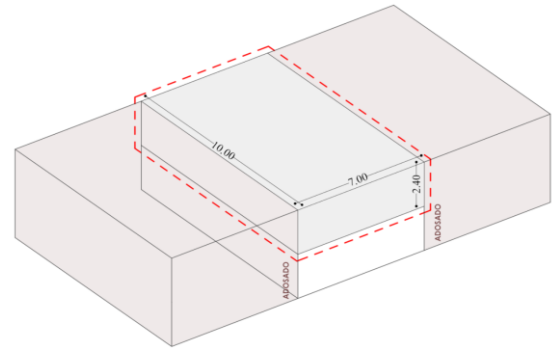


Figura 35: Modelo base (axonometría).

Fuente: Elaboración Propia.

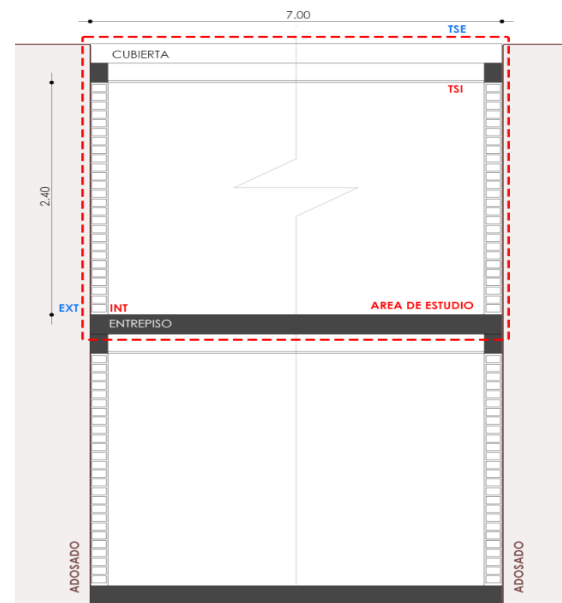


Figura 36: Modelo base (Sección).

Fuente: Elaboración Propia.

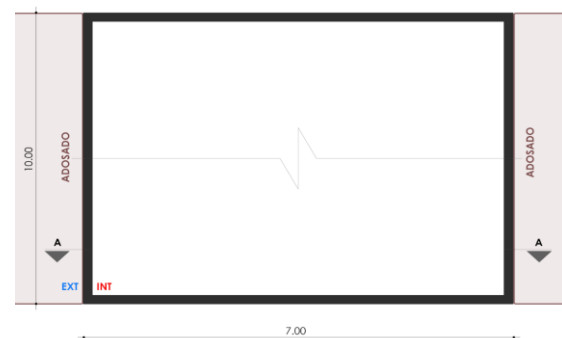


Figura 37: Modelo base (planta alta).

Fuente: Elaboración Propia.

Las características generales del módulo para efectos de simulación digital térmica son las siguientes:

- Mampostería de Ladrillo panelón $e=12\text{cm}$ con recubrimiento de mortero de cemento 2 caras (ext-int) $e=1.5\text{cm}$ cada lado.
- Losa de entrepiso de hormigón armado sin recubrimiento $e=20\text{cm}$.

2.2.2. Características térmicas.

Para el análisis digital térmico del modelo base de estudio, con el fin de cumplir con el objetivo general de la presente investigación “Caracterizar el comportamiento del flujo de calor en las diferentes tipologías de cubiertas mayormente utilizadas en la ciudad de Cuenca, a partir de simulación digital térmica para establecer recomendaciones de aplicación de manera que se mejore las condiciones interiores térmicas” y de acuerdo a la metodología aplicada “Caja Gris”, se minimizaran las variables térmicas no controladas, por ende no se considera en la investigación lo siguiente:

- Uso de sistemas activos de climatización.
- Modelado de Puertas, Vanos, Ventanas.
- Cargas por ocupación.
- Cargas de equipos.

Además de ello como se mencionó con anterioridad la orientación de la edificación e inclinación de la cubierta no se consideran variables, puesto que solo se analiza la envolvente horizontal (techo), por ende, el cambio de orientación no altera los resultados y en cuanto a la inclinación de la cubierta nuevamente se recalca que en la latitud ecuatorial en la zona de estudio la pendiente no representa un cambio significativo para el potencial de captación solar. Dicho esto, el modelo base busca configurar netamente a la materialidad implícita en los detalles constructivos identificados con anterioridad correspondientes a las tipologías de cubiertas con mayor uso en la construcción local de la ciudad de Cuenca.

Los parámetros térmicos generales para todas las simulaciones se establecen de la siguiente manera:

- Infiltraciones 1.5 Ach. (renovación mínima higiénica). (Torres Quezada, et al. 2019)
- Temperatura del suelo ($14.3\text{ }^{\circ}\text{C}$). (Torres, Quezada, 2018).

Una vez analizadas las propiedades y características térmicas, en la tabla 06, se detallan los materiales y valores que serán utilizados en la presente investigación.

CATEGORÍA	TIPO	MATERIAL	ESPESOR	CONDUCTIVIDAD D TÉRMICA	CALOR ESPECÍFICO	DENSIDAD	RESISTENCIA TÉRMICA	TRANSMITANCIA TÉRMICA	FUENTE
			e m	$K = \lambda$ W/mK	Cp J/KgK	d Kg/m3	R m2K/W	U=1/R W/m2K	
CL	CL1	Fibrocemento Ondulado	0.005	0.930	1120	2000	0.01	2.912	NEC-HS-EE
		Aire	0.200	/	/	/	0.15		NEC-HS-EE
		Yeso Cartón	0.012	0.250	1000	900	0.05		NEC-HS-EE
	CL2	Teja	0.010	0.824	806.2	1759	0.01	2.813	X. GUERRA & A. JARAMILLO, 2015
		Fibrocemento Ondulado	0.005	0.930	1120	2000	0.01		NEC-HS-EE
		Aire	0.200	/	/	/	0.15		NEC-HS-EE
CP	CP1	Yeso Cartón	0.010	0.250	1000	900	0.04	1.514	NEC-HS-EE
		Cerámico	0.010	1.000	800	2000	0.01		NEC-HS-EE
		Mortero Bondex	0.010	0.720	1000	1760	0.01		NEC-HS-EE
		Hormigón Armado	0.050	1.630	1050	2400	0.03		NEC-HS-EE
		Bloque de Hormigón	0.150	0.560	1050	1400	0.27		NEC-HS-EE
		Aire	0.200	/	/	/	0.15		NEC-HS-EE
		Yeso Cartón	0.010	0.250	1000	900	0.04		NEC-HS-EE
		Cerámico	0.010	1.000	800	2000	0.01		NEC-HS-EE
		Mortero Bondex	0.010	0.720	1000	1760	0.01		NEC-HS-EE
	CP2	Hormigón Armado	0.050	1.630	1050	2400	0.03	2.547	NEC-HS-EE
		Acero Galvanizado	0.001	45.3	500	7824	2.2E-05		NEC-HS-EE
		Aire	0.200	/	/	/	0.15		NEC-HS-EE
		Yeso Cartón	0.010	0.250	1000	900	0.04		NEC-HS-EE

Tabla 06: Propiedades térmicas, materiales construcción.

Fuente: (MIDUVI, 2018), (X. Guerra & Jaramillo, 2015).

2.3 Periodos de simulación.

Para las correspondientes simulaciones en el software Design Builder y la configuración de su motor Energy Plus, con el objetivo de encontrar el flujo de calor de las cubiertas mayormente incorporadas en los sistemas constructivos de la ciudad de Cuenca, se utilizará el fichero climático de la estación meteorológica de la Universidad de Cuenca Cuenca_hour EPW. Con el fichero climático se identificará de acuerdo a las estadísticas

de lecturas climatológicas, la temperatura del ambiente exterior para el día extremo frío y día extremo caliente.

2.3.1. Fichero climático

Para la temperatura exterior del aire en la ciudad de Cuenca, según el fichero climático se obtuvo una temperatura promedio anual de 14.3 °C, que oscila con temperaturas promedio anual máxima de 20.8 °C y un promedio anual mínimo 7.6 °C, figura 38. Además, se registra un porcentaje promedio anual de humedad Relativa de 75.1% figura 39.

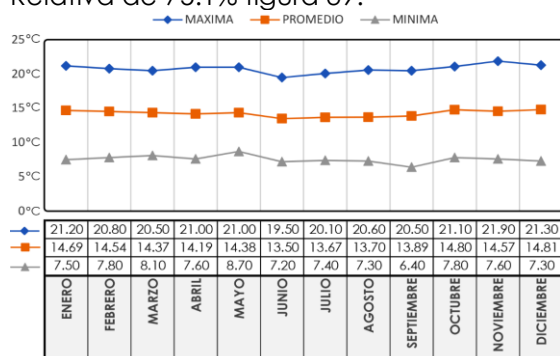


Figura 38: Promedio mensual de temperatura exterior del Aire Cuenca, Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Fichero Climático.

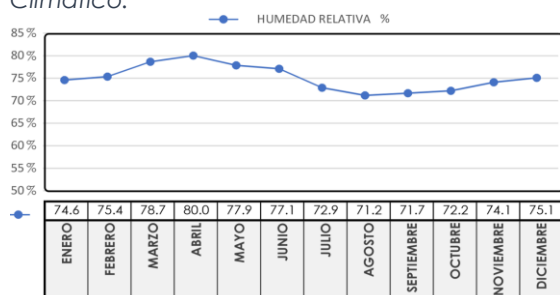


Figura 39: Promedio mensual de HR Cuenca, Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Fichero Climático.

En base a estos registros meteorológicos se pudo delimitar los días de estudio correspondientes a la temperatura ambiente exterior en base a dos escenarios extremos:

- Día extremo frío: 12 de septiembre, temperatura mínima exterior registrada de 6.4 °C.
- Día extremo Caliente: 19 de noviembre, temperatura promedio máxima exterior registrada de 23.1 °C, Figura 40.

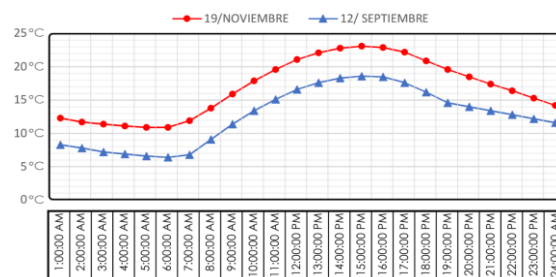


Figura 40: Temperatura exterior del Aire día frío y día caliente en Cuenca Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Fichero Climático.

Para la Radiación Solar en la ciudad de Cuenca según los datos registrados en el fichero climático se obtuvo una radiación promedio anual de 416 Wh/m², que oscila entre 286 y 667. Wh/m². que podremos observar en la figura 41.

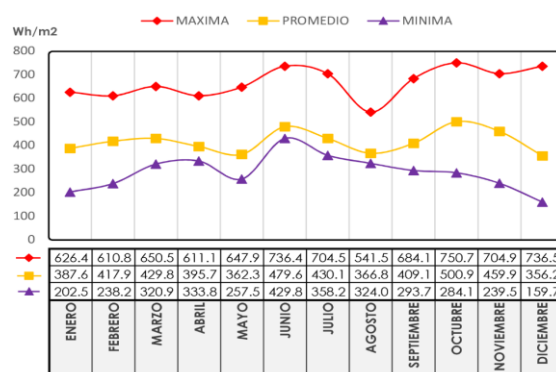


Figura 41: Radiación Solar, Cuenca, Ecuador.

Fuente: Elaboración propia a partir de Fichero Climático.

En resumen, para la presente investigación en base a las temperaturas críticas identificadas, se realizarán las simulaciones para:

- 12 de septiembre, día más frío del año 6.4 °C.
- 19 de noviembre, día más caliente del año 23.1 °C.

Las simulaciones se centran en la temperatura del aire exterior y no en base a la radiación Solar, debido a la ubicación geográfica de Cuenca Ecuador, por lo que la trayectoria solar no presenta mayor variabilidad y se tiene radiaciones promedio constantes durante todo el año. Sin embargo, más adelante se podrá identificar las radiaciones incidentes en los días de estudio.

2.4. Variables de estudio

De acuerdo a los estudios que se analizaron con anterioridad en el capítulo 2, se determinaron las variantes más significativas y sus variables, con el fin de mejorar el comportamiento térmico de un sistema constructivo, para brindar mejores condiciones de temperatura interior. Las variables establecidas para el presente estudio son:

1.4.1 Doble Capa y Aislamiento Térmico.

1.4.2 Reflectividad al visible.

1.4.3 Emisividad infrarroja.

Que se pueden observar con mayor detalle en la figura 42.

Las variables serán aplicadas a las tipologías de cubiertas ligeras (CL) y cubiertas pesadas (CP), Tabla 07.

CATEGORIA		ROOF
CL	CL1	FIBROCEMENTO ONDULADO
	CL2	FIBROCEMENTO O. + TEJA
CP	CP1	LOSA HORMIGÓN ALIGERADA
	CP2	LOSA COLABORANTE

Tabla 07: Tipologías de Cubiertas CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

Cada variable será analizada bajo las consideraciones ya establecidas en los detalles constructivos que se propusieron con anterioridad. Y bajo los factores climáticos que por defecto nos proporciona el fichero climático, Cuenca_-hour EPW.

Es importante recalcar las siguientes consideraciones que se implementarán en el desarrollo de la presente investigación:

- Cubierta Plana pendiente 0%.
- 1.5 renovaciones de Aire por Hora.
- Bloque modelo adosado lateralmente.
- Una sola orientación (Fachada vista Norte).
- No existirá ganancias ni pérdidas de calor por ventanas o puertas.
- La temperatura del suelo está equilibrada con promedio de temperatura ambiente exterior.

		CL		CP	
		CL1	CL2	CP1	CP2
VARIABLES DE ESTUDIO	DOBLE CAPA	SIN	TAE TSE		
			TAI TSI		
	CON		TAE TSE		
			TAI TSI		
	AISLAMIENTO		TAE TSE		
			TAI TSI		
	REFLECTIVIDAD	r = 0.25	TAE TSE		
			TAI TSI		
			TAE TSE		
		r = 0.50	TAE TSE		
			TAI TSI		
			TAE TSE		
	EMISIVIDAD	e = 0.30	TAE TSE		
			TAI TSI		
			TAE TSE		
		e = 0.60	TAE TSE		
			TAI TSI		
			TAE TSE		
		e = 0.90	TAE TSE		
			TAI TSI		
			TAE TSE		

Figura 42: Variables de estudio

Fuente: Elaboración propia.

El manejo adecuado de las variables son determinantes para establecer una sección constructiva adecuada, y contrastar con el sistema constructivo sin modificaciones, puesto que a través de esta se podrá analizar la transmisión, aislamiento y conducción del calor con el fin de optimizar un sistema constructivo y mejorar las condiciones de eficiencia térmica, ahorro de energía y confort (HB Cheikh, A. Bouchair 2008).

Para el desarrollo de la presente investigación, en la figura 43, se presenta la configuración de cubiertas CL y CP dentro del software Design Builder. La tabla muestra los sistemas constructivos específicamente para el caso de doble capa con cámara de aire de 10cm y Aislamiento térmico de 5 cm. El aislamiento térmico considerado es la fibra de vidrio que tiene una conductividad térmica de 0.046 W/mK (NEC-HS-EE). En el caso de la variable que no considera cielo raso simplemente se omite la cámara de aire y gypsum con el fin de determinar el comportamiento netamente del material o conjunto de materiales en un estado original.

Las características térmicas de los materiales que conforman cada sistema constructivo se mencionaron con anterioridad y se pueden revisar en la tabla 06.

Una vez aplicadas todas las estrategias posiblemente viables para mejorar las condiciones de confort interior térmico es importante tener en la balanza si la cubierta deberá ser utilizada como medio de climatización interna o simplemente como ya se mencionó con anterioridad que al ser la parte más crítica de la envolvente por la cual se comparte energía sería óptimo aislar la cubierta de manera rigurosa para evitar ganancias como pérdidas de energía, y acondicionar la temperatura interior a través de la mampostería como de otras estrategias pasivas.

	CON CÁMARA DE AIRE + GYPSUM	CON CÁMARA DE AIRE + GYPSUM + AISLAMIENTO
CL1	Superficie Exterior Fibro cemento (0.5cm) Cámara de Aire 10cm Gypsum 1.2cm Superficie Interior	Superficie Exterior Fibro cemento (0.5cm) Cámara de Aire 10cm Fibra de Vidrio (5cm) Gypsum (1.2cm) Superficie Interior
CL2	Superficie Exterior Teja Colonial (1cm) Fibro cemento (0.5cm) Cámara de Aire 10cm Gypsum (1.2cm) Superficie Interior	Superficie Exterior Teja Colonial (1cm) Fibro cemento (0.5cm) Cámara de Aire 10cm Fibra de Vidrio (5cm) Gypsum (1.2cm) Superficie Interior
CP1	Superficie Exterior Cerámica (1cm) Mortero Bondex (1cm) Hormigón (5cm) Bloque Aligerado (15cm) Cámara de Aire 10cm Gypsum (1.2cm) Superficie Interior	Superficie Exterior Cerámica (1cm) Mortero Bondex (1cm) Hormigón (5cm) Bloque Aligerado (15cm) Cámara de Aire 10cm Fibra de Vidrio (5cm) Gypsum (1.2cm) Superficie Interior
CP2	Superficie Exterior Cerámica (1cm) Mortero Bondex (1cm) Hormigón (5cm) Placa Colaborante (0.075 cm) Cámara de Aire 10cm Gypsum (1.2cm) Superficie Interior	Superficie Exterior Cerámica (1cm) Mortero Bondex (1cm) Hormigón (5cm) Placa Colaborante (0.075 cm) Cámara de Aire 10cm Fibra de Vidrio (5cm) Gypsum (1.2cm) Superficie Interior

Figura 43: Configuración de cubiertas CL y CP.
Fuente: Elaboración propia.



3

CAPÍTULO

2. Resultados

Este capítulo se centra en el análisis de cada una de las variables planteadas y su impacto en los 4 casos de estudio. Los flujos de calor resultantes de cada sistema constructivo serán evaluados mediante la temperatura del ambiente interior (Tai) y su oscilación térmica.

El capítulo se divide en dos partes: el análisis independiente de cada una de las variables y el análisis de los resultados generales obtenidos.

3.1 Análisis por variables

Como se explicó previamente los resultados se obtuvieron para el día extremo frío 12 de septiembre y el día extremo caliente 19 de noviembre. Todas las simulaciones se realizaron a partir del modelo base establecido, en el cual la única variable de análisis será la cubierta.

En primera instancia se analizarán los resultados de cada sistema constructivo CL y CP, en su estado original y con la aplicación de las variables: Doble capa y Aislamiento. En estas variables se analizará la temperatura del ambiente interior (Tai) y se identificarán las oscilaciones que producen estas variables.

Posteriormente, la investigación implementará 2 variables adicionales, con el fin de mejorar las condiciones de temperatura interior en la ciudad de Cuenca, estas variables son reflectividad y emisividad. Las variables serán aplicadas únicamente a los sistemas constructivos CL y CP con mejor comportamiento térmico.

3.1.1 Doble capa y aislamiento

Es importante señalar que el modelo utilizado para todos los análisis no considera las ganancias solares directas o las ganancias internas, lo cual elevará más la temperatura interior de todos los casos analizados.

Además, las temperaturas obtenidas en el desarrollo de la presente investigación no corresponden a temperaturas operativas y

tampoco se pretende llegar a un rango de confort. El presente estudio busca obtener la Tai producto del flujo de calor de un sistema constructivo de cubierta, con el fin de potenciarlo e implementar estrategias que mejoren las condiciones térmicas internas.

Cubierta liviana CL1

En la figura 44, se muestra los resultados de la tipología CL1 en su estado original y con la aplicación de doble capa y aislamiento en el día extremo, frío (a) y caliente (b).

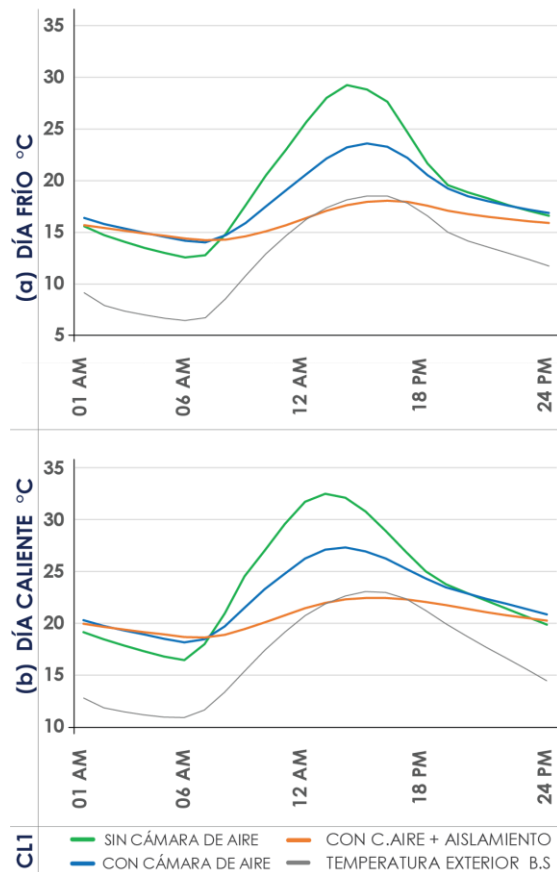


Figura 44: Tai CL1, Doble Capa y Aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de CL1 en su estado original, es decir solo con una capa de fibrocemento, en el día frío (Figura 44a), la Tai promedio alcanza los 19.4°C lo que significa que la temperatura está dentro del rango de confort. Sin embargo, su oscilación térmica varía de 12.5 a 29.2°C, lo cual implica un sobrecalentamiento en el día y baja temperatura en la noche. Algo muy similar sucede en el día caliente (Figura 44b) debido que presenta la misma oscilación alrededor de los 16°C, aunque con una temperatura máxima mayor que actúa cerca de los 33°C. Esto responde a la baja masa térmica que presenta el sistema constructivo lo cual

provoca altas ganancias y altas pérdidas térmicas en el interior.

En cuanto a CL1 con Doble capa, la adición de una cámara de aire permite que el espacio interior en el día frío (Figura 44a) alcance una Tai promedio de 18.1°C, con una oscilación menor al caso anterior que va de 14 a 23.6°C es decir 7°C menor. Al implementar masa y resistencia térmica al sistema constructivo la oscilación disminuyó un 43% en los dos días de análisis (Figura 43a) y (Figura 44b). De este modo se debe considerar únicamente que en el día caliente el sobrecalentamiento es 3.7°C mayor. Pese a mejorar la Tai promedio, los valores actúan en un rango sensible que podrían provocar elevadas temperaturas en el día y bajas temperaturas en la noche.

Por último, en el caso de CL1 con Aislamiento, al incorporar esta capa en el día frío (Figura 44a) se alcanza una Tai promedio de 16°C, con una oscilación térmica estable que va de 14.2 a 18°C es decir de 3.8°C. Sin embargo, la Tai promedio disminuye 2.1°C con respecto al sistema de Doble capa. Aunque la reducción es mínima, en horas críticas de la noche el uso de aislamiento no implica un cambio significativo en la Tai promedio. No obstante, en el día caliente (Figura 44b) se presenta mejores condiciones, pues la temperatura oscila igual 3.8°C, en un rango de 18.6 a 22.4°C.

Cubierta liviana CL2

En la figura 45, se muestra los resultados de la tipología CL2 cubierta de fibrocemento y teja, con la aplicación de doble capa y aislamiento en el día extremo, frío (a) y caliente (b).

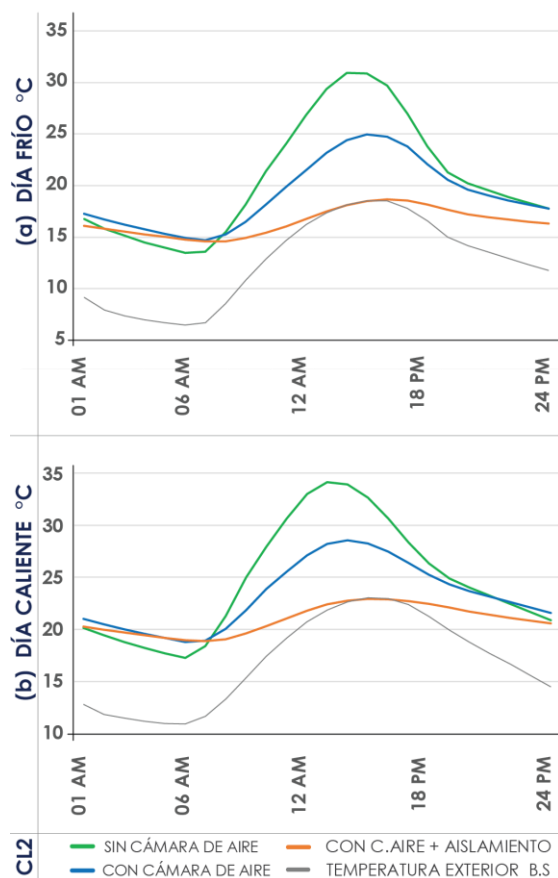


Figura 45: Tai CL2, Doble Capa y Aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de CL2 que incorpora mayor masa térmica, es decir una capa de fibrocemento y teja, en el día frío (Figura 45a), En el estado original que no considera cámara de aire, la Tai promedio alcanzó los 20.7°C, con una oscilación térmica que varía de 13.5 a 30.9°C. La teja no permitió mayor variación en las condiciones interiores, con respecto a CL1. Pese a incorporar mayor masa térmica la oscilación sigue siendo bastante elevada. Esto debido a la menor reflectividad que presenta la teja en comparación al fibrocemento, de acuerdo a la bibliografía especificada. Además, la temperatura en horas de la noche presenta valores muy

bajos. Algo muy similar se presenta en el día caliente (Figura 45b), con oscilaciones elevadas cercanas a 17°C, con temperaturas aceptables en la noche de 18.8°C, pero muy elevadas en el día 34.1°C.

En cuanto a CL2 con Doble capa, la adición de una cámara de aire permite que el espacio interior en el día frío se regule significativamente (Figura 45a). La Tai promedio alcanzó los 19.1°C, con una oscilación que va de 14.7 a 24.9°C, muy similar a CL1 cuando utiliza la misma estrategia, pero 7°C menor que CL2 cuando no considera una cámara de aire. No obstante, pese a que la Tai promedio resulta óptima, la oscilación sigue siendo muy elevada. Además, que en horas de la noche la temperatura resulta baja. Una oscilación similar se presenta en el día caliente (Figura 45b) alrededor de 10°C, que va de los 18.8 a 28.5°C, lo que ocasiona discomfort en el periodo diurno por sobrecalentamiento.

Por último, en el caso de CL2 con Aislamiento, al incorporar esta capa en el día frío (Figura 45a) se alcanza una Tai promedio de 16.5°C, con una oscilación térmica que va de 14.6 a 18.7°C. Lo que resulta en una oscilación térmica estable. No obstante, la Tai promedio y la temperatura en horas de la noche resultan bajas. Por otra parte, en el día caliente (Figura 45b) se presenta mejores condiciones de Tai, pues la temperatura oscila 4°C, entre 18.9 y 22.9°C.

Cubierta pesada CP1

En la figura 45, se muestra los resultados de la tipología CP1 en su estado original y con la aplicación de doble capa y aislamiento en el día extremo, frío (a) y caliente (b).

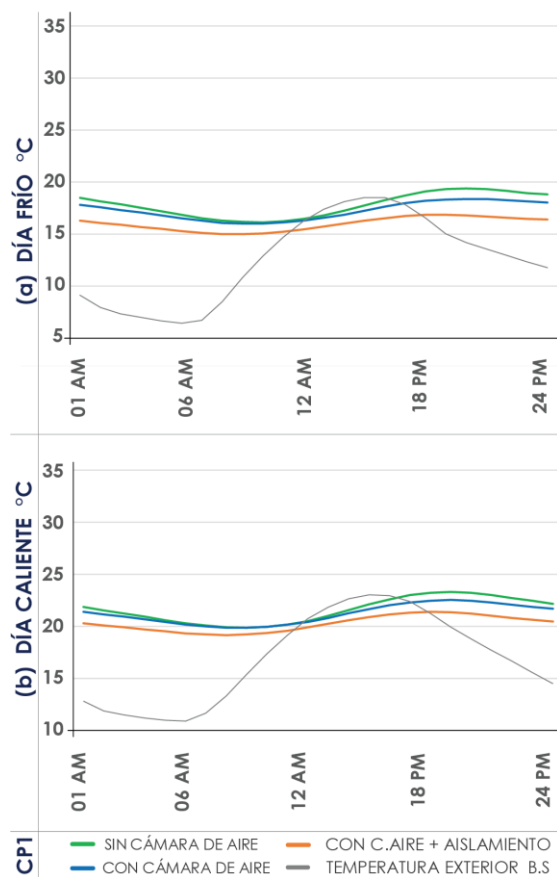


Figura 46: Tai CP1, Doble Capa y Aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de CP1 en su estado original, es decir solo con la chapa de hormigón y el bloque de pómez, en el día frío (Figura 46a), la Tai promedio alcanza los 17.8°, con una oscilación térmica que varía de 16.1 a 19.4°C, esto se debe a la masa y resistencia térmica que tiene incorporada el sistema constructivo. Pese a que la temperatura en la noche resulta baja, se debe considerar que las ganancias térmicas son producto únicamente de la cubierta. Algo muy similar sucede en el día caliente (Figura 46b) debido que presenta la misma oscilación alrededor de los 3.4°C, con una Tai de 21.6°C. Pese a no considerar

Una cámara de aire, el comportamiento térmico del sistema constructivo resulta deseado para el ambiente interior.

En cuanto a CP1 con Doble capa, la adición de una cámara de aire (Figura 46a) no modifica significativamente las condiciones de temperatura interior. En el día frío, se obtiene una Tai promedio de 17.2°C, con una oscilación que va de 16 a 18.4°C es decir muy similar cuando no se tiene doble capa. Lo mismo sucede en el día caliente (Figura 46b) la Tai varía tan solo 0.4°C con respecto a CP1 original. Además de una oscilación de 2.4°C. Dicho esto se determina que una CP1 no necesita una doble capa con el fin de mejorar las condiciones de temperatura interior debido que la Tai y oscilaciones no presentan mayor cambio.

Por último, en el caso de CP1 con Aislamiento. Al incorporar esta capa en el día frío (Figura 46a) se alcanza una Tai promedio de 16°C, con una oscilación térmica que va de 15 a 16.8°C es decir de 1.8°C. Lo que resulta ventajoso debido que se mantiene un rango estable. Sin embargo, la Tai promedio disminuye con respecto a la variable de Doble capa. Aunque la reducción es mínima, en horas críticas de la noche el uso de aislamiento no implica un cambio positivo en la Tai promedio. El mismo comportamiento se puede determinar en el día caliente (Figura 46b). Por lo que se determina que en la cubierta CP1 el aislamiento térmico no es necesario, debido que la Tai disminuye y las oscilaciones no presentan mayor cambio.

Cubierta pesada CP2

En la figura 46, se muestra los resultados de la tipología CP2 en su estado original y con la aplicación de doble capa y aislamiento en el día extremo, frío (a) y caliente (b).

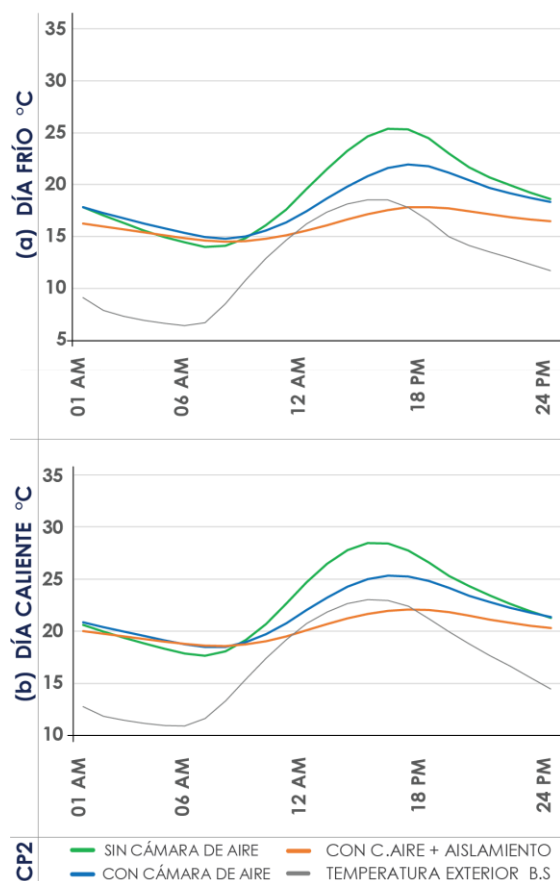


Figura 47: Tai CP2, Doble Capa y Aislamiento térmico.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de CP2 en su estado original, es decir solo con la chapa de hormigón y la placa colaborante, en el día frío (Figura 47a). La Tai promedio alcanza los 19.2°C, con una oscilación térmica que varía de 14 a 25.4°C. Lo cual resulta en una oscilación alta de 11.32°C, pero con una mayor deficiencia térmica en el periodo nocturno. Algo similar sucede en el día caliente (Figura 47b). La oscilación es alta, alrededor de los 11°C, y pese a mejorar la temperatura en horas de la noche, durante el día existe sobrecalentamiento.

En cuanto a CP2 con Doble capa, la adición de una cámara de aire permite que el espacio interior en el día frío (Figura 47a) alcance una Tai promedio de 18.2°C, con una menor oscilación que va de 14.8 a 21.9°C. Se observa que la Tai promedio disminuye con respecto a CP2 original. Sin embargo, la doble capa mejora la temperatura en horas de la noche, lo que podría ser ventajoso para el sistema constructivo. Una oscilación semejante se presenta en el día caliente (Figura 47b) alrededor de 7°C, que mejora las condiciones térmicas en el periodo nocturno. Sin embargo, durante el día podría sobrecalentar el ambiente interior. En ambos días de estudio (Figura 43a) y (Figura 43b). La Tai promedio no cambia significativamente. Sin embargo, en la noche mantiene mejores condiciones de temperatura interior al implementar una doble capa.

Por último, en el caso de CP2 con Aislamiento, al incorporar esta capa en el día frío (Figura 47a) se alcanza una Tai promedio de 16.1°C, con una oscilación térmica que va de 14.5 a 17.9°C. Lo que resulta en una oscilación térmica estable. No obstante, la Tai promedio y el rango en la que actúa la temperatura se mantiene bajo. Por lo tanto, el uso de esta estrategia no implica un incremento en la Tai. Por otra parte, en el día caliente (Figura 47b) se presenta una Tai de 20.3°C, que oscila de 18.6°C a 22.1°C.

Discusión general CL y CP

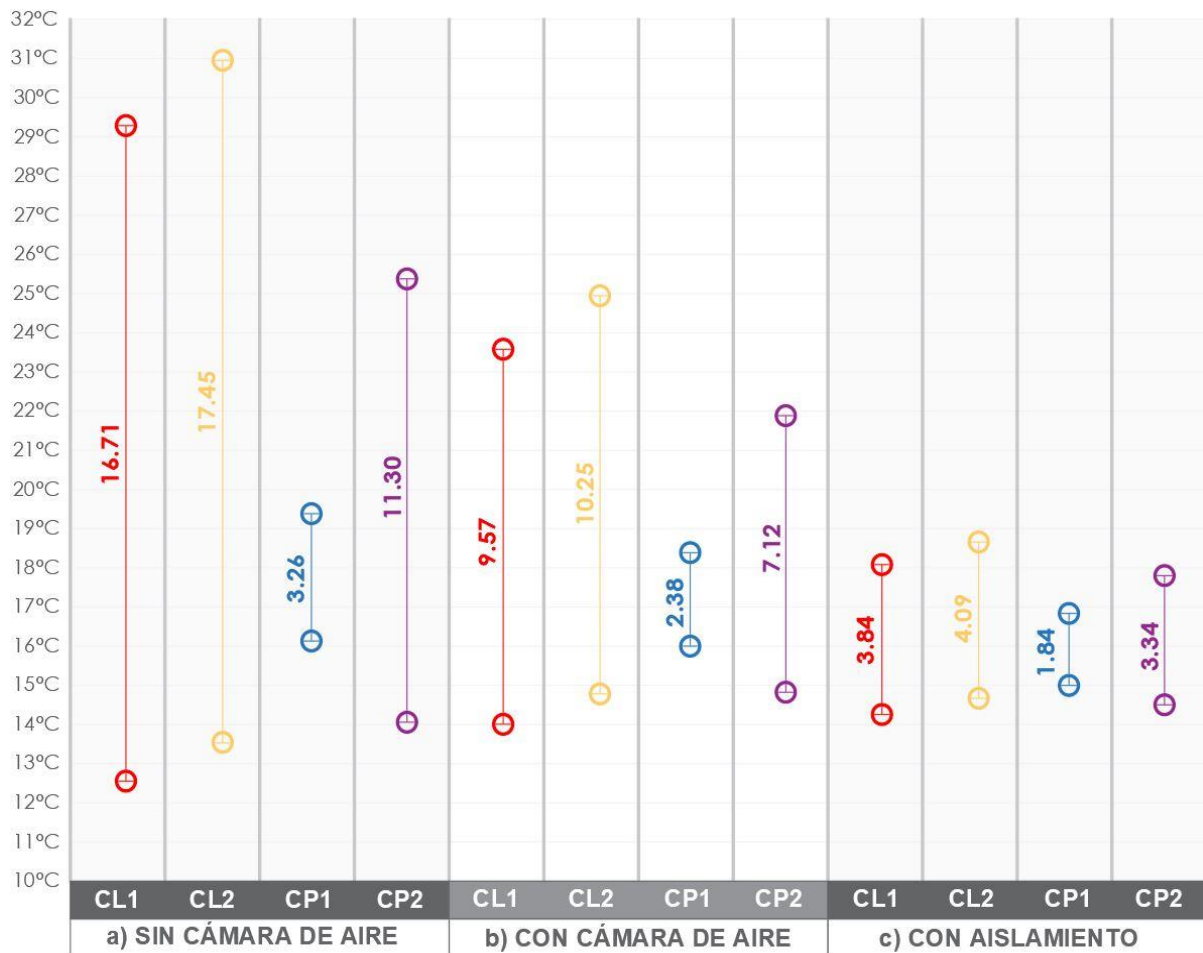


Figura 48: Oscilación Térmica interior CL y CP para las variables Doble capa y Aislamiento.

Fuente: Elaboración propia.

En este apartado se discutirá en función de las oscilaciones térmicas generales de cada una de las tipologías de cubiertas CL y CP, aplicada al sistema constructivo original y las variables Doble capa y Aislamiento (Figura 48).

El análisis de oscilaciones de temperatura se enfocará únicamente en el día extremo frío puesto que como se ha observado en los resultados previos de la investigación, las oscilaciones en ambos días extremos son muy similares.

En primer lugar, para el caso del sistema constructivo original, que no considera una cámara de aire, la cubierta CP1 es la que ofrece una menor oscilación térmica (3.3°C) y mantiene un Tai promedio de 17.8°C. Además, es importante recalcar que, al adicionar las cargas de equipos,

ocupación y radiación a través de la envolvente vertical, elevará significativamente la temperatura obtenida en todas las cubiertas. Al incorporar a CP1 una cámara de aire la oscilación disminuye a 2.4°C. Sin embargo, la temperatura en el periodo nocturno, se mantiene similar, lo que térmicamente no implica un cambio significativo para el sistema constructivo. El uso de aislamiento térmico en CP1 permite una oscilación de 1.8°C. sin embargo el rango de temperatura no se considera como un aporte significativo a la cubierta, por lo que no sería necesario utilizarlo en CP1.

Por tanto, de acuerdo a estos resultados CP1 es la tipología que muestra la Tai y las oscilaciones térmicas más adecuadas para el clima de Cuenca. Debido a la masa térmica incorporada en el sistema constructivo que permite regular de manera eficiente el flujo de calor, almacenarlo y desplazar la temperatura más baja a primeras horas de la mañana,

lo que resulta ventajoso en el caso habitacional.

Por otro lado, se observa que la tipología CL1 que no incorporó cámara de aire ya sea por alguna razón social, estética, económica, etc., presenta una oscilación demasiado elevada, que alcanza cerca de los 17°C, debido a la escasa masa térmica, lo que provoca que se gane mucha temperatura en el día y se pierda mucha temperatura en la noche. Por ende, no se debería valorar si un ambiente está en buenas condiciones térmicas simplemente analizando la *Tai* promedio, debido que CL1 tiene una *Tai* de 19.4°C, temperatura que se ubica dentro de un rango de confort, pero claramente se observa a través de la oscilación que las condiciones térmicas son desfavorables. Al adicionar una cámara de aire la oscilación disminuyó significativamente a 9.6°C, No obstante, el rango en el que actúa aún sigue siendo deficiente. El uso de aislamiento térmico regula de manera óptima al sistema constructivo CL1 pues se llega a una oscilación de 3.8°C en un rango aceptable, sin embargo, esta solución representa mayor inversión económica en toda la envolvente de la edificación.

Cuando no se considera una cámara de aire en el caso de CL2, al aplicar la masa térmica que aporta la teja, mejora las condiciones de temperatura en el periodo nocturno con respecto a CL1. Sin embargo, la oscilación es muy elevada (17.5°C) y sobrecalientan el interior durante el día. Al incorporar una doble capa a CL2, la resistencia del aire mejora la temperatura en el periodo nocturno y la oscilación disminuye a 10.3°C, pero la *Tai* aún sigue siendo muy elevada en el día. Al utilizar aislamiento térmico el sistema constructivo CL2 llegó a tener oscilaciones de temperatura de 4.1°C. Una vez analizado los resultados se puede determinar que la cubierta CL2 con cámara de aire representa una tipología constructiva de cubierta liviana que mejora las condiciones de temperatura interior en periodos nocturnos. No obstante, aún es deficiente durante el día cuando está expuesta a la máxima

radiación solar, que provoca sobrecalentamiento interior.

Por otra parte, se observa que la cubierta pesada CP2 que no incorporó cámara de aire tuvo oscilaciones térmicas de 11.3°C. Además, presenta mejores condiciones de temperatura en la noche con respecto a CL, pero durante el día aun resultan temperaturas elevadas. Sin embargo, al incorporar una cámara de aire la oscilación disminuye a 7.1°C y permite evitar un sobrecalentamiento en el periodo diurno. Por ende, el comportamiento térmico de una CP2 presenta mayores ventajas con respecto a una cubierta liviana pues el aporte de su masa térmica regula de mejor manera la *Tai*. En el caso de considerar aislamiento térmico la oscilación en CP2 alcanzó los 3.3°C.

Dicho esto, se determina que el uso de una doble capa y el aislamiento resulta beneficioso para CL1, CL2 y CP2. Por el contrario, el uso de estas estrategias en CP1 es prácticamente innecesario. Aun cuando las dos estrategias analizadas tienen un gran impacto en CL1, CL2 y CP2, en el caso de la doble capa no llegan a tener una oscilación dentro de los rangos de confort. Por otro lado, el uso del aislamiento regula significativamente la oscilación de estas cubiertas, pero representa un alto costo en la inversión económica.

A partir de esto, se ha seguido analizando otras estrategias enfocadas en las propiedades radiativas de las cubiertas, lo cual se analiza en el siguiente apartado.

3.1.2 Reflectividad

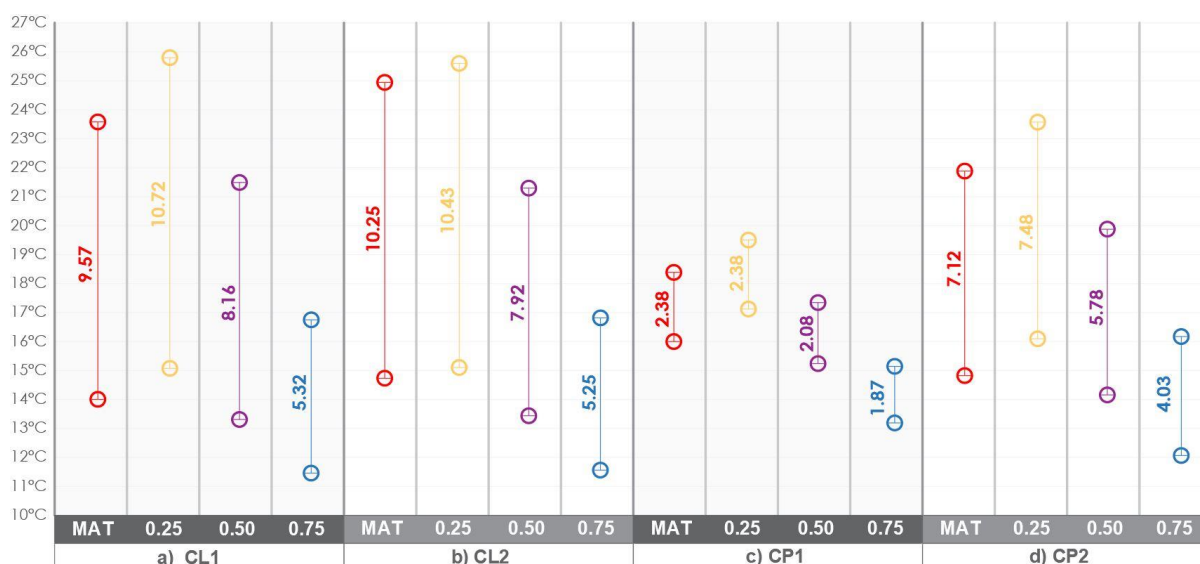


Figura 49: Oscilación Térmica interior CL y CP para la variable de reflectividad en el día frío.

Fuente: Elaboración propia

En la figura 49, se observa los datos específicos de las oscilaciones térmicas resultantes del flujo de calor utilizando la variable de REFLECTIVIDAD. La variable tendrá 3 variantes correspondientes a 0.25, 0.50 y 0.75, las mismas que se contrastan con la reflectividad original del material (MAT). Esta variable se aplicará solo para las cubiertas con cámara de aire dado que fueron las que tuvieron el mejor comportamiento en el análisis anterior. Las simulaciones se realizarán únicamente para el día extremo frío puesto que como se ha observado en los resultados previos de la investigación, las oscilaciones en ambos días extremos son muy similares.

Cubierta liviana CL1

En la figura 49a, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CL1 aplicado la reflectividad original del material (MAT) $r=0.40$, y con las variantes establecidas, simuladas para día extremo frío y considerando una emisividad constante de 0.90.

En el caso de utilizar una reflectividad de 0.25 la Tai aumenta 1.1°C en el periodo nocturno con respecto a MAT. No obstante, en el periodo diurno sobrecalienta el ambiente interior. Cuando

se aplica un reflectividad de 0.50 la oscilación disminuye 1.4°C con respecto a MAT y resulta ser el rango de temperatura que menos afecciones tiene, debido que pese a disminuir la Tai en la noche, evita el sobrecalentamiento en el día. Si nos vamos al otro extremo una reflectividad de 0.75, la oscilación disminuye significativamente con respecto al estado original, es decir cambia de 9.6 a 5.32°C. No obstante, la Tai disminuye significativamente y conduce a tener en la noche temperaturas demasiado bajas.

En síntesis, para este caso específico de CL1 se observa que a medida que la reflectividad sube, las oscilaciones térmicas se regulan, sin embargo, la temperatura interior disminuye.

Cubierta liviana CL2

En la figura 49b, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CL2 aplicado la reflectividad original del material (MAT) $r=0.31$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una emisividad constante de 0.90.

En el caso de utilizar una reflectividad de 0.25 la oscilación casi no presenta variación, pues con respecto a MAT solo aumenta 0.2°C. y que pese a mejorar ligeramente la temperatura en la noche, aun continua el sobrecalentamiento en el día. Al aplicar una reflectividad de 0.50, la

oscilación disminuye a 7.9°C y pese a disminuir la temperatura en el periodo nocturno, evita el sobrecalentamiento en el día. Al aplicar una reflectividad de 0.75 la oscilación se reduce 5°C con respecto al estado original. No obstante, la Tai disminuye y conduce a tener temperaturas demasiado bajas.

Al aplicar la estrategia se observa que reducir la reflectividad mejora los niveles de temperatura, sin embargo, si se opta por una reflectividad muy baja las oscilaciones y la Tai tienden a subir demasiado. Por ende, se podría considerar una reflectividad intermedia de 0.50 puesto que de esa manera se mejoran las condiciones térmicas internas de este sistema constructivo.

Lo que resulta interesante es que una cubierta CL2 una vez aplicada las variantes se comportan muy similar a CL1. Debido a las propiedades reflectivas de los materiales, pues una CL1 pese a tener menos masa térmica que una CL2, sus propiedades reflectivas permiten absorber menos energía térmica. Caso contrario sucede con CL2 pues absorbe más energía y la masa térmica permite conservarla por mayor tiempo.

Cubierta pesada CP1

En la figura 49c, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CP1 aplicado la reflectividad original del material (MAT) $r=0.40$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una emisividad constante de 0.90.

La cubierta pesada CP1 caracterizada con anterioridad como una solución constructiva óptima, para la ciudad de Cuenca. Al implementar una reflectividad de 0.25, se observa un cambio significativo en la Tai, debido que la oscilación se mantiene en 2.4°C durante el día y la temperatura se eleva eficientemente 1.2°C con respecto a MAT. Al aplicar reflectividades de 0.50 y 0.75 nuevamente las oscilaciones no varían significativamente, sin embargo, la Tai disminuye, lo que resulta negativo. Se puede determinar que mientras menor sea

la reflectividad en este sistema constructivo, se obtendrá mejores condiciones de temperatura interior sin afectar las oscilaciones térmicas en ambos periodos de análisis y sin llegar a una temperatura que cause malestar térmico. Por ende, en este sistema una reflectividad de 0.25 sería ideal.

Cubierta pesada CP2

En la figura 49d, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CP2 aplicado la reflectividad original del material (MAT) $r=0.40$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una emisividad constante de 0.90.

En la cubierta pesada CP2, al aplicar una reflectividad de 0.25 se observa que aumenta la Tai eficazmente en el periodo nocturno. Además, la oscilación térmica se mantiene en 7.5°C . No obstante, durante el día se podría tener sobrecalentamiento. Lo contrario sucede al implementar una reflectividad de 0.50 debido que disminuye la oscilación 1.3°C con respecto a MAT. Pese a que la Tai disminuye mínimamente es ventajoso por que no presenta sobrecalentamiento en el día. Al implementar una reflectividad de 0.75 no resulta beneficioso para el sistema constructivo, debido que la Tai disminuye pese a mejorar la oscilación.

En síntesis, con el fin de mejorar las condiciones térmicas interiores se recomienda utilizar una reflectividad intermedia de 0.50 pues de esta manera mejora la temperatura interior.

En general se pudo identificar que utilizar una reflectividad muy alta en la ciudad de Cuenca repercute en la calidad de la temperatura interior. Debido que disminuye significativamente la Tai. Caso contrario sucede al utilizar una reflectividad muy baja, pues la temperatura en el periodo diurno tiende a sobrecalentar las áreas internas, a excepción de CP1. Por lo tanto, en el caso de CL1, CL2 y CP2, una reflectividad intermedia de 0.50 trabajaría de manera óptima con el fin de mejorar las condiciones de temperatura interior.

3.1.3 Emisividad

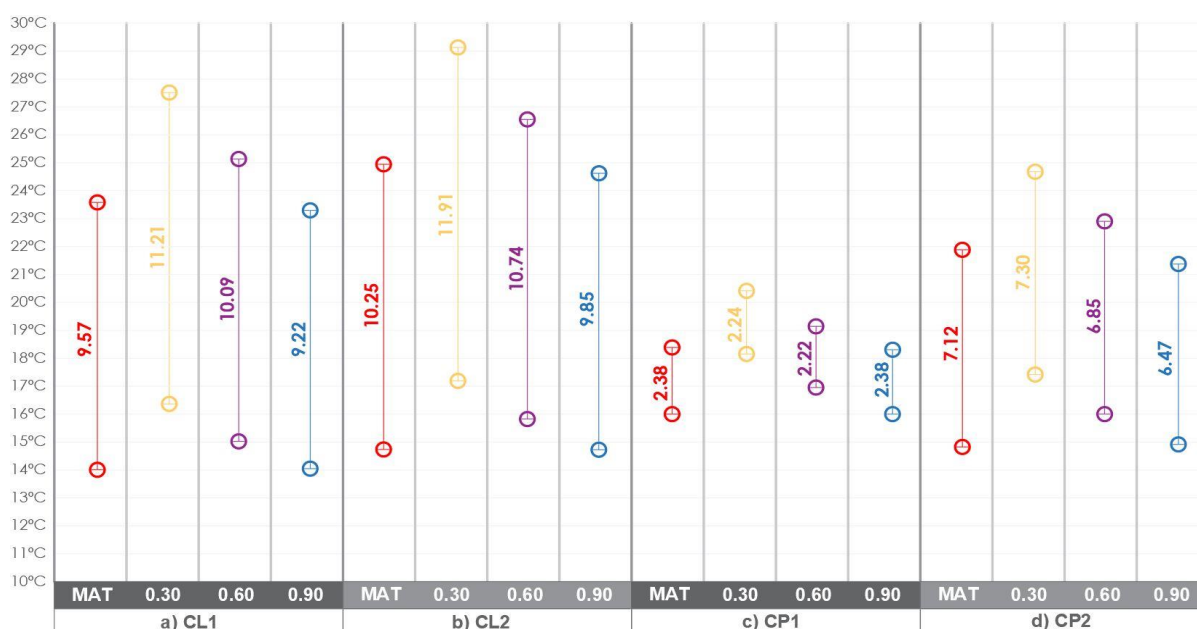


Figura 50: Oscilación Térmica interior CL y CP para la variable de emisividad en el día frío.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 50, se observa los datos específicos de las oscilaciones térmicas resultantes del flujo de calor aplicado la variable de EMISIVIDAD. La variable tendrá 3 variantes correspondientes a 0.30, 0.60 y 0.90, las mismas que se contrastan con la reflectividad original del material (MAT). Esta variable se aplicará solo para las cubiertas con cámara de aire dado que fueron las que tuvieron el mejor comportamiento en el análisis anterior.

Cubierta liviana CL1

En la figura 50a, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CL1 aplicado la emisividad original del material (MAT) $e = 90$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una reflectividad constante de 0.40.

Al aplicar una emisividad de 0.30 la oscilación térmica aumenta a 11.2°C es decir 1.6°C mayor que MAT. Además, la Tai se incrementa considerablemente y pese a mejorar la temperatura en el periodo nocturno, se sobrecalienta excesivamente durante el periodo diurno. A partir de esto, en el caso de utilizar emisividades de 0.60 y

0.90 la oscilación térmica no presenta variaciones significativas con respecto a MAT, al igual que la Tai. De este modo se deduce que una emisividad muy baja no es ventajoso para las condiciones internas, en el periodo diurno. Dicho esto, la emisividad original del material funciona adecuadamente bajo las condiciones de reflectividad original.

En este punto el profesional deberá valorar el parámetro de emisividad que necesite la edificación. Sin embargo, se puede deducir que para el caso específico CL1, una emisividad entre 0.30 y 0.60 sería ideal, porque mejora considerablemente la temperatura en el periodo nocturno. No obstante, se deberá combinar con una reflectividad diferente a la original con el fin de evitar el sobrecalentamiento.

Cubierta liviana CL2

En la figura 50b, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CL2 aplicado la emisividad original del material (MAT) $e = 90$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una reflectividad constante de 0.31.

Al aplicar una emisividad de 0.30 la oscilación térmica aumenta a 11.9°C es decir 1.7°C mayor que MAT. Además, la Tai se incrementa considerablemente y pese

a mejorar la temperatura en el periodo nocturno, se sobrecalienta excesivamente durante el periodo diurno. Al utilizar emisividades de 0.60 y 0.90 la oscilación térmica no presenta mayor variación con respecto a MAT, al igual que la Tai. De este modo se deduce que una emisividad muy baja no es ventajoso para las condiciones internas, en el periodo diurno. Dicho esto, la emisividad original del material funciona adecuadamente bajo las condiciones de reflectividad original.

Se puede determinar que para el caso específico de CL2, una emisividad entre 0.30 y 0.60 sería ideal, porque mejora considerablemente la temperatura en el periodo nocturno. No obstante, se deberá combinar con una reflectividad diferente a la original con el fin de evitar el sobrecalentamiento.

Cubierta pesada CP1

En la figura 50c, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CP1 aplicado la emisividad original del material (MAT) $\epsilon = 90$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día extremo frío y considerando una reflectividad constante de 0.40.

En el caso específico de CP1 al disminuir la emisividad se logra un aumento sustancial de la temperatura interna lo que beneficia significativamente al sistema constructivo. Una emisividad baja de 0.30 resulta optima pues mejora la temperatura interior en la noche, que con respecto al estado original la temperatura pasa de 16 a 18.1°C es decir una mejora de 2°C, e incluso mejorando la oscilación. En el caso de usar emisividades de 0.60 y 0.90 la Tai y la oscilación mejoran, pero no implica un cambio significativo para el sistema constructivo pues son bastantes similares al estado original.

Cubierta pesada CP2

En la figura 50d, se muestra los resultados de la oscilación térmica de la tipología CP2 aplicado la emisividad original del material (MAT) $\epsilon = 90$ y con las variantes establecidas, simuladas para el día

extremo frío y considerando una reflectividad constante de 0.40.

En la cubierta CP2 al disminuir la emisividad a 0.30, se logra un aumento sustancial de la temperatura interna con respecto al estado original, lo que beneficia significativamente al sistema constructivo en el periodo nocturno. No obstante, durante el día las áreas internas se sobrecalientan. En el caso de usar una emisividad de 0.60 la Tai mejora su temperatura 1.2°C en el periodo nocturno y evita el sobrecalentamiento durante el día. Al utilizar la emisividad de 0.90 no presenta ninguna variación pues coincide con la emisividad original del material.

Dicho esto, se puede comprobar que la aplicación de estas estrategias en las cubiertas pesadas son prometedoras en función de mejorar la temperatura interior sobretodo en el periodo nocturno, sin afectar significativamente las oscilaciones térmicas. No obstante, se debe poner cuidado a no elevar mucho la temperatura durante el día.

3.2 Resultados generales

Durante el desarrollo de la investigación, se determinó que, para todas las tipologías de cubiertas, excepto CP1, Una Doble capa mejora significativamente el sistema constructivo, pues la masa térmica del hormigón y la resistencia térmica del aire regula los flujos de calor actuantes. Por tanto, la investigación planteó a la cubierta Doble capa como objeto de estudio en una búsqueda de mejorar las condiciones internas con soluciones pasivas y que no resulten en una elevada inversión económica. La aplicación de variables como emisividad y reflectividad nos demostraron que se puede mejorar las condiciones de temperatura interior.

En este punto de la investigación se puede notar la importancia que juega el tratamiento de la superficie exterior de la envolvente. Pues al modificar las propiedades superficiales de un material conduce a optimizar los flujos de calor y a mejorar las condiciones de temperatura interior significativamente. Por tanto, Con el objetivo de mejorar la Tai de los sistemas

constructivos CL y CP. Se incorporó diferentes niveles de reflectividad y emisividad, Figura 51.

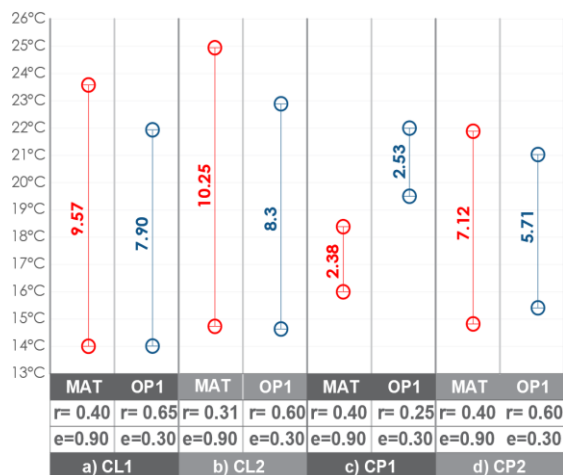


Figura 51: Oscilación Térmica interior CL y CP emisividad y reflectividad óptima, día frío.

Fuente: Elaboración propia.

Se había identificado dentro del marco teórico que, en climas cálidos, una reflectividad alta permite una absorción térmica menor, para evitar sobrecalentamiento interior. Sin embargo, se comprobó que, para las nuevas tendencias constructivas de cubiertas livianas, se debería aplicar la misma estrategia de reflectividad elevada en nuestras condiciones climáticas como medida mínima posible, con el fin de disminuir las oscilaciones de temperatura en respuesta a la escasa masa térmica incorporada en los sistemas constructivos. La baja masa térmica ha provocado que las propiedades radiativas se anulen o sus resultados son imperceptibles. Por otro lado, la emisividad nos demostró que al disminuirla se mejora los niveles de temperatura en el periodo nocturno sin afectar la oscilación. Esto corrobora los resultados de investigaciones analizadas para climas fríos que indican que una baja emisividad reduce la conductividad térmica y aumenta la resistencia térmica pues aplicar esta propiedad a un material optimiza la capacidad de retención de calor.

En el caso de la cubierta pesada CP1, figura 51c se puede determinar que sería en síntesis el método constructivo más idóneo para la ciudad de Cuenca, debido

que mantiene los mejores niveles de temperatura y oscilación térmica. Sin ser necesario el uso de aislamiento térmico. Todo esto gracias a la masa térmica incorporada. Para este sistema constructivo al incorporar mayor masa, una reflectividad baja de alrededor de 0.25 es muy ventajosa pues se aprovecha la energía térmica y se obtiene una mejora Tai. Acompañada de una emisividad baja alrededor de los 0.30 potencian positivamente al sistema constructivo.

En el caso de CL1 figura 51a y CL2 figura 51b debido a la poca masa térmica incorporada, se debe priorizar una reflectividad alta que este alrededor de 0.60 para evitar sobrecalentamiento en el periodo diurno y elevadas oscilaciones. Además, convendrá implementar una emisividad baja alrededor de 0.30 para retener la temperatura y no afectar al periodo nocturno. Por tanto, en función de las propiedades radiativas una cubierta liviana puede asemejar su comportamiento térmico a una cubierta pesada CP2.

Se puede evidenciar en la cubierta pesada CP2 figura 51d, que no resulta en un sistema constructivo óptimo en función de la temperatura interior, pues el uso de la placa colaborante disminuye significativamente la masa térmica con respecto a CP1 y asemeja más sus resultados a una cubierta liviana con teja. No obstante, una mejora en la Tai se presenta al elevar su reflectividad a 0.60 y disminuir su emisividad a 0.30.

La estrategia de aislamiento térmico también es prometedora ya que regula las oscilaciones y optimiza la temperatura interna. Si a esta se le sumase una baja emisividad superficial exterior del material podría elevar los niveles de temperatura a rangos de confort. Sin embargo, es una estrategia económicamente elevada, pues se debe incorporar a toda la envolvente.



4

CAPÍTULO

3. Conclusiones

La presente investigación ha centrado su análisis en mejorar las condiciones de temperatura interior resultante del flujo de calor de la cubierta, a través de la aplicación de variables sobre la envolvente horizontal en climas de la región Sierra específicamente la ciudad de Cuenca Ecuador.

El estudio se desarrolló mediante análisis digital térmico aplicado al modelo base que representa la tipología constructiva predominante en la ciudad, vivienda unifamiliar de 2 plantas, simulando únicamente la planta alta debido a su relación directa con la cubierta.

En la actualidad las estadísticas nos indican que en la ciudad de Cuenca la tendencia constructiva para cubiertas se ha inclinado a los sistemas livianos con poca masa térmica, específicamente al uso de cubiertas de fibrocemento ondulado, con el fin de optimizar tiempo de construcción, recursos económicos, peso estructural, mantenimiento, entre otros, sin embargo, ha repercutido en las condiciones de temperatura interior.

En función a lo expuesto el objetivo general de la investigación plantea Caracterizar el comportamiento del flujo de calor en las diferentes tipologías de cubiertas mayormente utilizadas en la ciudad de Cuenca, con el fin de saber si dicha caracterización térmica proporciona una evidencia para la correcta aplicación de acuerdo al uso requerido, de manera que se mejore las condiciones interiores térmicas.

Con el fin de alcanzar el objetivo general de la investigación se abordaron tres objetivos específicos, En primer lugar, identificar los sistemas constructivos predominantes en la construcción Cuencana. Posterior a ello determinar la temperatura interior resultante del flujo de calor para cada tipología, y finalmente Diferenciar los resultados obtenidos para establecer recomendaciones de aplicación.

La investigación pudo alcanzar los objetivos planteados mediante la aplicación de variables térmicas que actúan tanto en la composición del sistema constructivo como en modificar ciertos parámetros en la capa superficial exterior.

4.1 Conclusiones

La investigación pudo determinar lo siguiente.

Una cubierta CL1 que representa la tipología constructiva con mayor implementación en la construcción local, necesita obligatoriamente considerar una cámara de aire, debido que esta estrategia sería la mínima posible para no alcanzar niveles de oscilación térmica demasiado elevados. Sin embargo, esta estrategia no es suficiente para alcanzar una oscilación razonable. Por tanto, de acuerdo a este estudio se recomienda que esta tipología no se permita dentro de los sistemas constructivos locales, a menos que se considere el uso de aislamiento térmico y se apliquen ciertas penalidades.

Bajo este mismo sentido, la investigación determina que el uso de la teja es totalmente fundamental para incrementar la masa térmica, sin embargo, se debe aumentar obligatoriamente el índice de reflectividad del material.

El uso de aislamiento térmico, resulta prometedor en las tipologías de cubiertas CL1, CL2 y CP2 puesto que regula de manera óptima las oscilaciones de temperatura. No obstante, reduce la temperatura en horas críticas de la noche por lo que no resulta un cambio positivo para el sistema constructivo. A menos que se optimice la superficie exterior a través de una adecuada reflectividad y emisividad.

El uso de aislamiento térmico en la cubierta de hormigón aligerado CP1 es innecesario debido que su aplicación no resulta en un cambio positivo sobre la temperatura del ambiente interior.

Al Cambiar los parámetros térmicos superficiales exteriores de emisividad y reflectividad todas las tipologías constructivas mejoran significativamente la temperatura del ambiente interior.

Bajo los parámetros superficiales térmicos de reflectividad y emisividad originales que se están usando en el mercado local. Una cubierta liviana CL1 se comporta muy similar a una cubierta liviana CL2 y mediante una optimización de las propiedades radiativas, se podría llegar a simular su comportamiento a una cubierta pesada CP2.

Generalmente se cree que, para edificaciones emplazadas en climas fríos, los valores bajos de reflectividad resultan mejores con el fin de absorber mayor cantidad de calor. Sin embargo, para el caso específico de la cubierta liviana CL en la ciudad de Cuenca, no se está pensando en los altos niveles de radiación solar debido a la latitud ecuatorial y a las elevadas las oscilaciones de temperatura resultantes de estos sistemas constructivos livianos que no incorporan mayor masa térmica. Por lo tanto, una baja reflectividad sirve cuando hay masa térmica incorporada, pero resulta perjudicial cuando no la hay. Dicho esto, se concluye que en cubiertas livianas una alta reflectividad combinada con una baja emisividad, disminuye la oscilación térmica y mejora la Temperatura del ambiente interior. Por lo contrario, en el caso de cubiertas pesadas una baja reflectividad y baja emisividad, mejoran sustancialmente las condiciones de temperatura interior debido a su masa térmica que permite almacenar la temperatura y regular los flujos de calor.

En síntesis, esta investigación soporta que la cubierta con mejor desempeño térmico para las condiciones climáticas de la ciudad de Cuenca es la cubierta pesada de hormigón aligerado CP1 debido que presenta las mejores oscilaciones y rangos de temperatura actuante. El sistema constructivo CP1 se potencia aún más con la aplicación de las variables superficiales reflectividad y emisividad mejorando de manera positiva las condiciones de temperatura del ambiente interior.

Y en respuesta al objetivo general planteado se concluye que la Caracterización térmica de cubiertas, mediante el análisis de flujo de calor nos permite evidenciar la importancia de la masa térmica y las propiedades radiativas de la superficie exterior como fundamentales para establecer los criterios de aplicación, de manera que se mejore las condiciones interiores de temperatura en la ciudad de Cuenca.

4.2 Recomendaciones generales

Es importante considerar a criterio del profesional la aplicación de las estrategias pasivas de climatización, ya que se pudieran aplicar penalizaciones de acuerdo al uso horario del ambiente, por ejemplo en un caso que la planta arquitectónica tenga un programa netamente habitacional, la ocupación por lo general se da en horas de la noche y madrugada por ende se tratara de mejorar las condiciones térmicas de ese horario específico, incluso aun si en horas de la mañana se tuviera cierto discomfort. Caso contrario sería si el programa arquitectónico considera áreas de ocupación diurna, en ese caso se deberá valorar que índice sería óptimo aplicar. Estas consideraciones estarían implícitas cuando el factor económico no permita la aplicación de un sistema o estrategias más adecuadas.

En el caso de las cubiertas livianas CL1 Y CL2, No se recomienda utilizar el sistema constructivo sin la aplicación de una doble capa, debido que se pueden alcanzar picos de temperatura y oscilaciones muy elevadas. Al incorporar una cámara de aire y cielo raso, resulta beneficioso pues la resistencia térmica del aire y la masa térmica del Gypsum, mejora la Tai en horas críticas de la noche y permite menores oscilaciones.

La masa térmica resulta determinante para mejorar las condiciones de temperatura interior por lo que se recomienda a profesionales y constructores hacer uso de ella y evitar sistemas livianos en tendencia.

Se recomienda pintar las cubiertas de fibrocemento considerando los niveles de reflectividad dependiendo del uso del espacio y que temperatura se busca.

Se recomienda el uso de aislamiento térmico obligatorio si se tiene previsto un sistema de climatización activo.

Se debe recalcar que las temperaturas obtenidas en la presente investigación, son las resultantes netamente del flujo de calor obtenido de la cubierta mas no representa la temperatura operativa, en ese caso se debería considerar las ganancias y pérdidas de la envolvente vertical más el aporte de equipos y ocupación.

4.3 Futuras investigaciones

En futuros estudios es importante investigar como optimizar las materialidades locales para que cumplan con los parámetros establecidos de reflectividad en función de la temperatura requerida, en el caso del color terracota se deberá valorar el nivel de reflectividad y como ajustarlo sin alterar significativamente el color de manera que se adapte al panorama de la ciudad. Por otro lado, es necesario investigar como bajar la emisividad a los materiales locales mediante la aplicación de componentes metálicos. Como también sería importante estudiar sobre Tejas terracota bajo emisivas que implementen en sus pigmentos materialidades que bajen la emisividad y retengan el calor, de manera que no afecte el color ni el contraste de la ciudad. Adicional a ello se recomienda investigar el uso de las estrategias doble capa, emisividad y reflectividad aplicadas a la envolvente vertical.



REFERENCIAS

Referencias

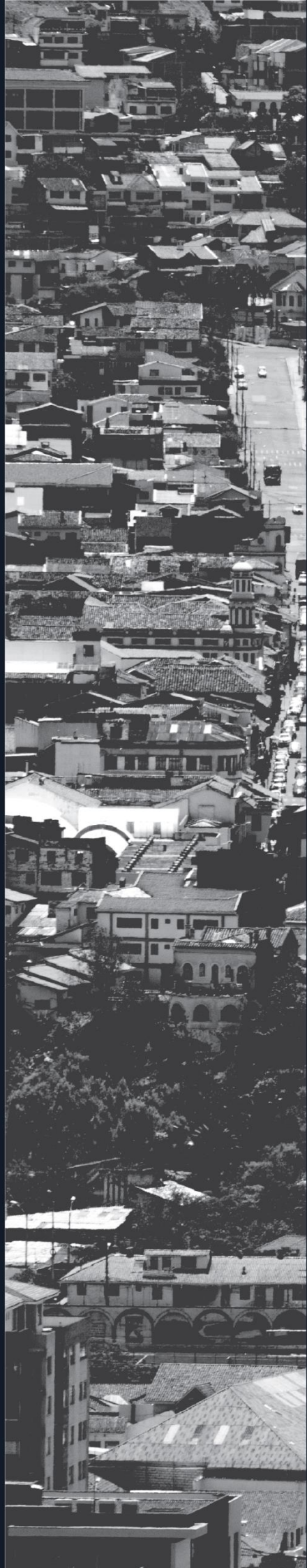
- Ackermann, M. (2013). *Cool Comfort: America's Romance with Air-Conditioning*. Washington, EE. UU.: Smithsonian Institution Press.
- Akbari, H. and Konopacki, S. (1998). The Impact of Reflectivity and Emissivity of Roofs on Building Cooling and Heating Energy Use, in *Proceedings of Thermal VII: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*, pp. 29–39.
- Akbari, H., Hdamon Mattherws, (2012) Global cooling updates: reflective roofs and pavements, *Energy Build*, 55 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.055>.
- Albatici, R., Passerini, F., Tonelli, A. M., & Gialanella, S. (2013). Evaluación del valor de la emisividad térmica de los materiales de construcción utilizando un emisómetro de técnica de termovisión infrarroja. *Construcción de energía*, 66, 33-40.
- Alchapar, N., & Correa, E. (2015). Reflectancia solar de las envolventes opacas de la ciudad y su efecto sobre las temperaturas urbanas. *Informes de la Construcción*, 67(540), e112-e112.
- Alchapar, N., Amono, M. S., Correa, E., Gaggino, R., and Positieri, M. (2020). Energy-efficient urban buildings . Thermo-physical characteristics of traditional and recycled roofing technologies *Sustentabilidad energética urbano-edilicia . Características*, 35, 73–83.
- Al-Tamimi, A. S., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Al-Osta, M. A., Ali, M. R., & Ahmad, A. (2020). Effect of insulation materials and cavity layout on heat transfer of concrete masonry hollow blocks. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119300>
- Antinucci, M., Asiain, D., Fleury, B., López, J., Maldonado, E., Santamouris, M., Tombazis, A., & Yannas, S. (1992). Passive and hybrid cooling of buildings: State of the art. *International Solar Energy Society. International Journal of Solar Energy*, 11(3), 251.
- ARCH-Azuay, & Centrosur. Base de datos (2017). Cuenca, Ecuador.
- Balaras, C. A., Droutsas, K., Argiriou, A. A., & Asimakopoulos, D. N. (2000). Potencial para la conservación de energía en edificios de apartamentos. *Energía y Edificios*, 31(2), 143-154.
- Bennett, J. (2016). Global ecological crisis: Structural violence and the tyranny of small decisions. En S. Brunnengräber, S. Lederer, & H. Özkaynak (Eds.), *Addressing Global Environmental Challenges from a Peace Ecology Perspective* (pp. 55-75). *The Anthropocene: Politik—Economics—Society—Science Series*, Vol. 4. Springer
- Berdahl, P. and Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials, *Energy and Buildings*, 25, pp. 149–158. [http://10.0.3.248/S0378-7788\(96\)01004-3](http://10.0.3.248/S0378-7788(96)01004-3).
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F. and Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Danvers: John Wiley & sons.
- Brown, L. R., Flavin, C., & French, H. F. (2000). Report on State of the World at the Threshold of New Millennium. KiW, Warsaw.
- Bustamante Parra, D. M. (2014). La profundidad de la envolvente (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

- Calzada, J. R., Antonio, R., Paredes, V., y Matías, L. (2014). Uso Eficiente De Programas Informáticos En Arquitectura: Designbuilder Y Dialux, 117–125.
- Castilla, M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2010). Técnicas de control del confort en edificios. In *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* (Vol. 7, Issue 3, pp. 5–24). Elsevier Doyma. <https://doi.org/10.4995/RIAI.2010.03.01>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582-1591.
- Cheung, C. K., Fuller, R. J., & Luther, M. B. (2005). Diseño de envolvente energéticamente eficiente para apartamentos de gran altura. *Energía y Edificios*, 37(1), 37-48.
- Conesa, J. A. (2013). Mecanismos de transferencia de calor. 1. Experimentación En Ingeniería Química I., 1–23.
- Cuerdo, T., and National, S. (2021). La simulación energética como herramienta de predicción, normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes Autor: María Teresa Cuerdo Vilches, (June 2009).
- Díaz Vicente, M. Á. (2015). *Estimación de potenciales ahorros energéticos y beneficios medioambientales para España derivados del uso de control de radiación ("cool roofs") en los tejados de viviendas*. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=54614>
- ESED (2022). INEC, Estadística de edificaciones recuperado de https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizTBiYWVhMDYtNzk5S00MTiOLThjZTctOTFiZGJhNDIzMwA4IiwidCI6ImYxNThhMmU4LWNhZWMtNDQwNiIiMGFiLWY1ZTI1OWJkYTEyXmIj9_ fecha de acceso: 3 de abril de 2023.
- Feathers, J., Johnson, J., y Kembel, S. (2008). Luminescence dating of monumental stone architecture at Chavín de Huántar, Perú. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 15(3), 266-296.
- GAD Municipal del Canton Cuenca. (2022). Plan Uso Y Gestión Del Suelo (Pugs), 200–285. Retrieved from <https://www.cuenca.gob.ec/content/pdot-pugs-2022>
- González Vásquez, M. R., and Molina-Prieto, L. F. (2018). Envolvente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad. *Arkitekturax Visión FUA*, 1(1), 49–61. <https://doi.org/10.29097/26191709.201>
- HB Cheikh, A. Bouchair (2008) Estudios experimentales de un techo de enfriamiento pasivo en zonas cálidas y áridas *El Open Fuels Energy Sci. J.* , 1 (1) DOI: 10.2174/1876973X00801010001
- Jamieson, R. W. (2003). De Tomebamba a Cuenca Arquitectura y arqueología colonial Traducción: Ion Youman, 306.
- Janda, K. (2011). Buildings don't use energy: people do. *Architectural Science Review*, 54(1), 15-22.
- Jelle, B. P., Kalnæs, S. E., and Gao, T. (2015). Low-emissivity materials for building applications: A state-of-the-art review and future research perspectives. *Energy and Buildings*, 96(7491), 329–356. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.024>

- Kantner, J. (2000). Realism vs. reality: creating virtual reconstructions of prehistoric architecture. *BAR International Series*, 843, 47-52.
- Levinson, R., & Akbari, H. (2010). Potential benefits of cool roofs on commercial buildings: conserving energy, saving money, and reducing emission of greenhouse gases and air pollutants. *Energy Efficiency*, 3(1), 53-109. <http://doi.org/10.1007/s12053-008-9038-2>
- Lira-oliver, A. (2017). Radiación solar invisible y arquitectura Invisible Solar Radiation and Architecture. *Bitacora de Arquitectura*, 35, 116-124.
- Liu, K. K. Y. (2006). Techos verdes, reflectantes y fotovoltaicos. *Construcción Canadá*, 48(5), 44.
- Mario Chavez, Aaron Martinez, Arturo Cisneros, Lizeth Rodriguez, Cristina Vidal, J. M. (2015). Investigación Experimental del Comportamiento Térmico de Sistemas Constructivos para Cubierta. (T. G. UCA, Ed.) (Primera ed). El Salvador.
- Maristany, A. (2017). CALOR, ENVOLVENTES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA CALOR, ENVOLVENTES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA Instalaciones 2B. <https://scullymariana.myportfolio.com/>
- 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>
- Mendoza Catalina, 2016. Arquitectura Vernácula Mexicana, <https://docplayer.es/5405203-Arquitectura-vernacula-mexicana.html>
- MIDUVI. (2011a). Eficiencia energética en la construcción en Ecuador, 51. Recuperado de <https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-13-eficienciaenerg3a9tica-en-la-construccic3b3n-en-ecuador-021412.pdf>
- MIDUVI. (2018). Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales NEC-HS-EE, 40. Retrieved from <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-HS-EE-Final.pdf>
- Mohan Rawat, R.N Singh, 2022, A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions Energy and Built Environment, Volume 3, Issue 3, Pages 327-347, ISSN 2666-1233, <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2021.03.001>.
- N. L. Escalón Alchapar, E. C. C. y G. L. (2011). REFLECTIVIDAD SOLAR DE REVESTIMIENTOS HORIZONTALES EN LA ENVOLVENTE URBANA Y SU CAPACIDAD PARA MITIGAR LA ISLA DE CALOR., 28, 37-46.
- Papadopoulos, A. M. (2005). Estado del arte en materiales de aislamiento térmico y objetivos para futuros desarrollos. *Energía y Edificios*, 37(1), 77-86.
- Peng, Y., Cheng Lie, J., Xiao, X., Jin, W., Zhou, J., Yang, Y., ... Cui, Y. (2023). Colorful low-emissivity paints for space heating and cooling energy savings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, 2017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1073/pnas.2300856120>.
- Peng, Y., Fan, L., Jin, W., Ye, Y., Huang, Z., Zhai, S., ... Cui, Y. (2022). Coloured low-emissivity films for building envelopes for year-round energy savings. *Nature Sustainability*, 5(4), 339-347. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00836-x>
- Portilla, F. (2018). Agroclimatología del Ecuador. Editorial Universitaria Abya-Yala. 14-40

- Principi, P., & Fioretti, R. (2012). Análisis térmico de la aplicación de PCM y baja revestimiento emisivo en ladrillos huecos. *Energy Build.*, 51, 131-142
- Quezada Vanegas, K. C. (2019). Evaluación térmica de cerramiento vertical para mejorar el confort de una vivienda de interés social en clima de alta montaña – caso de estudio Cajas. Universidad de Cuenca.
- Ray, S. D. (2010). *Energy saving potential of various roof technologies. Mechanical Engineering.* Massachusetts Institute of Technology.
- RIMA, 2012. Evaluación de emitancia térmica de revestimientos para uso como revestimientos de control de radiación interior. Recuperado de <http://www.rimainternational.org/index.php/technical/ircc/> (Consultado el 25 de junio de 2023).
- Robledo-Fava, R., Hernández-Luna, MC, Fernández-de-Córdoba, P., Michinel, H., Zaragoza, S., Castillo-Guzman, A., & Selvas-Aguilar, R. (2019). Análisis de la Influencia de Parámetros Humanos Subjetivos en el Cálculo del Confort Térmico y Consumo Energético de Edificios. *Energías*, 12 (8), 1531. MDPI AG. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.3390/en12081531>
- Sadineni, S. B., Madala, S., and Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Sanjay, M., & Prabha Chand. (2008). Técnicas de enfriamiento pasivo de edificios: pasado y presente: una revisión. *ARISER*, 4(1), 37-46.
- Schreiber, H., Jandaghian, Z., and Baskaran, B. (2021). Energy performance of residential roofs in Canada – Identification of missing links for future research opportunities. *Energy and Buildings*, 251, 111382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111382>
- Sociedad, U. Y., Lisbeth Castillo Quimis, E., América Mite Pezo, J., José Pérez Arévalo, J., Quimis, C., Pezo, M., & Arévalo, P. (2019). *INFLUENCIA DE LOS MATERIALES* Universidad de Guayaquil. Ecuador.
- Sociedad, U. Y., Pascual, C., Correa Álvarez, F., Dargel González González, E., Grey, M. J., Alemán, P., Álvarez, C., & González, G. (2016). Volumen 8 | Número 2 | Mayo-Agosto. <http://rus.ucf.edu.cu/>
- Torres Quezada Jefferson- Torres Avilés Ana. (2023). Green Energy and Technology Energetic Characterization of Building Evolution A Multi-perspective Evaluation in the Andean Region of Ecuador. (J. E. Torres-Quezada, Ed.). Cuenca, Ecuador: Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-21598-8>
- Torres Quezada, J. (2018, November 7). Comportamiento térmico de la cubierta en un clima cálido húmedo: repercusión energética en el edificio (Tesis doctoral). UPC, Departament de Tecnologia de l'Arquitectura. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2117/125312>
- Torres Quezada, J., Coch, H., & Isalgué, A. (2019). Assessment of the reflectivity and emissivity impact on light metal roofs thermal behaviour, in warm and humid climate. *Energy and Buildings*, 188, 200-208.

- Uemoto, K. L., Sato, N. M. N., and John, V. M. (2010). Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 42(1), 17–22. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.026>
- USG LATM, 2018, 06 de julio, Capítulo 1 Arquitectura y Clima, Video, <https://www.youtube.com/watch?v=Ml1vAoe--CU>
- Zalamea, E., and Barragán-Escandón, A. (2020). Revisión conjunta de fuentes primordiales para autoabastecimiento energético urbano e incidencia solar como principal fuente, en contexto de ciudad ecuatorial-andina. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 12(1), 21. <https://doi.org/10.18272/aci.v12i1.1580>
- Zingre, K. T., Yang, E. H., and Wan, M. P. (2017). Dynamic thermal performance of inclined double-skin roof: Modeling and experimental investigation. *Energy*, 133, 900–912. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.18>



ANEXOS

Anexos

Materialidad original CL y CP

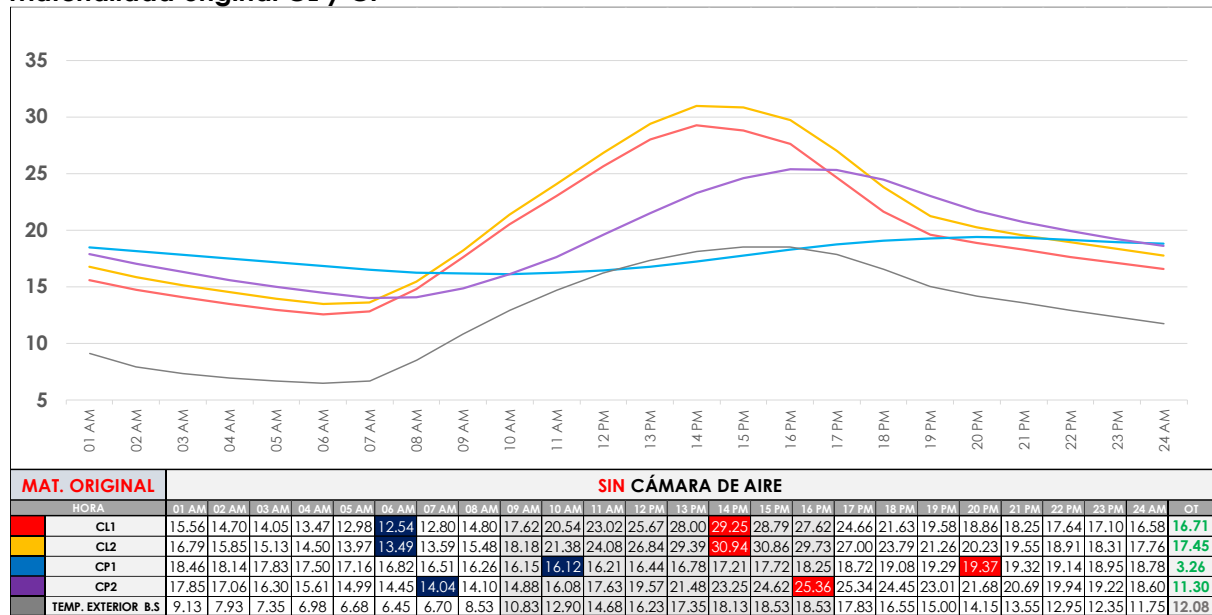


Figura 52: Temperatura del ambiente interior, MAT original, día frío cubierto CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

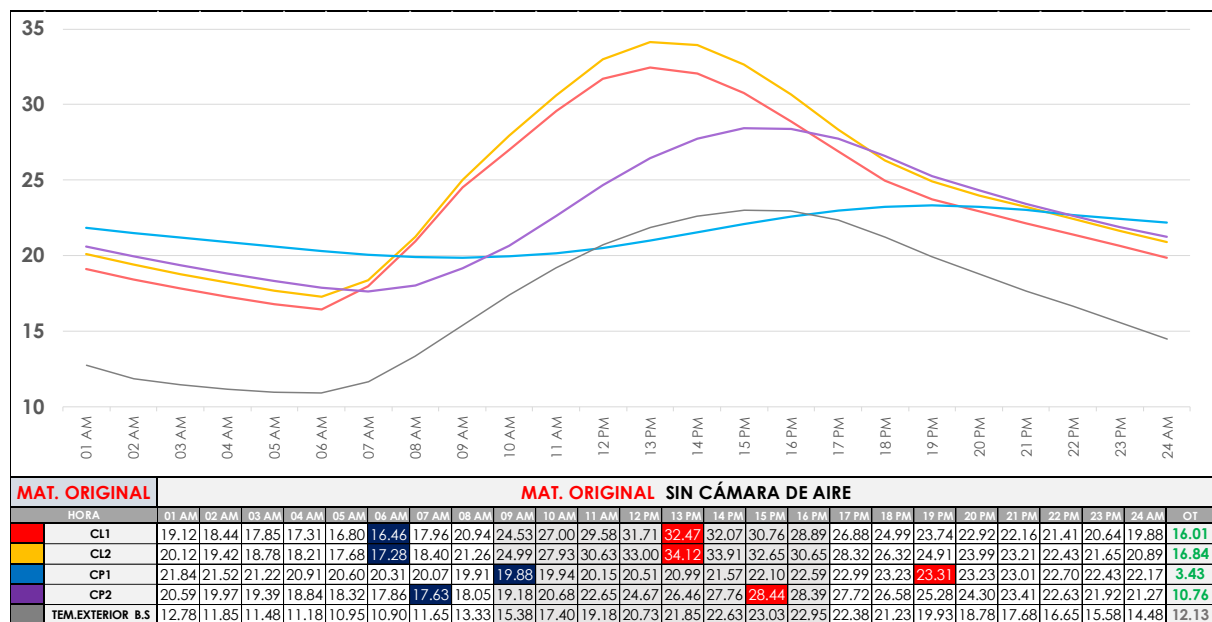


Figura 53: Temperatura del ambiente interior, MAT original, día caliente cubierto CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

Doble capa CL y CP

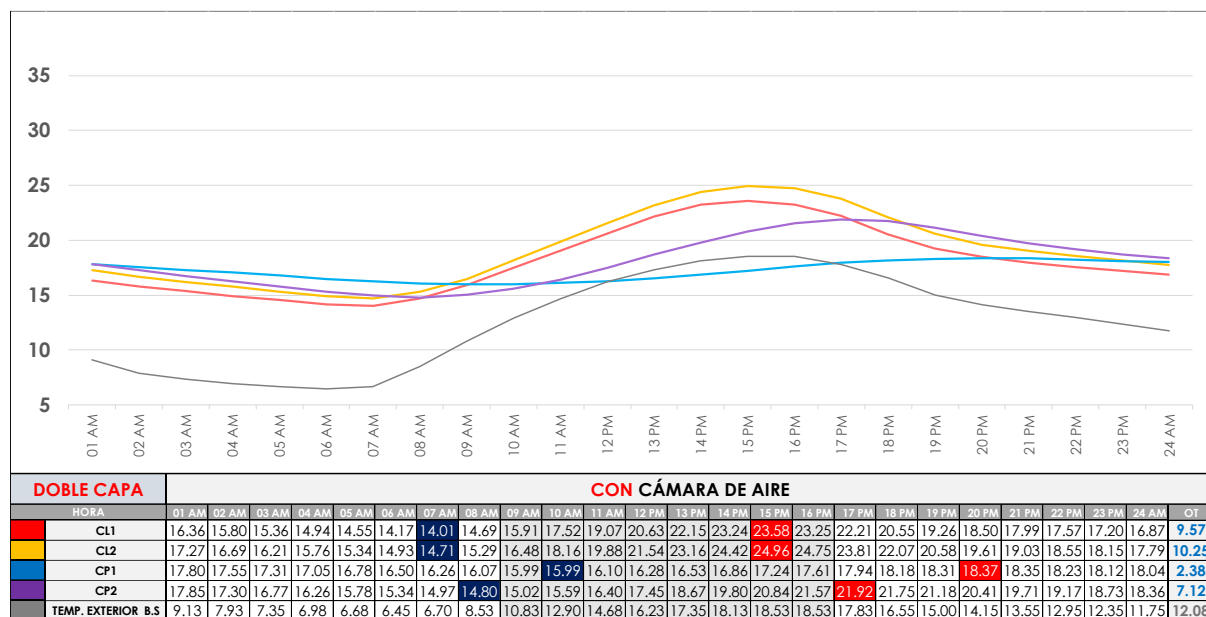


Figura 54: Temperatura del ambiente interior, Doble capa, día frío cubierta CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

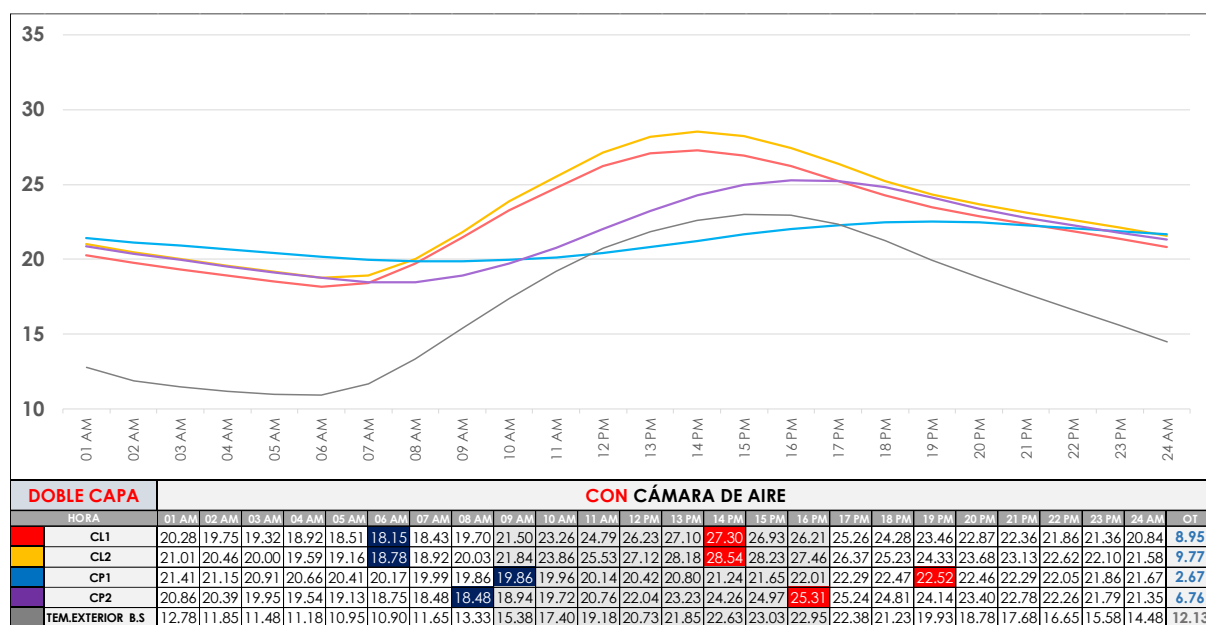


Figura 55: Temperatura del ambiente interior, Doble capa, día caliente cubierta CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

Aislamiento CL y CP

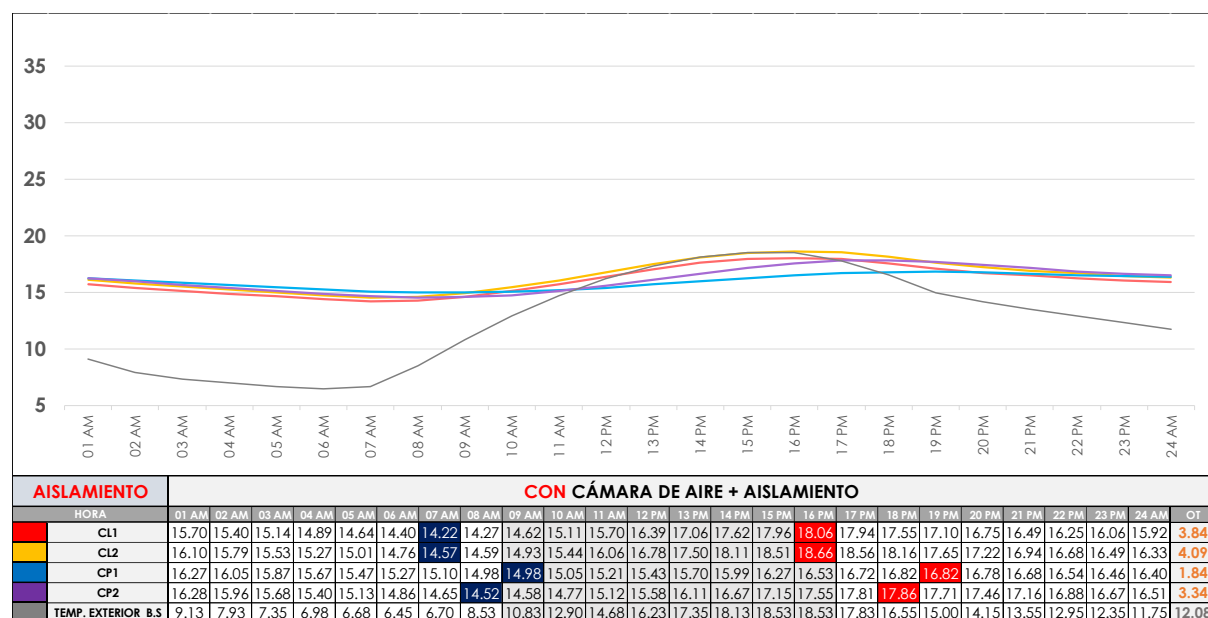


Figura 56: Temperatura del ambiente interior, Aislamiento, día frío cubierta CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

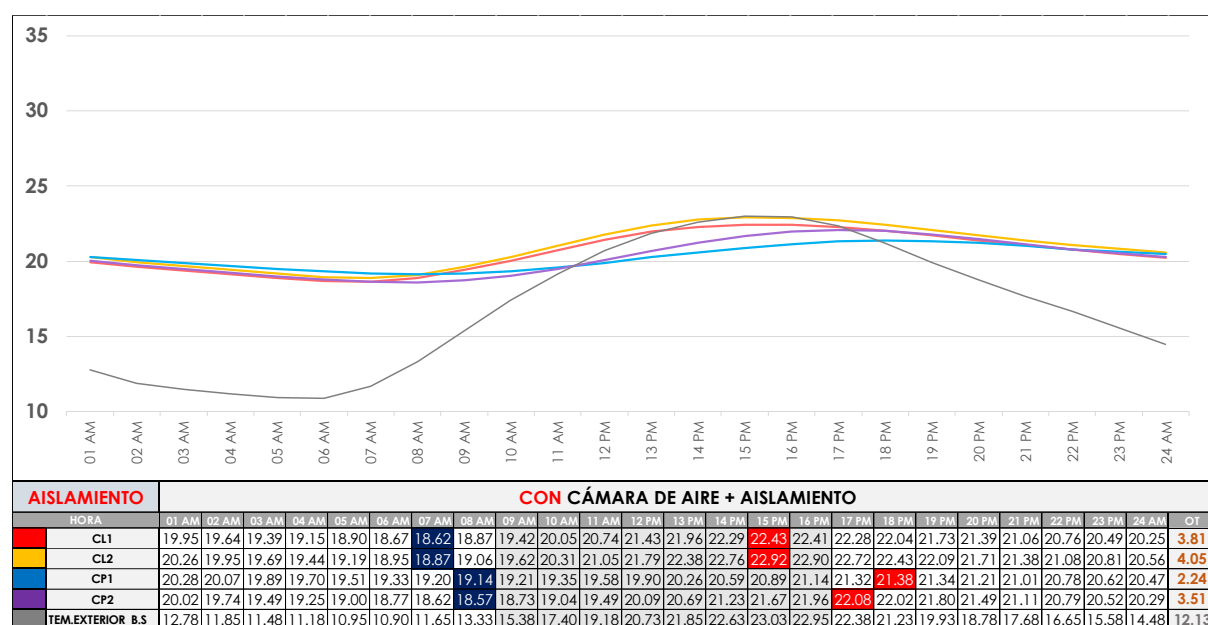


Figura 57: Temperatura del ambiente interior, Aislamiento, día caliente cubierta CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

Reflectividad CL1

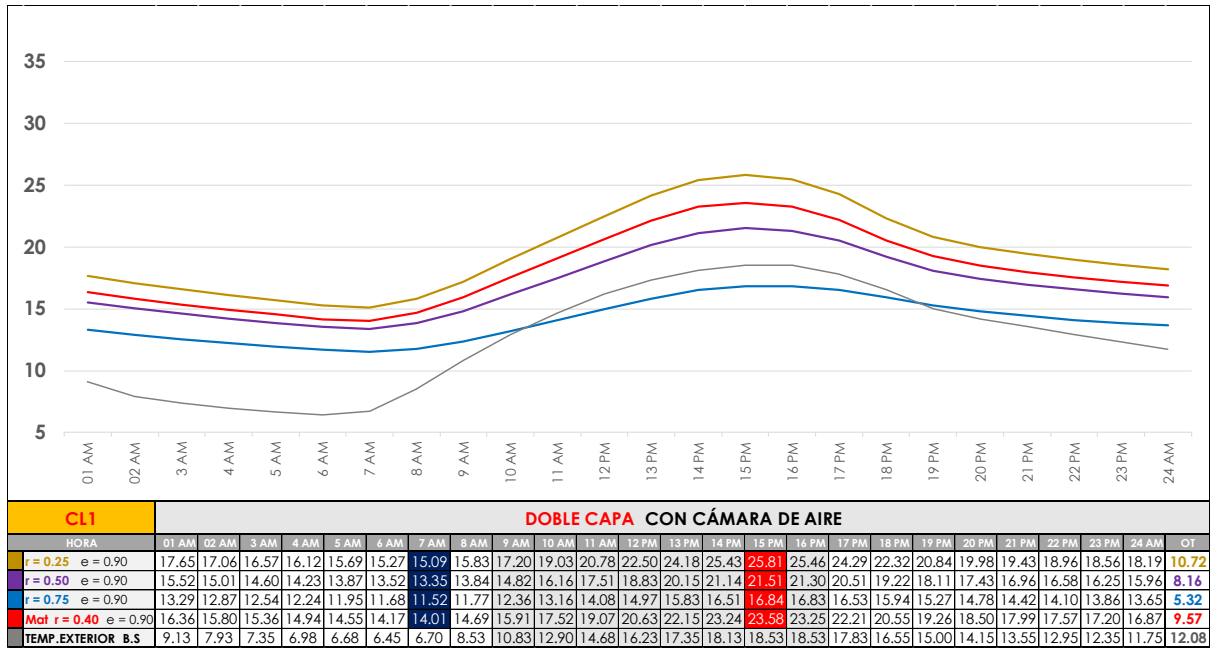


Figura 58: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CL1.

Fuente: Elaboración propia.

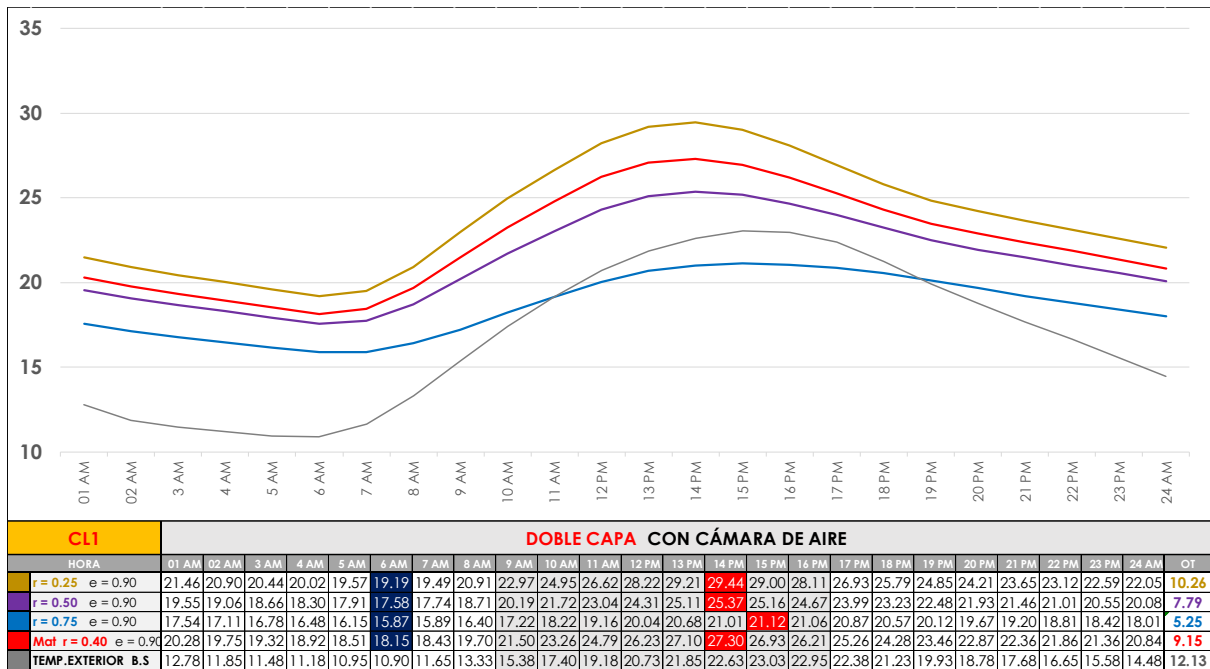


Figura 59: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CL1.

Fuente: Elaboración propia.

Reflectividad CL2

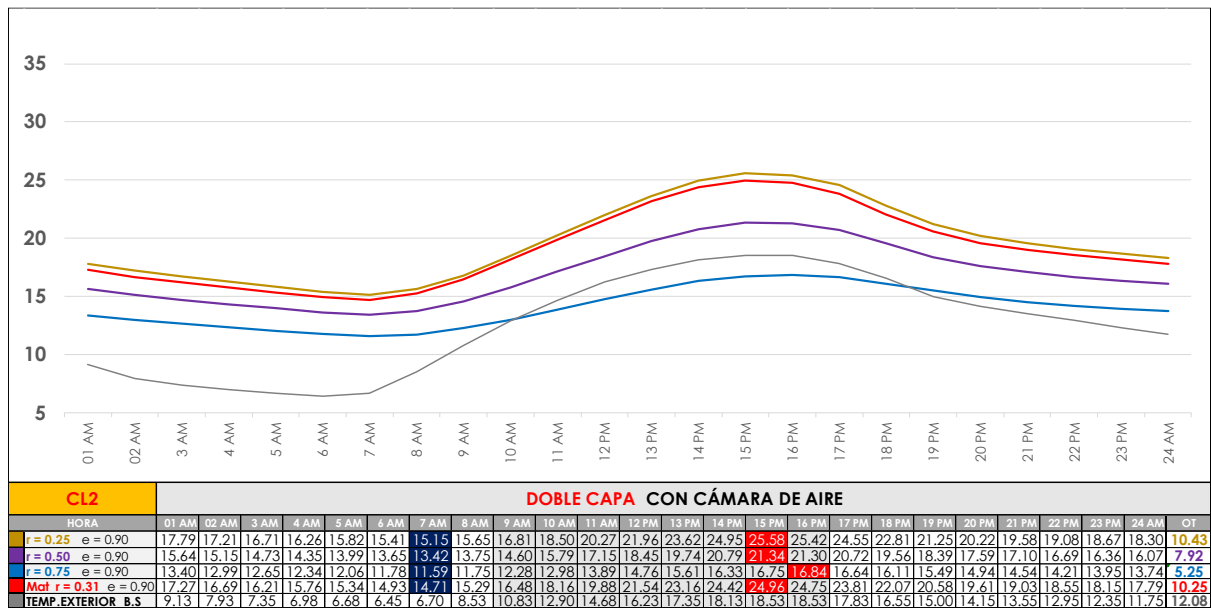


Figura 60: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CL2.

Fuente: Elaboración propia.

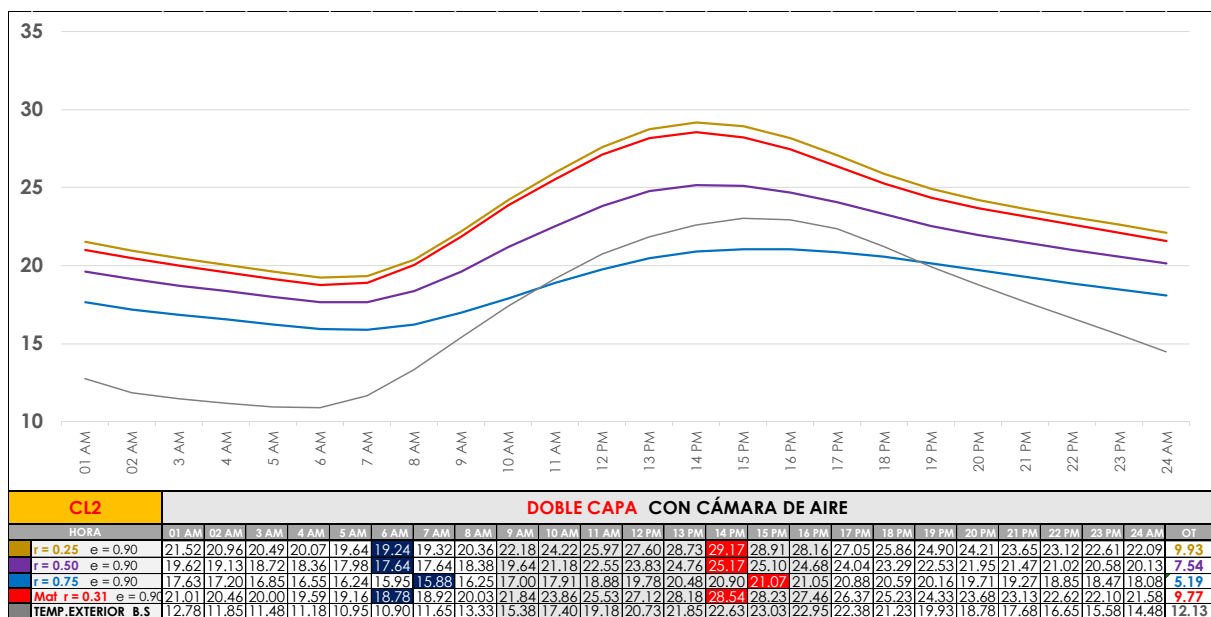


Figura 61: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CL2.

Fuente: Elaboración propia.

Reflectividad CP1

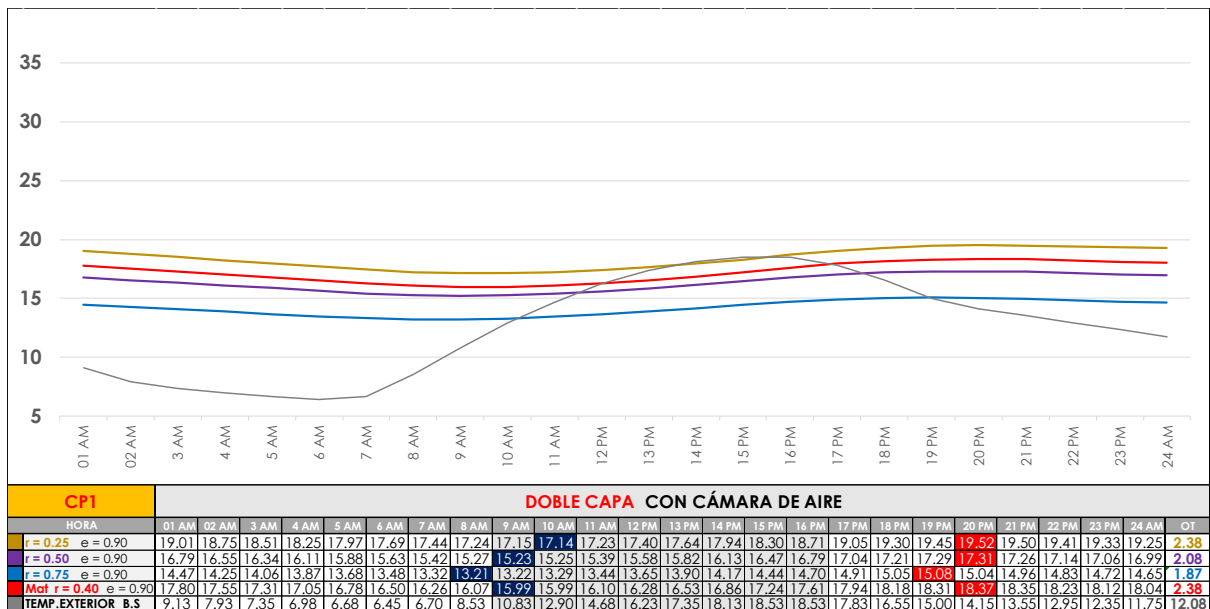


Figura 62: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CP1.

Fuente: Elaboración propia.

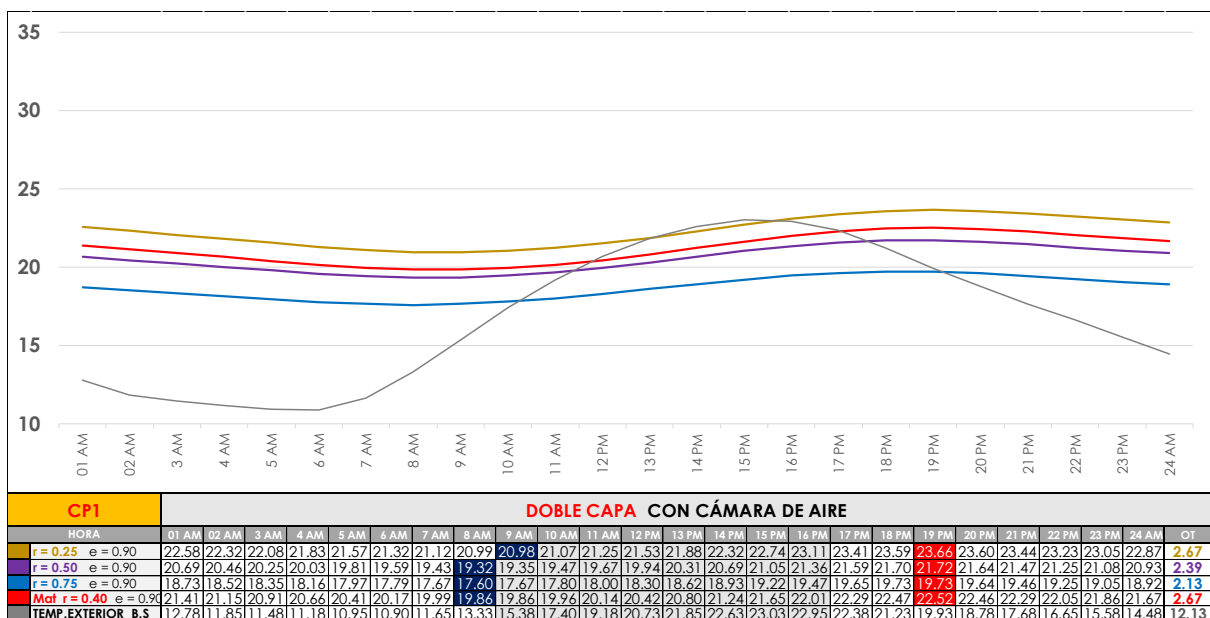


Figura 63: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CP1.

Fuente: Elaboración propia.

Reflectividad CP2

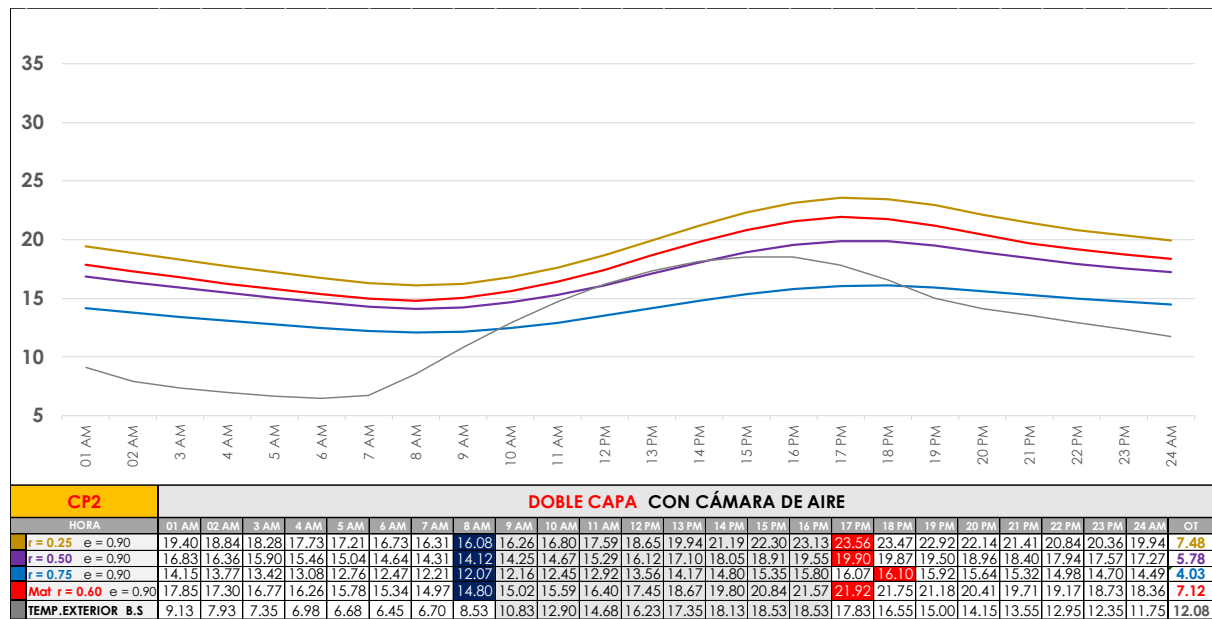


Figura 64: Temperatura del ambiente interior, día frío, Reflectividad CP2.

Fuente: Elaboración propia.

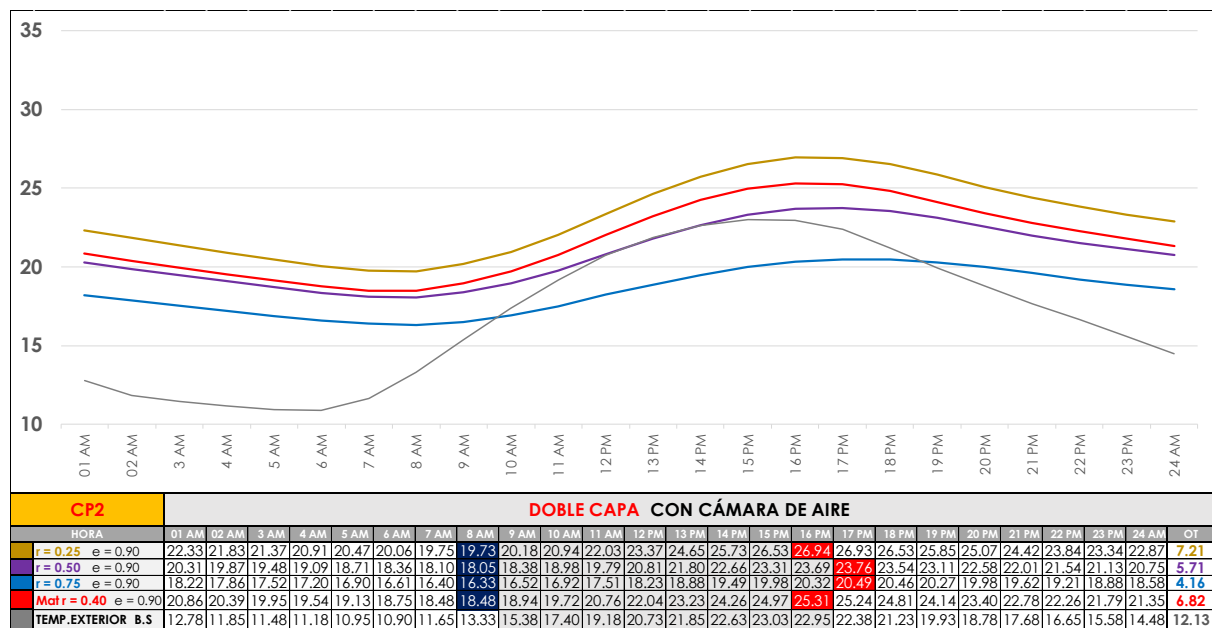


Figura 65: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Reflectividad CP2.

Fuente: Elaboración propia.

Emisividad CL1

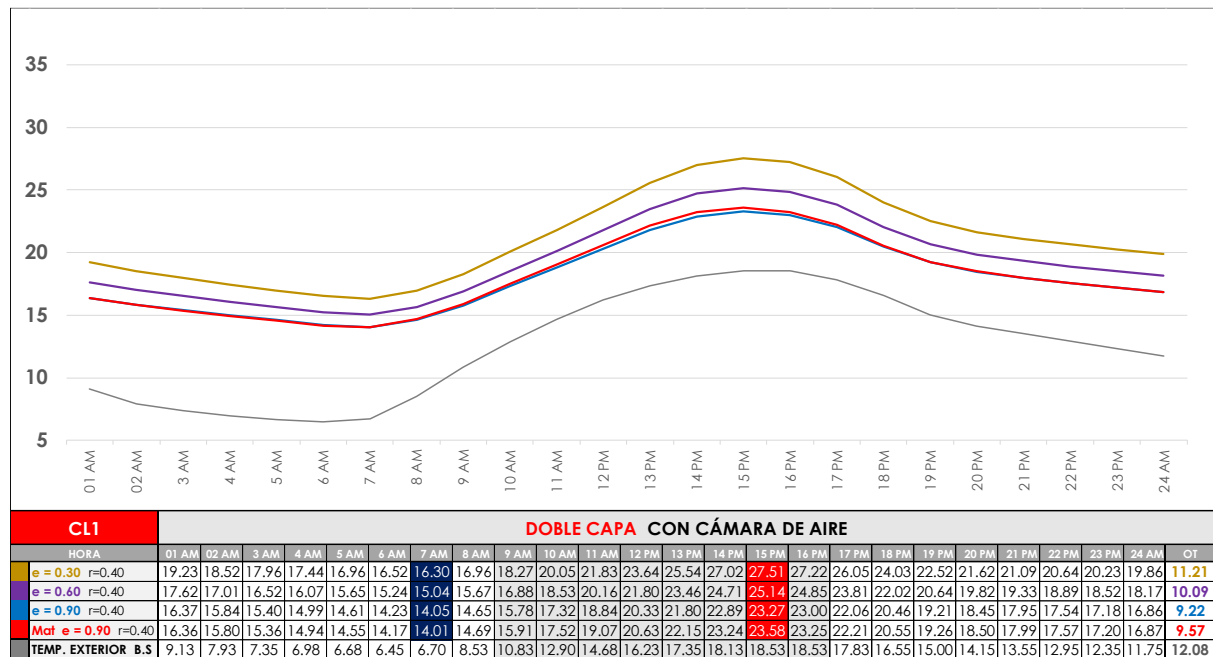


Figura 66: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CL1.

Fuente: Elaboración propia.

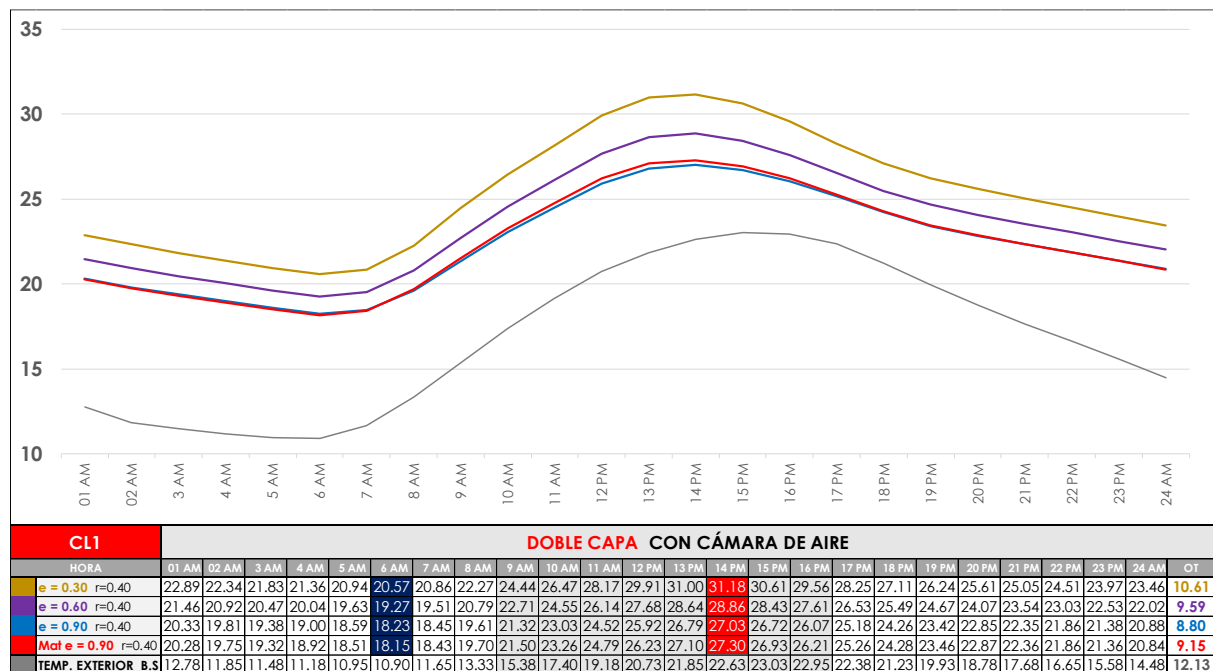


Figura 67: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CL1.

Fuente: Elaboración propia.

Emisividad CL2

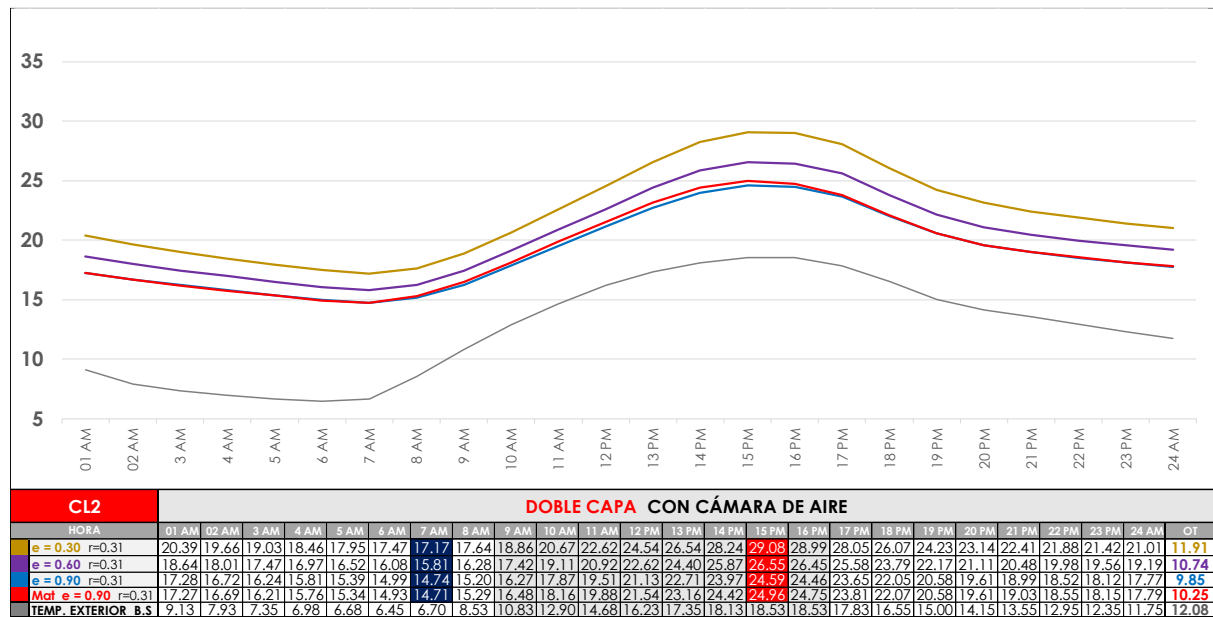


Figura 68: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CL2.

Fuente: Elaboración propia.

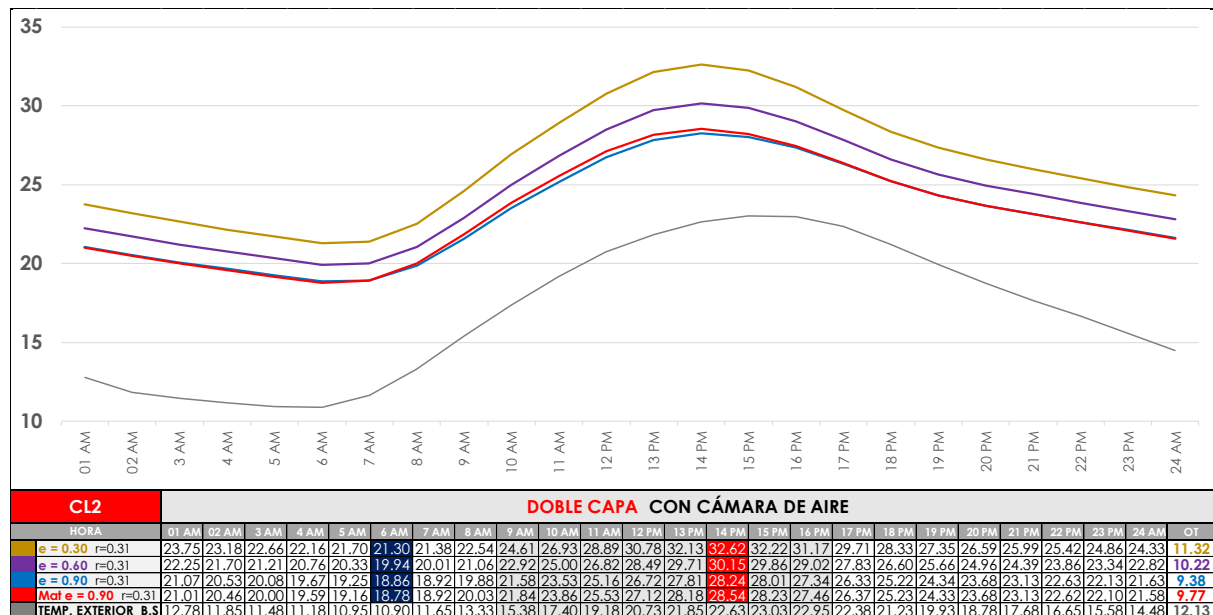


Figura 69: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CL2.

Fuente: Elaboración propia.

Emisividad CP1

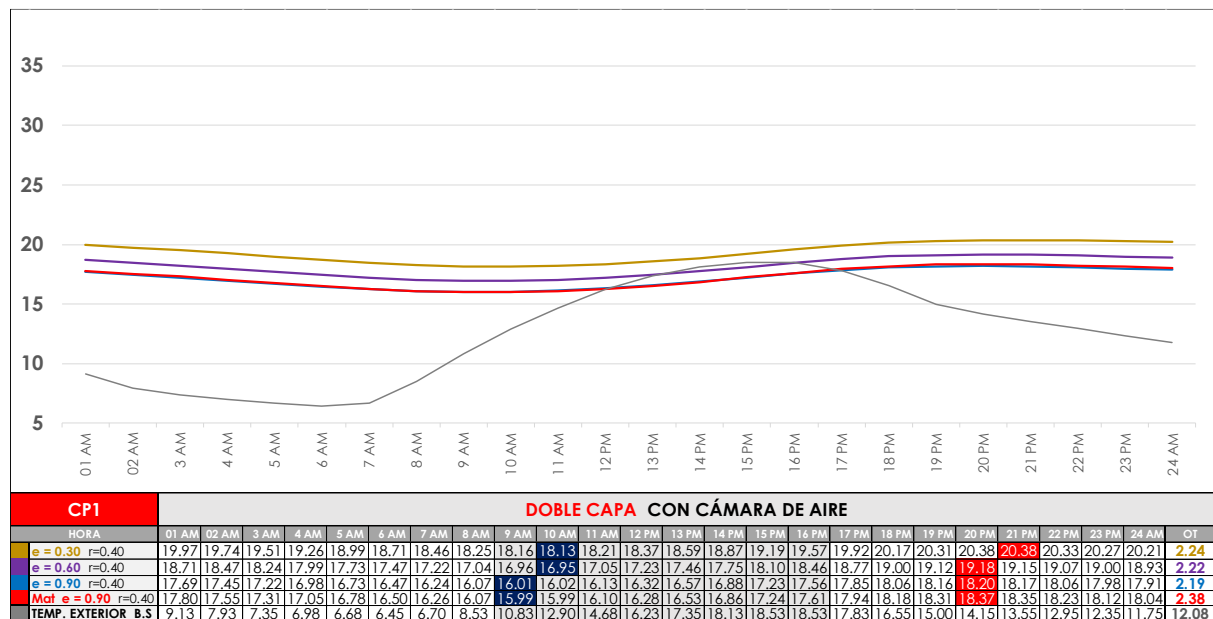


Figura 70: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CP1.

Fuente: Elaboración propia.

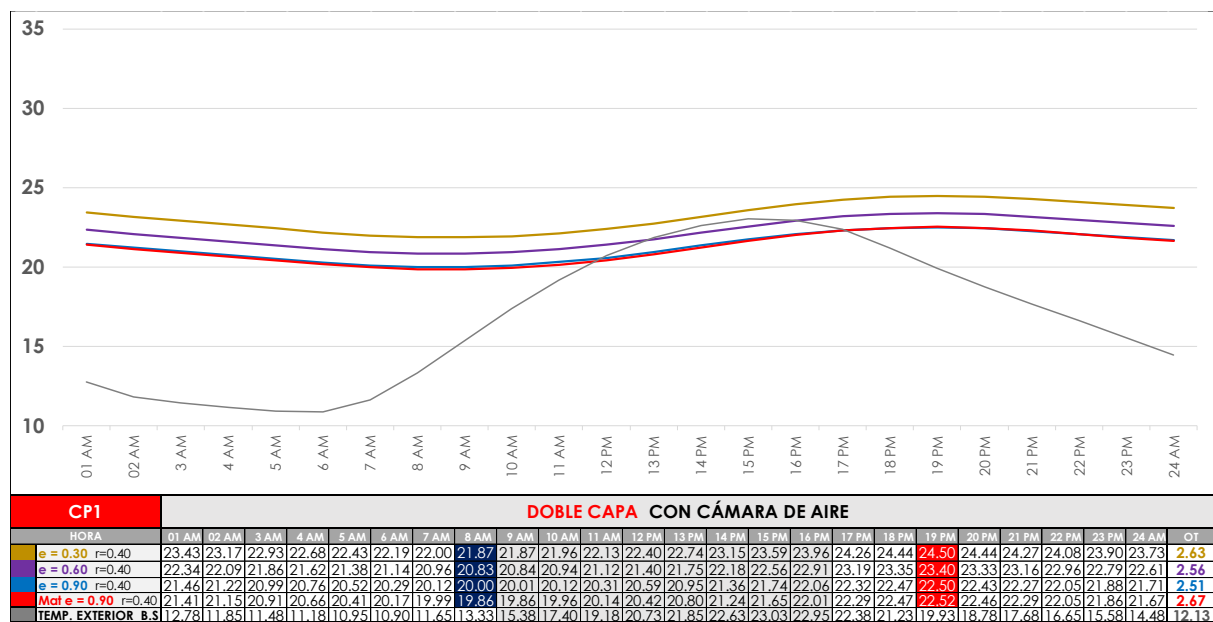


Figura 71: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CP1.

Fuente: Elaboración propia.

Emisividad CP2

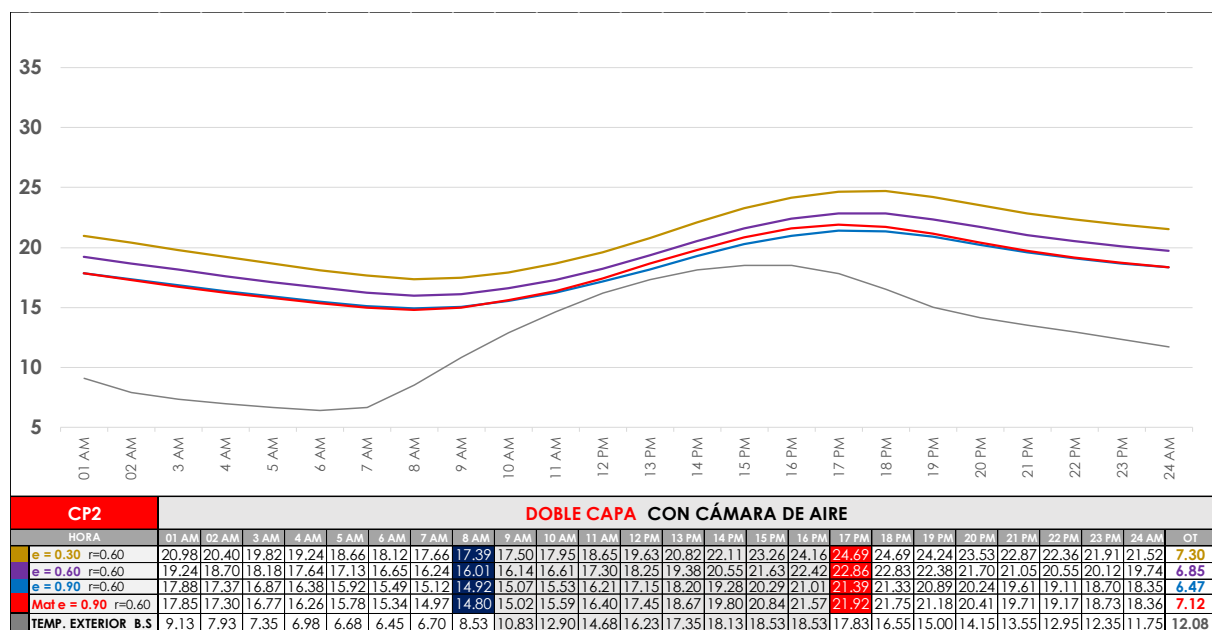


Figura 72: Temperatura del ambiente interior, día frío, Emisividad CP2.

Fuente: Elaboración propia.

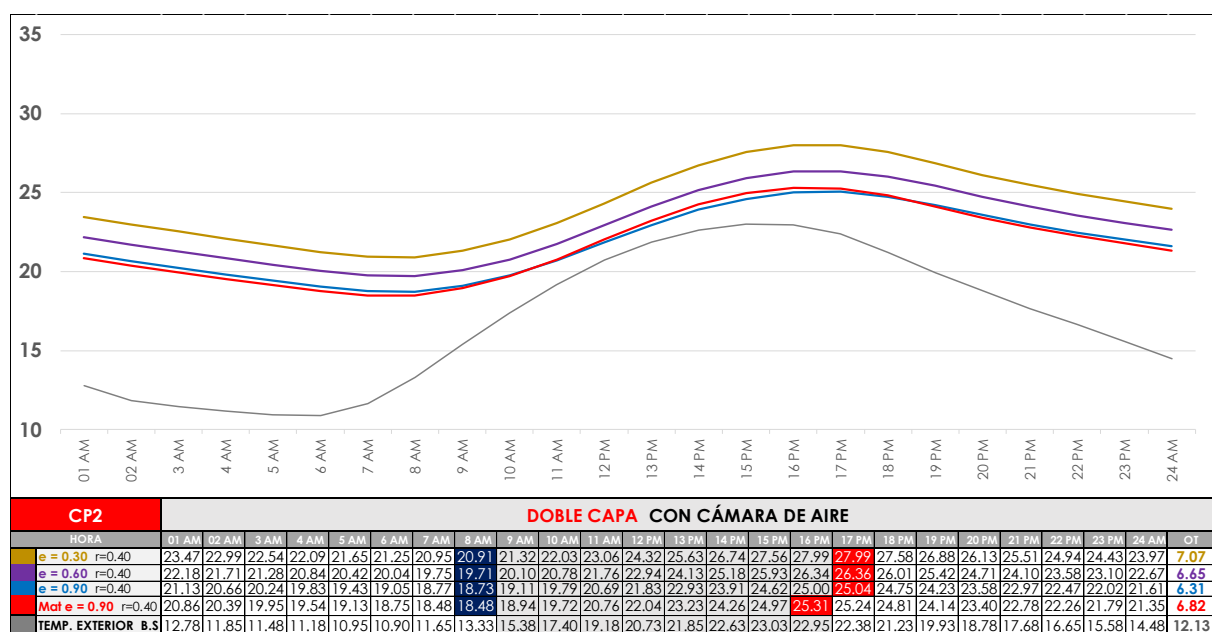


Figura 73: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Emisividad CP2.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados generales optimizados CL y CP

Temperatura del ambiente interior (Tai) optimizada la Reflectividad y Emisividad, aplicada al sistema Doble Capa.

CUBIERTA		VARIABLE	
		REFLECTIVIDAD	EMISIVIDAD
CL	CL1	0.65	0.30
	CL2	0.60	0.30
CP	CP1	0.25	0.30
	CP2	0.60	0.30

Tabla 08: Valores óptimos para reflectividad y emisividad CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

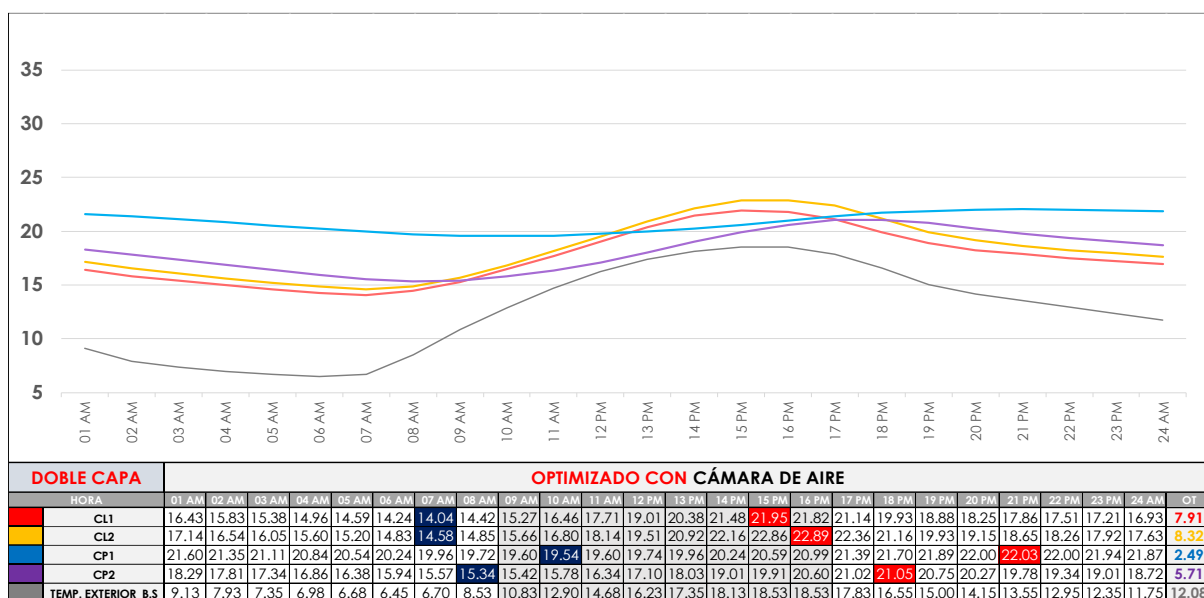


Figura 74: Temperatura del ambiente interior, día frío, Optimizada CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.

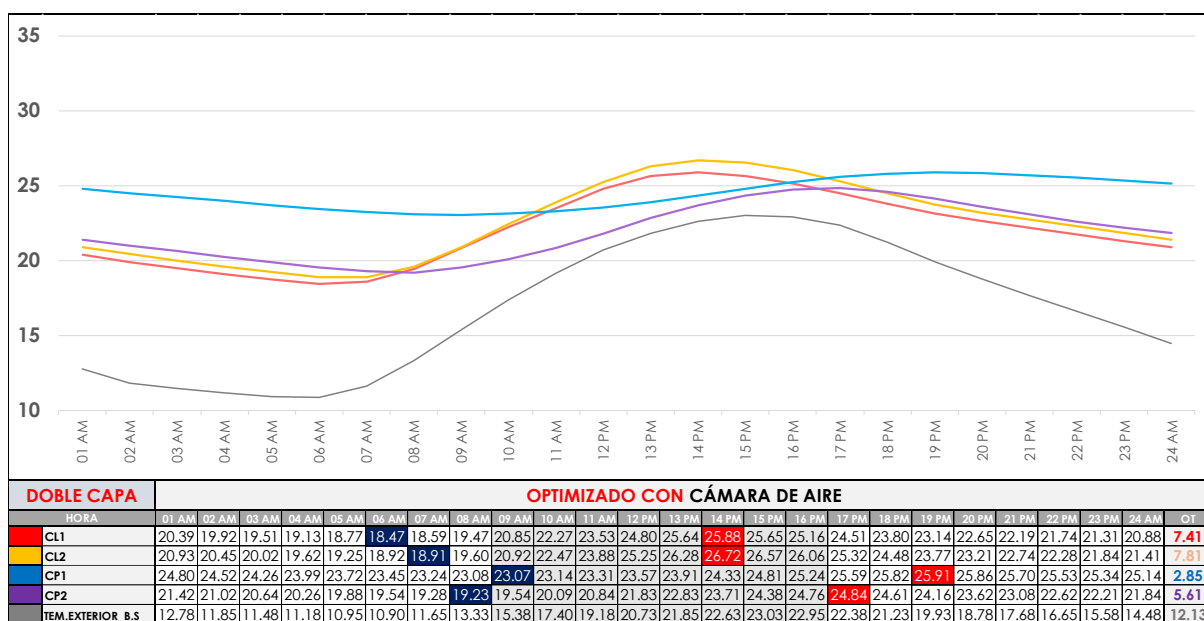


Figura 75: Temperatura del ambiente interior, día caliente, Optimizada CL y CP.

Fuente: Elaboración propia.