



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía



Evaluación energética en la integración de una cámara de aire con alta emisividad no ventilada en una techumbre de vivienda unifamiliar industrializada.

POR

Gonzalo Eduardo Rivas Fierro

Trabajo Integrativo presentado a la Facultad de Ingeniería & Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción para optar al grado académico de Magíster en Construcción Industrializada en Madera

Profesor Guía:
Manon Paulette Pommiez Aqueveque

Marzo de 2025
Concepción, Chile

© 2025, Gonzalo Rivas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La investigación sobre la transferencia de energía a través de los envolventes, y muy especialmente a través de la techumbre, se asocia a mayores pérdidas de energía que se producen a través de las techumbres de las viviendas, por lo que evaluar el impacto de incorporar una cámara de aire no ventilada en una techumbre, de dos aguas con cielo inclinado de una vivienda industrializada en madera como caso de estudio, con el objetivo de mejorar su transmitancia térmica y su ahorro energético, mediante una evaluación con la herramienta de calificación energética del MINVU.

Esta evaluación se realizó mediante métodos de cálculo de resistencia térmica total y la transmitancia térmica de los elementos constructivos, de elementos compuestos, conforme a la norma NCh 853 of 2007, y dando cumplimiento con la reglamentación que define las exigencias térmicas mínimas de los envolventes de las viviendas, para la zona climática E (costero), en San Pedro de la Paz, Chile, específicamente para pisos, muros y techumbres. Los resultados obtenidos fueron ingresados en la planilla de balance térmico dinámico (PBTD).

Una vez asignados los elementos de la envolvente de la vivienda para poder integrarlos (PBTD), se realiza una evaluación considerando su orientación, de tal manera de identificar el nivel de radiación solar a la que este se ve expuesto, pero sin obstrucciones/obstáculos frente a la vivienda, y que posteriormente son evaluados y comparados con una vivienda de referencia que cumple con el estándar mínimo establecido en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción mediante las pautas contenidas en el presente Manual de Procedimientos de la Calificación Energética de Viviendas en Chile (Manual CEV, 2019).

La evaluación comenzó con el caso de estudio, para posteriormente evaluar 3 propuestas con mejoras para el envolvente de la techumbre. Estas propuestas incluyen la incorporación de una cámara de aire no ventilada con distintas alternativas, incorporando una cámara de aire y adicionalmente una alta emisividad, comparando los resultados obtenidos en cuanto a la transmitancia térmica y la demanda energética total de la vivienda, mediante la evaluación con planilla de calificación energética de vivienda.

Los resultados de la evaluación evidencian una mejora significativa en la transmitancia térmica de la techumbre de la propuesta 3, con un valor **U de 0,26 W/m²K**, es la más eficiente, reduciendo en un **16,13%** la transmitancia térmica respecto al caso estudio con valor U final es **0,31 W/m²K**. Esta mejora se traduce en una reducción del 5,32% en la demanda total de calefacción de la vivienda en el caso de estudio. Además, la propuesta 3 se destaca como la opción más eficiente, logrando una disminución del 1,32% en la demanda global de calefacción, lo que conlleva un ahorro energético considerable. Esta reducción en la demanda energética no solo contribuye a la eficiencia térmica, sino que también representa un impacto positivo en el consumo de energía a largo plazo, aumentando su clasificación energética. La implementación de esta propuesta, desde la fase de diseño, permitirá optimizar las zonificaciones térmicas y contribuirá a alcanzar viviendas con mayores niveles de confort térmico, favoreciendo un entorno más sostenible y eficiente.

Palabras Clave: Transmitancia térmica, Confort térmico interior, balance térmico dinámico, ahorro energético, eficiencia energética, envolvente térmica.

Abstract

When investigating the transfer of energy through the envelopes, and especially through the roof, we found that the greatest energy losses occur through the roofs of the homes, so we evaluated the impact of incorporating a camera of non-ventilated air in a gable roof with a sloping ceiling of an industrialized wooden house as a base case, with the aim of improving its thermal transmittance and energy savings, using the MINVU energy rating tool.

This evaluation was carried out using methods for calculating the total thermal resistance and the thermal transmittance of the construction elements, of composite elements, in accordance with the NCh 853 of 2007 standard, and in compliance with the regulations that define the minimum thermal requirements of the enclosures. housing, for climatic zone E (coastal), in San Pedro de la Paz, Chile, specifically for floors, walls and roofs. The results obtained were entered into the dynamic thermal balance sheet (PBSD).

Once the elements of the envelope have been assigned, an evaluation is carried out considering their orientation, in order to identify the level of solar radiation to which it is exposed, but without obstructions/obstacles in front of the home, and which are subsequently evaluated and compared to a reference home that meets the minimum standard established in the General Urban Planning and Construction Ordinance through the guidelines contained in this Manual of Procedures for the Energy Rating of Homes in Chile (CEV Manual, 2019).

The evaluation focuses on the case study, and 3 proposals with improvements for the roof envelope. These proposals include the incorporation of a non-ventilated air chamber with different alternatives, incorporating an air chamber and additionally a high emissivity, comparing the results obtained in terms of thermal transmittance and the total energy demand of the home, through the evaluation with housing energy rating sheet.

The results of the evaluation show a significant improvement in the thermal transmittance of the roof of proposal 3, with a **U value of 0,26 W/m²K**, it is the most efficient, reducing thermal transmittance by 16.13% compared to the base case. with final **U value is 0,31 W/m²K**. This improvement translates into a 5.32% reduction in the total heating demand of the home in the case study. Furthermore, proposal 3 stands out as the most efficient option, achieving a 1.32% decrease in global heating demand, which entails considerable energy savings. This reduction in energy demand not only contributes to thermal efficiency but also represents a positive impact on long-term energy consumption, increasing its energy classification. The implementation of this proposal, from the design phase, will allow thermal zoning to be optimized and will contribute to achieving homes with higher levels of thermal comfort, favoring a more sustainable and efficient environment.

Keywords: Thermal conductivity, Interior thermal comfort, dynamic thermal balance, energy savings, energy efficiency, thermal envelope.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al continuo crecimiento del consumo energético de las edificaciones, (Stern *et al.*, 2016; Bienvenido-Huertas *et al.*, 2020; Comisión Europea, 2011; Ministerio de Energía Chile, 2017), y que podría ser utilizada de manera más eficiente mediante la implementación de estrategias de ahorro energético basadas en modelos de confort térmico adaptativos (Luo *et al.*, 2015), ya que, según los balances energéticos simplificados publicados por la Comisión Europea, la proporción del consumo de energía atribuido a los edificios residenciales se estimó en un 25,6% durante el 2019 (Anon, 2021), y mientras que a nivel nacional, en las nuevas viviendas se estiman lograr un ahorro promedio de 30% en su demanda de energía térmica al año 2026 y un ahorro promedio de 50% en su demanda de energía térmica al año 2050, respecto del año 2021, y para lograr disminuir esta cifra se plantea la medidas de actualizar los estándares de eficiencia energética de las edificaciones, impulsar la renovación energética del sector edificación e iniciar el 2022 el fomento al reacondicionamiento térmico de viviendas existentes (Ministerio de Energía, Chile 2021). El desarrollo y la implementación de la integración de una cámara de aire con alta emisividad no ventilada en una techumbre de vivienda unifamiliar industrializada es una de las medidas que podría generar un ahorro energético y en su demanda de energía térmica.

La evaluación energética de una construcción industrializada, siendo una forma de construir que busca mejorar el desempeño de la construcción en distintas etapas de un proyecto, que puede o no incluir prefabricados (CCI, 2022), presenta desafíos actuales al momento de diseñar los sistemas constructivos adecuados en sus envolventes de muro, piso y techo para cumplir con los estándares establecidos. Sin embargo, estos estándares no proporcionan suficientes estrategias de ahorro energético, ya que la mayoría se centran en mejorar los envolventes (Attia *et al.*, 2017; Colclough *et al.*, 2018). Es necesario, además, lograr un confort térmico que cumpla con las exigencias mínimas establecidas en la normativa Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC), con la nueva normativa de reglamentación térmica, ya que, evaluar solo la transmitancia térmica no es suficiente; se debe analizar cómo los envolventes térmicos de la vivienda impactan el rendimiento energético en su conjunto, lo que requiere una evaluación energética integral. Abordar la pérdida de energía en cada componente específico del edificio permite implementar estrategias focalizadas para mejorar la eficiencia energética y minimizar el desperdicio (Retrofoam Company, 2021).

La aislación térmica de la techumbre es particularmente importante, ya que, generalmente, las mayores pérdidas de energía se producen a través de este componente. Aislado adecuadamente la techumbre, se puede mejorar el confort térmico con una baja inversión, en comparación con otras medidas de eficiencia energética (Manual CEV, 2014).

Un número creciente de estudios se ha centrado en enfoques alternativos que pueden proporcionar condiciones térmicas más saludables y cómodas para los ocupantes, manteniendo un consumo de energía aceptable (Luo *et al.*, 2015). Las dificultades al momento de diseñar se pueden evidenciar en pérdidas de energía debido a una inadecuada selección de aislamiento térmico y a un bajo confort térmico en el interior de la vivienda, lo que afecta tanto la durabilidad de la estructura como el bienestar de los habitantes.

Muchos estudios se han centrado en abordar el consumo de energía para calefacción y refrigeración en los edificios (Zhu *et al.*, 2022, Sun *et al.*, 2021, Pérez *et al.*, 2022). Además, algunos investigadores han reconocido la importancia del índice de confort térmico como un factor crucial (Hagentoft y Pallin, 2021; Kong *et al.*, 2022). Este estudio analiza el impacto de la incorporación de una cámara de aire no ventilada en una vivienda, evaluando su potencial para generar ahorros energéticos en comparación con otras alternativas para la mejora del aislamiento térmico. En particular, se explora cómo el uso de diversos materiales aislantes, como la lana de vidrio, puede contribuir a la eficiencia energética. Sin embargo, una de las limitaciones de estas soluciones es que requieren un incremento en el espesor de la lana de vidrio y un sobredimensionamiento de la escuadría de las vigas del techo, lo que implica un aumento en los costos y en el peso de la estructura. Por otro lado, la implementación de una cámara de aire no ventilada puede ofrecer una solución más eficiente en términos de costos y materiales, al aprovechar el principio físico de aislamiento mediante el aire estancado, el cual reduce la transferencia de calor por conducción y mejora la eficiencia térmica sin necesidad de modificar significativamente la estructura del edificio.

Desde un punto de vista técnico, una cámara de aire no ventilada puede ser más efectiva que el aumento de material aislante en situaciones donde el espacio disponible es limitado, ya que, al funcionar como una capa adicional de aislamiento térmico, puede contribuir a mantener temperaturas estables dentro de la vivienda, reduciendo la necesidad de calefacción o refrigeración. En 2009, el uso de materiales innovadores como el aluminio ligero, para lograr una alta emisividad, pueden tener un impacto significativo en la reducción del consumo de energía y la mejora del rendimiento térmico de los edificios. Además, esta solución no requiere modificaciones sustanciales en la estructura, lo que puede representar un ahorro en términos de material y mano de obra, comparado con las alternativas que requieren el rediseño de las vigas del techo y el aumento del espesor del aislamiento.

Este enfoque también podría tener ventajas adicionales en términos de durabilidad y sostenibilidad, ya que el uso de materiales con menos impacto ambiental y la optimización de la estructura existente pueden contribuir a una construcción más eficiente y menos costosa en el largo plazo.

2. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

a. CASO DE ESTUDIO

Datos de arquitectura Caso Estudio.

El diseño de la vivienda denominada caso estudio, siendo uno de los proyectos de bienes públicos, que cumple con el estándar de Plan de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitana, y para efectos de verificación se ubicara en la comuna de San Pedro de la Paz, un área que se caracteriza por un clima costero, templado mediterráneo cálido y templado húmedo o lluvioso, la temporada de lluvias coincide con bajas temperaturas, la temperatura exterior diaria promedio varía de 2,9 a 10,2 °C en julio a 10,9 a 23,7 °C en enero, detallados en la Ilustración 10, día representativo de Enero–Abril – Julio - Octubre sin equipos de climatización, gráfico 6 de planilla de resultados BTd.

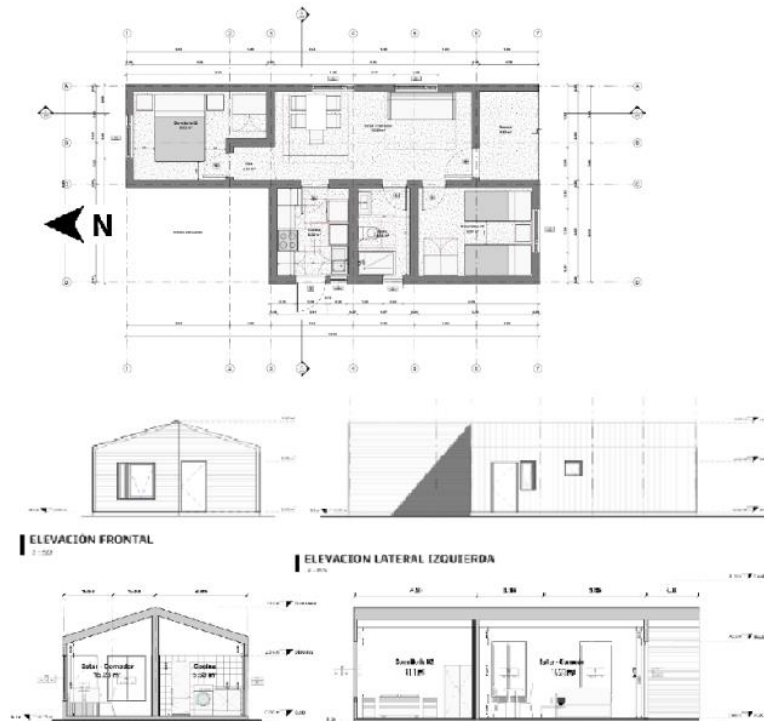
Las especificaciones técnicas de la vivienda industrializada en madera, se encuentra diseñada en un piso, con un área interior de 44.30 m², mientras que el área del techo es de 56.29 m², y la altura de los muros perimetrales es de 2.4 m y una altura de 3,60 m de piso a cumbrera. El techo está compuesto por una estructura de madera con revestimiento de yeso cartón RF, cuenta con una cámara de aire de instalaciones no ventilada y un entramado de cielo, con 120 mm de aislación de lana de vidrio de 11 kg/m³. Los muros son de estructura liviana en madera, con tipo de muro zona seca (ZS) y tipo zona húmeda (ZH). Las ventanas tienen marco de PVC y doble Vidriado Hermético (DVH) cuenta con un perfil separador de 9 mm que crea una cámara de aire interna, mejorando el aislamiento térmico y acústico del sistema, mientras que el piso es ventilado, de madera y con aislación entre elementos. Además, la puerta es de madera sólida. La transmitancia térmica de los elementos envolventes de la vivienda, tales como muros, pisos, ventanas y puertas en contacto con el exterior, se mantendrán constantes en la evaluación energética del caso de estudio. Los valores correspondientes a estas transmitancias térmicas se conservan tal como se indican en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Transmitancia térmica de los envolventes de la vivienda, Caso Estudio.

Componente	Caso Estudio Valor U (W/m ² K)	Referencia Valor U de acuerdo con Zona Térmica E	Cumple nueva Norma Térmica (Si / No)
Techo Tipo 1	0,31	0,33	SI
Muro Tipo ZS	0,45	0,60	SI
Muro Tipo ZH	0,45	0,60	SI
Piso Ventilado	0,30	0,60	SI
Ventana tipo	3,01	≤ 3,6	SI
Puerta	1,7	1,7	SI

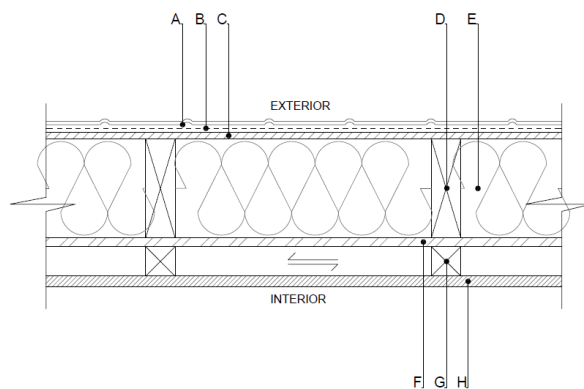
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Ilustración N°1: *Planimetría, Elevaciones y Cortes de Vivienda, Caso Estudio.*



Fuente: Diseño Proyecto Bienes Públicos, cod.23BP.246692.2023.

Ilustración N°2: *Detalle de materialidad en panel de techo Caso Estudio, con un valor U de 0,31 W/m²K.*



Nomenclatura:

- A. Zinc Alum 5v Prepintado
- B. Membrana Hidrófuga 62 g/m²
- C. Terciado Estructural 9 mm
- D. Madera Pino Seco 41x138 mm @400 mm
- E. Lana Vidrio 11kg/m³ e= 120 mm
- F. Placa OSB estructural e= 11.1 mm
- G. Madera Pino Seco 41x41 mm @400 mm
- H. Plancha Yeso Cartón RF e= 15 mm

↔ Cámara de Aire

Fuente: Diseño Proyecto Bienes Públicos, cod.23BP.246692.2023.

b. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN/ HIPÓTESIS

Pregunta de investigación:

¿Cómo afecta o impacta en la transmitancia térmica y en el confort térmico de la vivienda, la incorporación de una cámara de aire no ventilada en la techumbre de dos aguas con cielo inclinado de una vivienda industrializada en madera ubicada en la zona E?

c. OBJETIVOS

Hipótesis

La implementación de una cámara de aire como un componente adicional a un panel de techumbre de una vivienda industrializada en madera de dos aguas con cielo inclinado, reducirá la transmitancia térmica y aumentará el ahorro de la demanda energética total de la vivienda, en comparación con el diseño arquitectónico utilizado en la vivienda.

Objetivos generales.

Evaluar el impacto de incorporar una cámara de aire en techumbre de dos aguas con cielo inclinado de una vivienda industrializada en madera como caso base, con fin de mejorar su transmitancia térmica y optimizar el ahorro energético total de la vivienda, que se llevará a cabo mediante un balance térmico dinámico, comparando la transmitancia térmica y la reducción de la demanda energética en ambos casos.

Objetivos Específicos

- Proponer tres alternativas de mejora para la techumbre de la vivienda, incorporando una cámara de aire, y sus especificaciones técnicas correspondientes.
- Determinar la transmitancia térmica de los envolventes del caso base y las tres propuestas de techumbre, mediante el método de cálculo para la resistencia térmica total de los elementos compuestos, conforme a la normativa NCh 853/2007.
- Comparar el impacto que genera con respecto a la demanda energética de las diferentes propuestas de techumbre con el caso base en la vivienda unifamiliar industrializada, utilizando simulaciones basadas en el balance térmico dinámico (PBSD), para evaluar el impacto en la eficiencia energética de cada diseño.

d. DISEÑO METODOLÓGICO

La evaluación corresponde a un estudio cuantitativo, comparando las planillas de Balance Térmico Dinámico (PBSD) del Minvu utilizadas para la Calificación Energética de Viviendas (CEV), en las cuales se analiza el desempeño térmico de una vivienda, de un sistema constructivo liviano en madera, como “caso estudio” y con tres diferentes propuestas en su envolvente térmicos de la techumbre que se incorporan a la vivienda de “caso de estudio”, manteniendo el diseño arquitectura y envolventes térmicos de piso y muros, ubicada en la comuna de San Pedro de la Paz región del Biobío. Para esto se tomó como referencia la zona climática E (costera).

La verificación del cumplimiento de la exigencia térmica de techumbre se realizó mediante método de cálculo, de la transmitancia térmica o resistencia total de la solución constructiva, correspondiente, señalado en la norma NCh 853 of 2007, "Acondicionamiento térmico-Envolvente térmica de edificios – Cálculo de resistencia y transmitancias térmicas", ya que es normativa indicada en el manual de CEV para ser ingresadas en PBTD. Al existir más de un material, en el sistema constructivo de techumbre se calculó su valor U ponderado según metodología establecida en NCh 853 Of 2007, considerando que la estructura equivale a un 10% y el alma a un 90%, de su superficie.

El modelo PBTD realizará la interacción de todos los flujos de calor que influyen al interior de la vivienda, dónde se considera que la totalidad de la vivienda es una mono zona (Manual CEV, 2014), interactuando los aportes térmicos de los muros, techo o piso, y que la sumatoria de los flujos de cargas internas, radiación, envolventes, infiltración, ventilación y puentes térmicos que serán los elementos para determinar la demanda energética de la vivienda. Se calcula la temperatura del aire en el interior de la vivienda considerando todos los flujos térmicos, ya que mantener una temperatura interna inapropiada puede resultar contraproducente para los usuarios, afectando no solo su confort, sino que también puede provocar un aumento innecesario en el consumo energético (Pérez-Fargallo *et al.*, 2018), para mantener dicha temperatura dentro de la banda de confort, es necesario medir la demanda de energía en calefacción y la demanda de energía en refrigeración diaria necesaria, con el objetivo de permanecer dentro de las temperaturas máximas y mínimas que los habitantes se sientan confortables. Para determinar las bandas de confort se utiliza el método de Confort Adaptativo (de Dear y Brager, 1998), y la cantidad de horas que la temperatura se encuentra sobre la banda de confort son las horas de desconfort HD(+), o también conocidas como horas de sobrecalentamiento, a su vez la cantidad de horas que la temperatura se encuentra bajo la banda de confort son horas de desconfort HD(-), u horas de subenfriamiento, Estas métricas permiten evaluar el comportamiento térmico pasivo de la vivienda, ya que no dependen de la energía adicional aportada por los sistemas de climatización. Cuanto menor sean las cantidades de horas fuera las bandas de confort, mayor será el confort térmico de la vivienda gracias a su diseño, ya que los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado pueden usarse bajo condiciones de incomodidad extrema debido a los recursos limitados de los usuarios (Manual CEV, 2019)

Este análisis comparativo permitirá evaluar el consumo y el desempeño energético de las viviendas, considerando sus respectivas propuestas de mejora. Se calculará el ahorro total en kWh/m²-año y se expresará en términos porcentuales, asociando cada caso a una clasificación de precalificación energética (de la letra A a la G). De esta manera, se obtendrán datos cuantitativos que facilitarán la comparación del rendimiento energético de cada propuesta y su impacto en la eficiencia general de la vivienda.

3. RESULTADOS

3.1 Propuestas de mejoras para la techumbre de la vivienda

La vivienda "Caso de Estudio", que cumple con los requisitos térmicos vigentes, se ajusta tanto a los estándares de transmitancia y resistencia térmica establecidos por el plan de descontaminación atmosférica de Concepción, como a los nuevos requisitos que serán exigidos por la actualización de la normativa térmica en Chile, la cual entrará en vigencia

en el segundo semestre de 2025, y que será objeto de una evaluación de propuestas de mejora en el diseño de su envolvente térmica, específicamente en la techumbre. Se desarrollarán tres propuestas diferentes, las cuales se incorporarán al diseño arquitectónico del caso de estudio.

- En la **primera propuesta**, se considera aumentar la emisividad en la cámara de aire existente en las instalaciones actuales de la techumbre.
- En la **segunda propuesta**, se integra una cámara de aire no ventilada de 41 mm, sin modificar el sistema actual de la cámara de instalaciones.
- En la **tercera propuesta**, se introduce una cámara de aire no ventilada de 41 mm con alta emisividad, además de mejorar la emisividad en la cámara de aire de las instalaciones existentes.

Cada una de estas propuestas cumple con los parámetros térmicos requeridos para los diferentes elementos de la vivienda, incluyendo el techo, los muros, las puertas, las ventanas y el piso, con el fin de optimizar el rendimiento térmico y energético de la vivienda. El cálculo de la demanda energética de la vivienda se realizará para las tres propuestas, lo que permitirá realizar una comparación para identificar la propuesta más efectiva y eficiente.

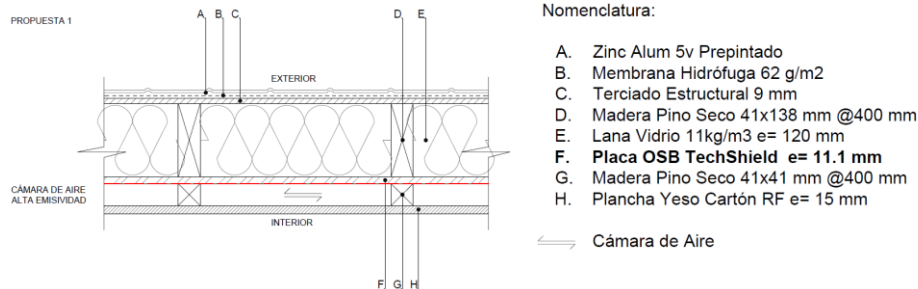
3.1.1- Caso Propuesto 1

Las características técnicas de vivienda denominada “Caso Propuesto 1” mantienen el diseño y las características técnica del “Caso Estudio”, incorporando mejoras en la cámara de Instalaciones. Esta propuesta, se aumenta a una alta emisividad en una superficie interiores de la cámara, utilizando tablero OSB Techshield, que cuenta con una barrera radiante de aluminio brillante en una de sus caras, lo que permite reflejar la radiación térmica.

La cámara de instalaciones tiene un espesor de 41 mm, y el tablero OSB 11.1 mm existente en el diseño solo se reemplaza por un tablero OSB Techshield del mismo espesor, como se muestra en la ilustración N3, dando un espesor total de techumbre de 21,5 cm. Esta modificación incrementa los costos en 0,018 Uf/m², lo que da un total de 1,03 UF en la techumbre.

Su valor de R es de 0,36 m²K/W. Esto se debe a que una de sus superficies interiores de la cámara es muy brillante, con un valor de emisividad (ϵ) de 0,05, la otra superficie en cambio corresponde a material corriente con un valor ϵ de 0,9, lo que da como resultado una emisividad térmica (E) de 0,05, según se detallada en la tabla C.3 “Resistencia térmica por unidad de superficies de cámaras de aire no ventiladas- Cámaras de aire horizontal, flujo térmico ascendente” de la NCh 853 of 2007.

Ilustración N°3: Detalle de materialidad en panel de techo Caso Propuesto 1, con un valor U de 0,29 W/m²K.



Fuente: Elaboración propia, 2025

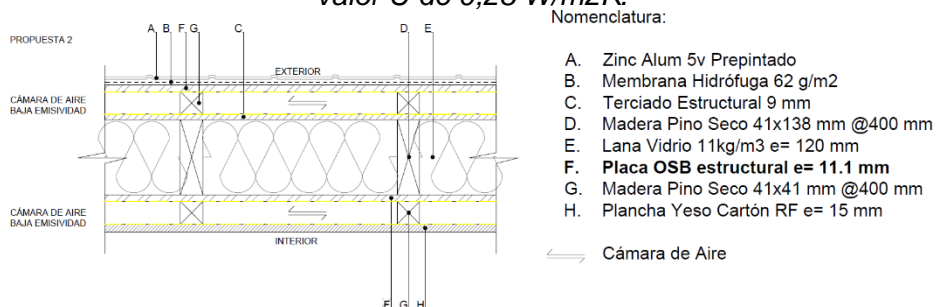
3.1.2.- Caso Propuesto 2

Las características técnicas de la vivienda denominada "Caso Propuesto 2" mantienen el diseño y las especificaciones técnicas de la vivienda del "Caso Estudio", incorporando una cámara de aire no ventilada bajo el revestimiento exterior de techumbre. En esta propuesta, se utilizan materiales de baja emisividad, como tableros OSB de 11.1 mm, sin superficie brillante.

El diseño de la cámara de instalaciones se mantiene sin modificaciones, con respecto al caso de estudio, pero si se incorpora una cámara de aire no ventilada se ubica sobre el terciado estructural de 9 mm y debajo de la membrana hidrófuga, con un tablero OSB de 11,1 mm y madera de pino seca de 41x41 mm cada 400 mm, tal como se muestra en la ilustración N°4, dando un espesor total de techumbre de 26,7 cm. Esta modificación incrementa los costos en 1,4 Uf/m², lo que da un total de 77,6 UF.

En cuanto al espesor de la cámara de instalaciones, no se modifica, y su valor de resistencia térmica (R) es de 0,14 m²K/W. Esto se debe a que se trata de un caso característico con materiales comunes de construcción, ya que sus superficies interiores están formadas por madera y papel no metálico, con un valor de emisividad (ε) de 0,9. Esto resulta en una emisividad térmica (E) de 0,82, según se detalla en la tabla C.3 "Resistencia térmica por unidad de superficies de cámaras de aire no ventiladas - Cámaras de aire horizontal, flujo térmico ascendente" de la NCh 853 de 2007.

Ilustración N°4: Detalle de materialidad en panel de techo Caso Propuesto 2, con un valor U de 0,28 W/m²K.



Fuente: Elaboración propia, 2024

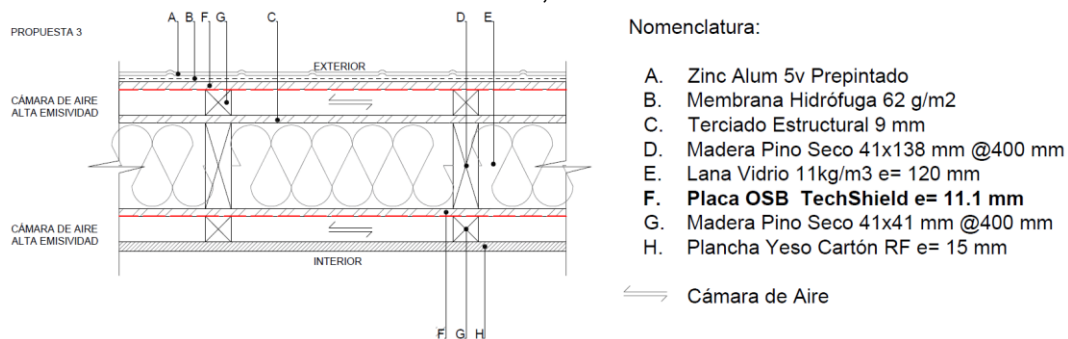
3.1.3.- Caso Propuesto 3

Las características técnicas de la vivienda denominada “Caso Propuesto 3” mantienen el diseño y las especificaciones del “Caso Estudio”, incorporando una cámara de aire no ventilada bajo el revestimiento exterior de techumbre y aumentando la emisividad en la cámara de instalaciones no ventilada existente. En esta propuesta, se utilizan materiales de alta emisividad, como los tableros OSB Techshield de 11,1 mm, que cuentan con una superficie muy brillante.

La cámara de aire no ventilada se ubica sobre el terciado estructural de 9 mm y debajo de la membrana hidrófuga, con un tablero OSB Techshield de 11,1 mm y madera de pino seca de 41x41 mm colocada cada 400 mm. En la cámara de instalaciones, el tablero OSB de 11,1 mm existente se reemplaza por un tablero OSB Techshield del mismo espesor, como se muestra en la ilustración N°5, dando un espesor total de techumbre de 26,7 cm, con un aumento de 52,1 mm con respecto al caso de estudio. Esta modificación incrementa los costos en 1,56 Uf/m², alcanzando un total de 87,6 UF.

Respecto a los espesores de las cámaras no ventiladas, que tienen un espesor de 41 mm, su valor de resistencia térmica (R) es de 0,36 m²K/W. Esto se debe a que una de las superficies interiores de la cámara es altamente brillante, con un valor de emisividad (ϵ) de 0,05, mientras que la otra superficie está formada por un material común, con un valor de ϵ de 0,9. El resultado final es una emisividad térmica (E) de 0,05, según lo detallado en la tabla C.3 “Resistencia térmica por unidad de superficies de cámaras de aire no ventiladas - Cámaras de aire horizontal, flujo térmico ascendente” de la NCh 853 de 2007.

Ilustración N°5: Detalle de materialidad en panel de techo Caso Propuesto 3, con un valor U de 0,26 W/m²K.



Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.- Transmitancia térmica del caso base y de las tres propuestas de techumbre

El análisis comparativo de la Resistencia Térmica R (m²K/W) de las estructuras y almas revela que el Caso Base presenta un R relativamente baja, con una estructura (R1) de 2,081 y un alma (R2) de 3,460, lo que nos entrega una referencia inicial y como también su transmitancia térmica U de 0,31, como se detalla en tabla N°2. En el Caso Propuesto 1, aunque la estructura se mantiene igual, el alma mejora ligeramente su resistencia a 3,680, resultando un 6,5% de mejora con respecto al caso estudio, con un 0,29 W/m²K en su U total como se ve detallado en tabla N°3. El Caso Propuesto 2 muestra una mejora tanto en

la estructura ($R1 = 2,562$) como en el alma ($R2 = 3,687$), lo que genera un incremento moderado en la R total, en tabla N°4, destacándose como una opción más eficiente que los casos anteriores. Finalmente, el Caso Propuesto 3 presenta la mayor mejora, con una estructura similar a la propuesta 2, pero con un alma significativamente mejorada de $4,127 \text{ m}^2\text{K/W}$, alcanzando un R más alta y destacándose como la opción más eficiente térmicamente, al obtener un U más baja de $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$, que equivale a un $16,13\%$ de mejora por sobre al caso de estudio, detallado en tabla N°5, ideal para escenarios con mayores exigencias de aislamiento y eficiencia energética.

El análisis realizado se fundamenta en principios de transferencia de calor, donde el R es directamente proporcional a la capacidad de un material para resistir el paso de calor. Al mejorar el R tanto en la estructura como en el alma, se reduce el U del sistema constructivo, optimizando el rendimiento térmico. De los tres casos propuestos, el Caso Propuesto 3 sobresale como la opción más efectiva debido a su capacidad para maximizar la resistencia térmica del alma, debido a la incorporación de la cámara de aire sin ventilación y el aumento su alta emisividad.

3.2.1.- Transmitancia térmica Caso Estudio

De acuerdo con lo analizado, su valor U es el siguientes:

Tabla N°2: U del sistema constructivo de Techumbre, Caso Estudio

ESTRUCTURA	R ($\text{m}^2\text{K/W}$)	e (M)	λ	Fuente	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 138 @400 mm	1,327	0,138	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,011	0,13	ficha tec material	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Plancha Yeso Cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Rsi+Rse	0,140			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R1	2,081	0,2141		U1	0,480

ALMA	R ($\text{m}^2\text{K/W}$)	e (M)	λ	Fuente	U ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Cámara de aire 18 mm	0,130	0,018		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Lana Vidrio 11 Kg/m3 120mm	2,830	0,120	0,042	Ensaye IDIEM N°1.069.492.1	
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,011	0,130	ficha tec material	
Cámara de aire instalaciones 41 mm	0,140	0,041		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	

Placa Yeso cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Rsi+Rse	0,140			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R2	3,460	0,2141		U2	0,289
				U final =	0,31

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.2.- Transmitancia térmica Caso Propuesto 1

Tabla N°3: U del sistema constructivo de Techumbre, Caso Propuesto 1.

ESTRUCTURA	R (m2K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m2K)
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 138 @400 mm	1,327	0,138	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,011	0,130	ficha tec material	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Plancha Yeso cartón RF 15mm	0,140			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R1	2,081	0,214		U1	0,480

ALMA	R (m2K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m2K)
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Cámara de aire 18 mm	0,13	0,018		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Lana Vidrio 11 Kg/m3 120mm	2,830	0,12	0,042	Ensaye IDIEM N°1.069.492.1	
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,085	0,011	0,130	ficha tec material	
Cámara de aire instalaciones 41 mm	0,36	0,041		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Placa Yeso cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Rsi+Rse	0,14			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R2	3,680	0,214		U2	0,272
				U final (W/m2k) =	0,29

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.3.- Transmitancia térmica Caso Propuesto 2

Tabla N°4: U del sistema constructivo de Techumbre, Caso Propuesta 2.

ESTRUCTURA	R (m2K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m2K)
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 138 @400 mm	1,327	0,138	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	ficha tec material	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Plancha Yeso Cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,31	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Rsi+Rse	0,140			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R1	2,562	0,2551		U1	0,390

ALMA	R (m2K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m2K)
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Cámara de aire 41 mm	0,140	0,041		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853	
Cámara de aire 18 mm	0,130	0,018		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Lana Vidrio 11 Kg/m3 120mm	2,830	0,120	0,042	Ensaye IDIEM N°1.069.492.1	
Tablero OSB 11,1mm	0,085	0,0111	0,130	ficha tec material	
Cámara de aire instalaciones 41 mm	0,140	0,041		Tabla C.2 NCh 853 of 2007	
Placa Yeso cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Rsi+Rse	0,14			Tabla 2 NCh 853 of 2007	
R2	3,687	0,2551		U2	
				U final (W/m2k) =	0,28

Fuente: Elaboración propia, 2024

3.2.4.- Transmitancia térmica Caso Propuesto 3

Tabla N°5: U del sistema constructivo de Techumbre, Caso Propuesta 3

ESTRUCTURA	R (m ² K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m ² K)
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853	
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Madera Pino 41 x 138 mm @400 mm	1,327	0,138	0,104	Tabla A.1 NCh 853	
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,085	0,011	0,130	ficha tec material	
Madera Pino 41 x 41 @400 mm	0,394	0,041	0,104	Tabla A.1 NCh 853	
Placa Yeso cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,310	Tabla A.1 NCh 853	
Rsi+Rse	0,14			Tabla 2 NCh 853	
R1	2,561	0,2551		U1	0,390

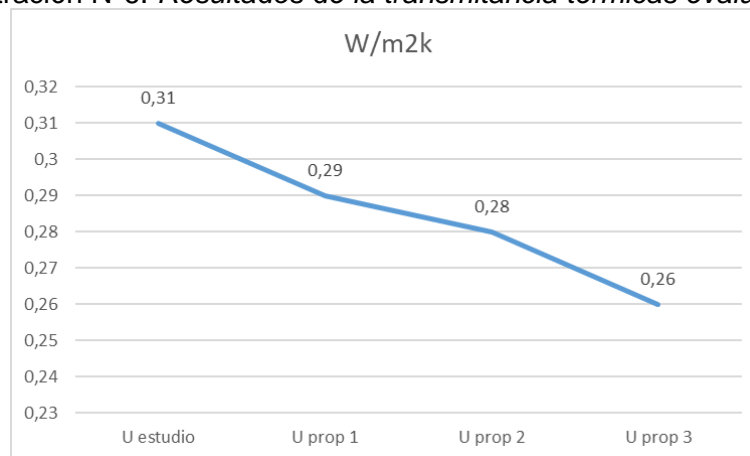
ALMA	R (m ² K/W)	e (M)	λ	Fuente	U (W/m ² K)
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	Tabla A.1 NCh 853 of 2007	
Cámara de aire 41 mm	0,360	0,041		Tabla C.2 NCh 853	
Terciado estructural 9mm	0,087	0,009	0,104	Tabla A.1 NCh 853	
Cámara de aire 18 mm	0,13	0,018		Tabla C.2 NCh 853	
Lana Vidrio 11 Kg/m ³ 120mm	2,830	0,12	0,0424	Ensaye IDIEM N°1.069.492.1	
Tablero OSB Techshield 11,1mm	0,085	0,0111	0,13	ficha tec material	
Cámara de aire instalaciones 41 mm	0,360	0,041		Tabla C.2 NCh 853	
Placa Yeso cartón RF 15mm	0,048	0,015	0,31	Tabla A.1 NCh 853	
Rsi+Rse	0,14			Tabla 2 NCh 853	
R2	4,146	0,2551		U2	0,241
				U final (W/m²k) =	0,26

Fuente: Elaboración propia, 2024

El análisis de transmitancia térmica demuestra que todas las propuestas mejoran el aislamiento térmico respecto al caso base, graficadas en ilustración N°6, cumpliendo con la normativa NCh 853, en zona E con menos de 0,33 W/m²K. En la evaluación de las distintas propuestas para mejorar el aislamiento térmico de la vivienda, se comenzó con un análisis del caso base, el cual presenta un valor U de 0,31 W/m²K. Sin embargo, para mejorar la eficiencia energética y el confort térmico de la vivienda, se evaluaron tres propuestas que buscan reducir este valor U.

- **Propuesta 1:** Esta propuesta mejora el valor U a $0,290 \text{ W/m}^2\text{K}$, lo que representa una mejora del 6,45% en comparación con el valor U del Caso Base ($0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$). Aunque esta reducción es significativa, la mejora en el aislamiento térmico es moderada en comparación con las otras opciones evaluadas.
- **Propuesta 2:** La segunda propuesta lleva el valor U a $0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$, logrando una mejora del 9,68% respecto al caso base. Esta opción presenta un mejor desempeño en términos de aislamiento térmico que la Propuesta 1, lo que podría traducirse en una mayor eficiencia energética, especialmente poder ser usada en zonas térmicas de la A a la G, con un U necesario de cumplimiento de $0,84$ a $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$, respectivamente, y detallada en ilustración N°6, de la tabla 10 de transmitancia térmica U máxima y resistencia térmica R_t mínima para complejos de techumbre, muros perimetrales, piso ventilado y puertas opacas, en la nueva reglamentación térmica que va de la zona A a la zona I
- **Propuesta 3:** La tercera propuesta es la más eficiente de todas, con un valor U de $0,260 \text{ W/m}^2\text{K}$. Esta mejora del 16,13% con relación al caso base es significativa, lo que implica una notable reducción en la transferencia de calor. Un menor valor U indica una mayor capacidad de aislamiento, lo que no solo mejora el confort térmico dentro de la vivienda, sino que también contribuye a un ahorro energético sustancial, y que puede ser aplicada en zonas térmicas de la A a la G, según nueva reglamentación térmica.

Ilustración N°6: Resultados de la transmitancia térmicas evaluadas.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Ilustración N°7: Transmitancia térmica U máxima y resistencia térmica Rt mínima para complejos de techumbre.

ZONA TÉRMICA	COMPLEJO DE TECHUMBRE	
	U ^(*)	Rt ^(*)
	W/m ² K	m ² K/W
A	0,84	1,19
B	0,47	2,13
C	0,47	2,13
D	0,38	2,63
E	0,33	3,03
F	0,28	3,57
G	0,28	3,57
H	0,25	4,00
I	0,25	4,00

Fuente: Tabla 1, Nueva reglamentación térmica,2024.

3.3.- Comparación de la demanda energética de las diferentes propuestas de techumbre con el caso estudio

3.3.1.-Resultados generales Caso Estudio:

Una vez incorporado los datos en Planilla de BTD 03.-PBTD-Vivienda C se puede observar lo siguiente, y de los resultados obtenidos, se observa que la vivienda, se califica con una letra B. Su demanda energética teórica total es de 78,2 kWh/m²-año, siendo la mayor parte de esta demanda atribuida a calefacción, con 49,8 kWh/m²-año, mientras que la demanda de refrigeración es de 28,5 kWh/m²-año, de acuerdo con las características constructivas de la vivienda, como se muestran en la tabla N°7 planilla resumen de BTD 03.-PBTD-Vivienda CE, Caso Estudio.

Además, se analiza los flujos de horas de desconfort térmico, es decir, el tiempo en que las temperaturas están fuera de la banda de confort, ya sea por estar por encima de la banda de confort o desconfort por calor HD (+) (sobrecalentamiento) o por debajo de la banda de confort o desconfort por frío HD (-) (subenfriamiento). Este análisis es una herramienta útil para visualizar el comportamiento pasivo de la vivienda, ya que no depende de la inyección de energía por parte de un sistema de climatización. Cuanto menor sean las horas fuera del rango de confort, más confortable será la vivienda gracias a su diseño (Manual CEV, 2014). En este contexto, se observa que la vivienda experimenta un total de 209 horas de desconfort térmico, de las cuales 123 horas (43% del tiempo) corresponden a desconfort por frío. Este valor representa 19,3 horas menos de subenfriamiento en la vivienda caso estudio, en comparación con la banda estándar de una vivienda de referencia o base, que cumple con las condiciones mínimas requeridas en la normativa chilena, y que presenta 142,3 horas de HD(-), según los resultados del balance térmico dinámico, detallados en tabla N°7. Por otro lado, 86 horas (30% del tiempo) corresponden a desconfort por calor, lo que representa un aumento de 30,5 horas de sobrecalentamiento, en comparación con el caso base estándar que presenta 55,5 horas de HD (+).

Tabla N°7: Planilla resumen PBTB-Vivienda CE, Caso Estudio.

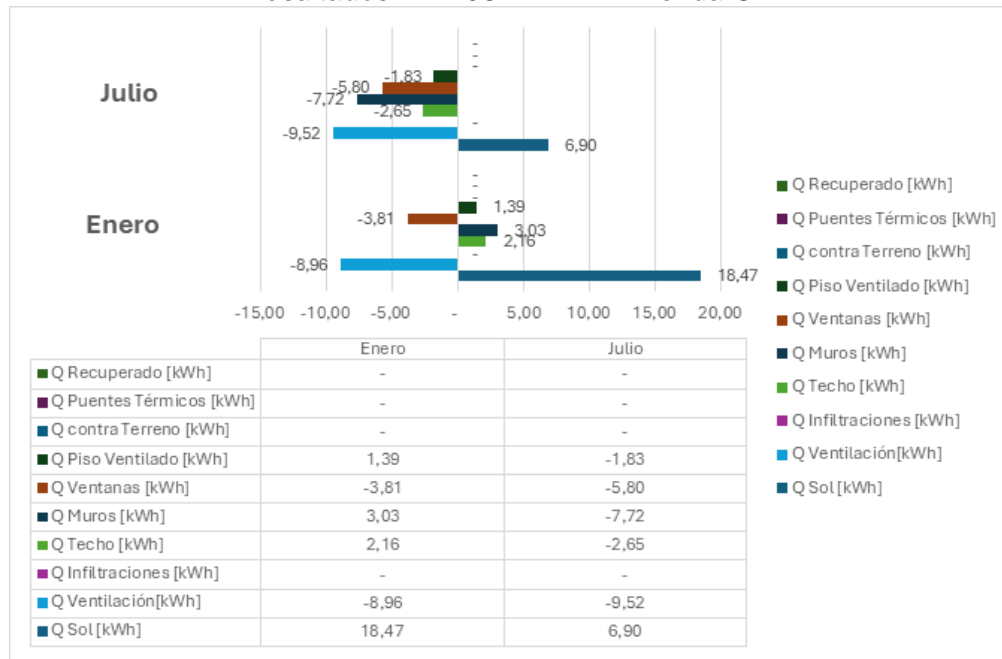
Caso	Demanda Calefacción [kWh-año]	Demanda Refrigeración [kWh-año]	Demanda Calefacción [kWh/m2-año]	Demanda Refrigeración [kWh/m2-año]	% ahorro Demanda Calefacción	% ahorro Demanda Refrigeración	Demanda Total [kWh/m2-año]	% Ahorro Total [kWh/m2-año]	Letra
Caso Base Oficial	6.682,0	1.623,5	150,8	36,6	no aplica	no aplica	187,40		
Caso Estudio	2.206,1	1.261,4	49,8	28,5	67%	22%	78,2	58%	B

Caso (con un máximo x 12 meses) Total	Horas Disconfort frío HD (-)	Horas Disconfort calor HD (+)	Tiempo en Disconfort del total HD (-)	Tiempo en Disconfort del total HD (+)
Caso Base	142,3	55,5	49%	19%
Caso Estudio	123,0	86,0	43%	30%

Fuente: 03 PBTB datos equipos y resultados,2024.

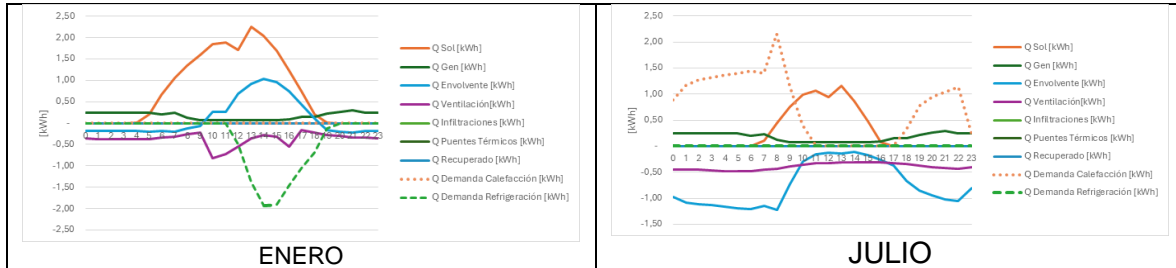
Las ganancias y pérdidas acumuladas de la envolvente, clasificadas por categoría, para un día representativo [kWh], en los meses de julio y enero, se muestran en los resultados de la Ilustración N°8 y se grafican en la Ilustración N°9. Los flujos energéticos acumulados mensuales, obtenidos mediante la herramienta de balance térmico dinámico, indican un flujo de 2,16 kWh en enero y -2,65 kWh en julio, correspondientes a la techumbre. Estos valores reflejan el impacto de las condiciones climáticas de cada mes sobre el comportamiento térmico de la vivienda.

Ilustración N°8: Flujo Energético acumulados mensuales, grafico 3 de planilla de resultados BTB 03.-PBTB- Vivienda CE.



Fuente: 03 PBTB datos equipos y resultados, CE,2024.

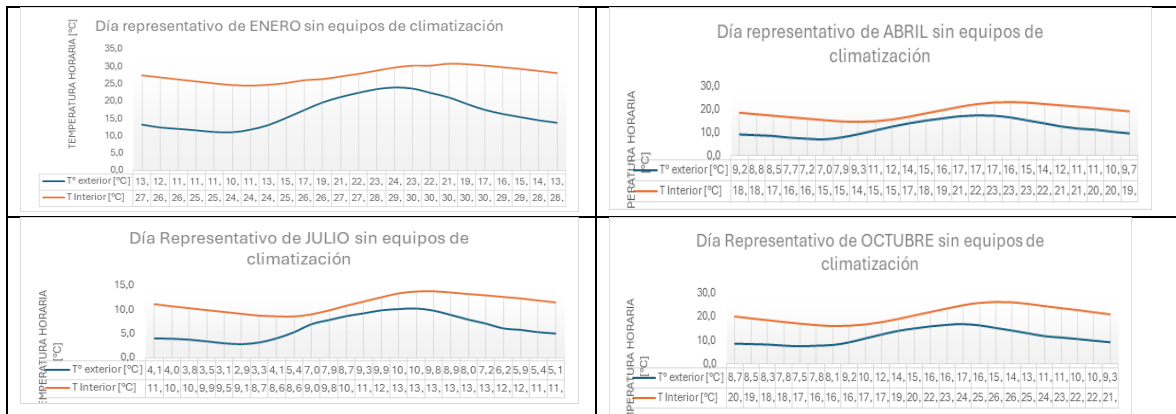
Ilustración N°9: Flujos energéticos en una vivienda en Enero-Julio, grafico 4 de planilla de resultados BTD, Vivienda CE



Fuente: 03 PBTB datos equipos y resultados, CE,2024.

Durante las estaciones de invierno y verano, las temperaturas medias exteriores fluctúan entre 14°C y 30°C, mientras que las temperaturas interiores varían entre 10°C y 23°C, respectivamente. Las temperaturas más altas se registran en el mes de enero, y las más bajas en julio, como se observa en los gráficos de la Ilustración N°10. Estos gráficos corresponden a un día representativo de los meses de enero, abril, julio y octubre, sin la intervención de equipos de climatización, y se presentan en el gráfico 6 de la planilla de resultados BTD 03.-PBTB- Vivienda Caso Estudio.

Ilustración N°10: Día representativo de Enero– Abril – Julio - Octubre sin equipos de climatización, grafico 6 de planilla de resultados BTD Vivienda CE.



Fuente: 03 PBTB datos equipos y resultados, CE,2024.

3.3.2.- Resultados Propuesta 1

Se observa que la vivienda, con las condiciones constructivas de la propuesta 1, mantiene una calificación energética de letra B, ya que su demanda energética teórica total es de 77,2 kWh/m²-año, siendo la mayor parte de esta demanda atribuida a calefacción, con 48,8 kWh/m²-año, mientras que la demanda de refrigeración alcanza los 28,3 kWh/m²-año, de acuerdo con las especificaciones constructivas de la vivienda, como se muestran en la tabla 6 planilla resumen de balance térmico dinámico.

Además, se observa que la vivienda experimenta un total de 211 horas de desconfort térmico, de las cuales 123 horas (el 43% del tiempo) corresponden a HD(-) y 88 horas (el 31% del tiempo) a HD(+), aumentando 2 horas de sobrecalentamiento con respecto a las horas de HD(+) obtenidas en caso de estudio, como se visualiza en tabla N°6

Los flujos energéticos acumulados mensuales, obtenidos mediante la herramienta de balance térmico dinámico, muestran un flujo de 2,15 kWh en enero y -2,38 kWh en julio, correspondientes a la techumbre, y se visualizan en la Ilustración N°11. Estos valores reflejan el impacto de las condiciones climáticas de cada mes sobre el comportamiento térmico de la vivienda, en comparación con el Caso de Estudio, evidenciando una variación de mejoras en el comportamiento térmico debido a las modificaciones implementadas.

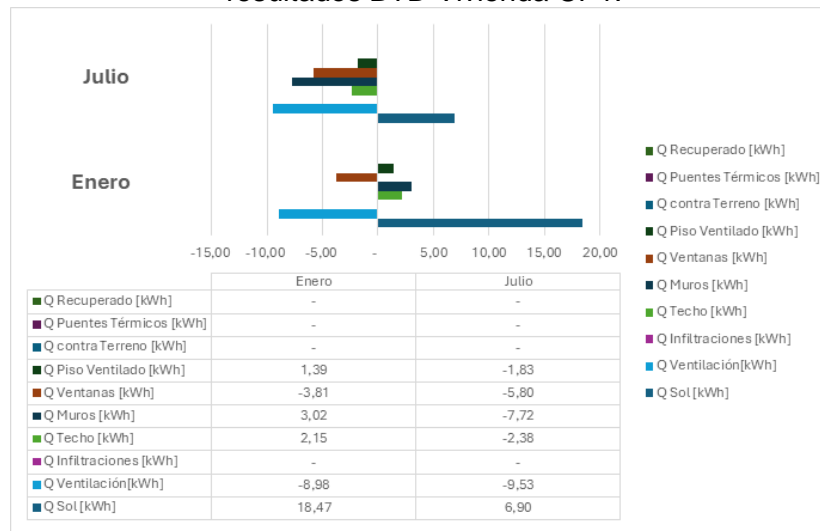
Tabla N°6: Resultados de plantilla BTd Vivienda CP1, Caso Propuesto 1.

Caso	Demanda Calefacción [kWh-año]	Demanda Refrigeración [kWh-año]	Demanda Calefacción [kWh/m2-año]	Demanda Refrigeración [kWh/m2-año]	% ahorro Demanda Calefacción	% ahorro Demanda Refrigeración	Demanda Total [kWh/m2-año]	% Ahorro Total [kWh/m2-año]	Letra
Caso Base Oficial	6.682,0	1.623,5	150,8	36,6	no aplica	no aplica	187,40	59%	B
Caso Propuesto 1	2.165,0	1.255,2	48,8	28,3	68%	23%	77,2		

Caso (con un máximo de 12 meses) Total	Horas Disconfort frío HD (-)	Horas Disconfort calor HD (+)	Tiempo en Disconfort del total HD (-)	Tiempo en Disconfort del total HD (+)
Caso Base Oficial	142,3	55,5	49%	19%
Caso Propuesto 1	123,0	88,0	43%	31%

Fuente: 03 PBTD datos equipos y resultados, C1,2024.

Ilustración N°11: Flujo Energético acumulados mensuales, grafico 3 de planilla de resultados BTd Vivienda CP1.



Fuente: 03 PBTD datos equipos y resultados, C1,2024.

3.3.3.- Resultados Propuesta 2

Su demanda energética teórica total es de 76,6 kWh/m²-año, siendo la mayor parte de esta demanda atribuida a calefacción, con 48,4 kWh/m²-año, mientras que la demanda de refrigeración es de 28,3 kWh/m²-año, según las condiciones constructivas especificadas para la vivienda, como se muestran en la tabla N°7 planilla resumen de balance térmico dinámico.

Además, se observa que la vivienda experimenta un total de 211 horas de desconfort, distribuidas en 123 horas (43% del tiempo) de HD(-) y 88 horas (31% del tiempo) de HD(+), al igual que los resultados de la propuesta 1, también aumento 2 horas de sobrecalentamiento en la vivienda con respecto a las horas de HD(+), obtenidas en caso de estudio, como se visualiza en tabla N°7.

Los flujos energéticos acumulados mensuales, obtenidos mediante la herramienta de balance térmico dinámico, muestran un flujo de 2,15 kWh en enero y -2,25 kWh en julio, correspondientes a la techumbre, y se visualizan en la Ilustración N°12. Estos resultados evidencian una mejora en el comportamiento térmico durante el mes de julio, atribuible a las modificaciones implementadas, en comparación con la Propuesta 1.

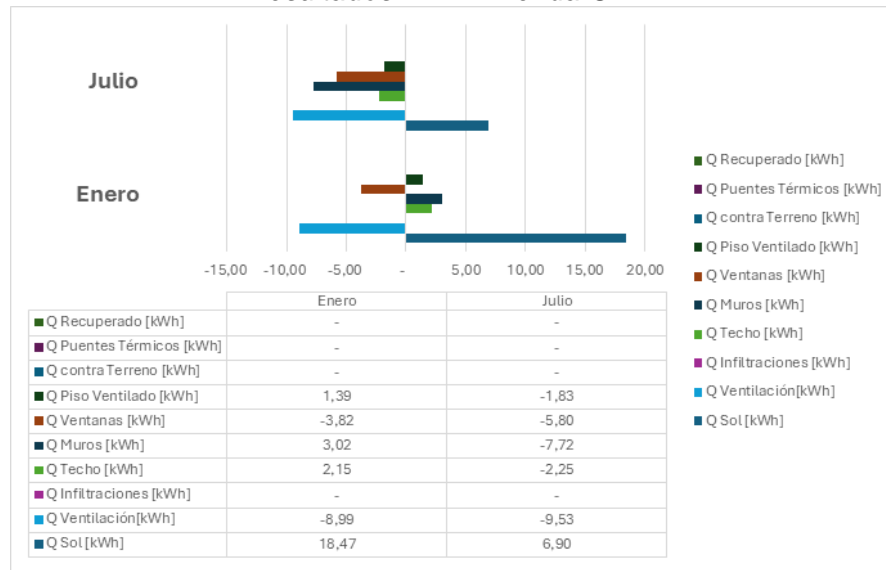
Tabla N°7: Resultados de plantilla BTD Vivienda CP2, Caso Propuesto 2.

Caso	Demanda Calefacción [kWh-año]	Demanda Refrigeración [kWh-año]	Demanda Calefacción [kWh/m ² -año]	Demanda Refrigeración [kWh/m ² -año]	% ahorro Demanda Calefacción	% ahorro Demanda Refrigeración	Demanda Total [kWh/m ² -año]	% Ahorro Total [kWh/m ² -año]	Letra
Caso Base Oficial	6.682,0	1.623,5	150,8	36,6	no aplica	no aplica	187,40		
Caso Propuesto 2	2.144,8	1.252,2	48,4	28,3	68%	23%	76,6	59%	B

Caso (con un máximo de x 12 meses) Total	Horas Disconfort frío HD (-)	Horas Disconfort calor HD (+)	Tiempo en Disconfort del total HD (-)	Tiempo en Disconfort del total HD (+)
Caso Base Oficial	142,3	55,5	49%	19%
Caso Propuesto 2	123,0	88,0	43%	31%

Fuente: 03 PBTB datos equipos y resultados, C2,2024.

Ilustración N°12: *Flujo Energético acumulados mensuales, grafico 3 de planilla de resultados BTD Vivienda CP2.*



Fuente: 03 PBDT datos equipos y resultados, C2,2024.

3.3.4.- Resultados Propuesta 3

Se observa que la vivienda, con las condiciones constructivas de la propuesta 3, mantiene una calificación energética de letra B, ya que su demanda energética teórica total es de 75,6 kWh/m²·año, siendo la mayor parte de esta demanda atribuida a calefacción, con 47,5 kWh/m²·año, mientras que la demanda de refrigeración es de 28,1 kWh/m²·año, como se muestran en la tabla N°8 planilla resumen de balance térmico dinámico.

Además, como se puede observar en la tabla N°8, la vivienda experimenta un total de 210 horas de discomfort térmico, distribuidas en 122 horas (43% del tiempo) de HD(-) y 88 horas (31% del tiempo) de HD(+). Se evidencia un aumento de 2 horas de sobrecalentamiento en comparación con las 86 horas registradas en la vivienda caso de estudio. Sin embargo, también se observa una disminución de 1 hora en (HD-) respecto a las 123 horas obtenidas en el caso de estudio. Estos resultados sugieren que las mejoras implementadas fueron más efectivas para controlar el confort térmico en condiciones de temperaturas frías que en situaciones de sobrecalentamiento.

Los flujos energéticos acumulados mensuales, obtenidos mediante la herramienta de balance térmico dinámico, muestran un flujo de 2,14 kWh en enero y -1,99 kWh en julio, correspondientes a la techumbre, y se visualizan en la Ilustración N°13. Estos resultados evidencian una mejora en el comportamiento térmico durante el mes de julio, con una diferencia de mejora en 0,26 kWh, atribuible a las modificaciones implementadas alta emisividad en cámara de aire no ventilada, en comparación con la Propuesta 2.

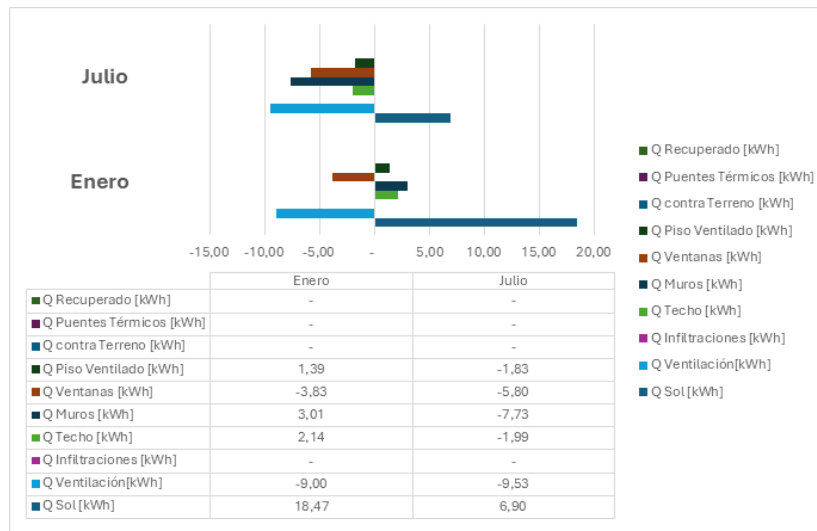
Tabla N°8: Resultados de plantilla BT-D-Vivienda CP3, Caso Propuesto 3.

Caso	Demanda Calefacción [kWh-año]	Demanda Refrigeración [kWh-año]	Demanda Calefacción [kWh/m2-año]	Demanda Refrigeración [kWh/m2-año]	% ahorro Demanda Calefacción	% ahorro Demanda Refrigeración	Demanda Total [kWh/m2-año]	% Ahorro Total [kWh/m2-año]	Letra
Caso Base Oficial	6.682,0	1.623,5	150,8	36,6	no aplica	no aplica	187,40	60%	B
Caso Propuesto 3	2.105,3	1.246,6	47,5	28,1	68%	23%	75,6		

Caso (con un máximo de x 12 meses) Total	Horas Disconfort frío HD (-)	Horas Disconfort calor HD (+)	Tiempo en Disconfort del total HD (-)	Tiempo en Disconfort del total HD (+)
Caso Base	142,3	55,5	49%	19%
Caso Propuesto 3	122,0	88,0	42%	31%

Fuente: 03 PBT-D datos equipos y resultados, C3,2024.

Ilustración N°13: Flujo Energético acumulados mensuales, grafico 3 de planilla de resultados BT-D -Vivienda CP3.



Fuente: 03 PBT-D datos equipos y resultados, C3,2024.

3.3.5.- Análisis flujo energético.

El análisis de los flujos energéticos que impacta en la vivienda en función de las estaciones de verano (Enero) y en invierno (Julio), donde las ganancias y pérdidas de energía son un aspecto que afecta a la vivienda en términos de confort térmico.

El flujo de energía ganada en el mes de enero, positivo, son bastante similares entre todos los casos propuestos y el caso de estudio, con pequeñas variaciones. No se observa una mejora considerable en los tres casos propuestos respecto al caso de estudio, ya que los valores de flujo energético están muy cercanos, donde en los casos propuestos 1 y 2 tienen una reducción de un 0,46%, y en cambio la propuesta 3 es la más favorable alcanzando un 0,92% de reducción, lo que hace más eficiente para reducir la ganancia de calor en el

verano, ayudando a mantener la vivienda más fresca y lograr un mejor control de la temperatura interior de la vivienda durante el mes más caluroso.

En julio, la pérdida de energía es generalmente deseable para mantener el calor dentro de la vivienda, minimizando la fuga de calor hacia el exterior. Por lo tanto, menos pérdida de energía, y en este caso, se observa que el caso propuesto 1 y 2, estos casos muestran una pequeña mejora en la reducción de la pérdida de energía con 2,98% y 4,26%, respectivamente, y la mejora es más notable, especialmente en el Caso Propuesto 3, que muestra una reducción del 15.32% en la pérdida de energía. Esto sugiere que, en términos de eficiencia térmica y energética, el Caso Propuesto 3 es el más eficiente para reducir las pérdidas de energía del techo, lo que contribuiría a mantener el calor dentro de la vivienda.

Tabla N°9: *Resumen flujo Energético acumulados mensuales, grafico 3 de planilla de resultados BTD Viviendas.*

Componente	Caso Estudio [kWh]	Caso Propuesto 1 [kWh]	Caso Propuesto 2 [kWh]	Caso Propuesto 3 [kWh]
Q Techo Enero	2,16	2,15	2,15	2,14
Q Techo Julio	-2,35	-2,28	-2,25	-1,99

Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.3.6.- Análisis comparativo y resultados:

3.3.6.1.- Transmitancia térmica de la techumbre.

La transmitancia térmica de la techumbre en el Caso de Estudio es de 0,31 W/m²·K, mientras que en el Caso Propuesto 3, tras la implementación de una cámara de aire de alta emisividad, se reduce a 0,26 W/m²·K, como se muestra en tabla N°10. Esta mejora en la transmitancia térmica refleja una mayor capacidad de aislamiento térmico en el Caso Propuesto 3, lo que implica una menor transferencia de calor entre el interior y el exterior de la vivienda. La inclusión de la cámara de aire actúa como un eficiente sistema de aislamiento, contribuyendo a un mejor rendimiento térmico, lo que a su vez puede generar ahorros energéticos significativos al reducir las demandas de calefacción y refrigeración.

Tabla N°10: *Transmitancia térmica de envoltente de techumbre, de caso estudio y casos propuestos.*

Componente	Caso Estudio Valor U (W/m2K)	Caso Propuesto 1 Valor U (W/m2K)	Caso Propuesto 2 Valor U (W/m2K)	Caso Propuesto 3 Valor U (W/m2K)	Referencia Valor U de acuerdo con Zona Térmica	Cumple nueva Norma Térmica (Si / No)
Techo Tipo 1	0,31	0,29	0,28	0,26	0,33	SI

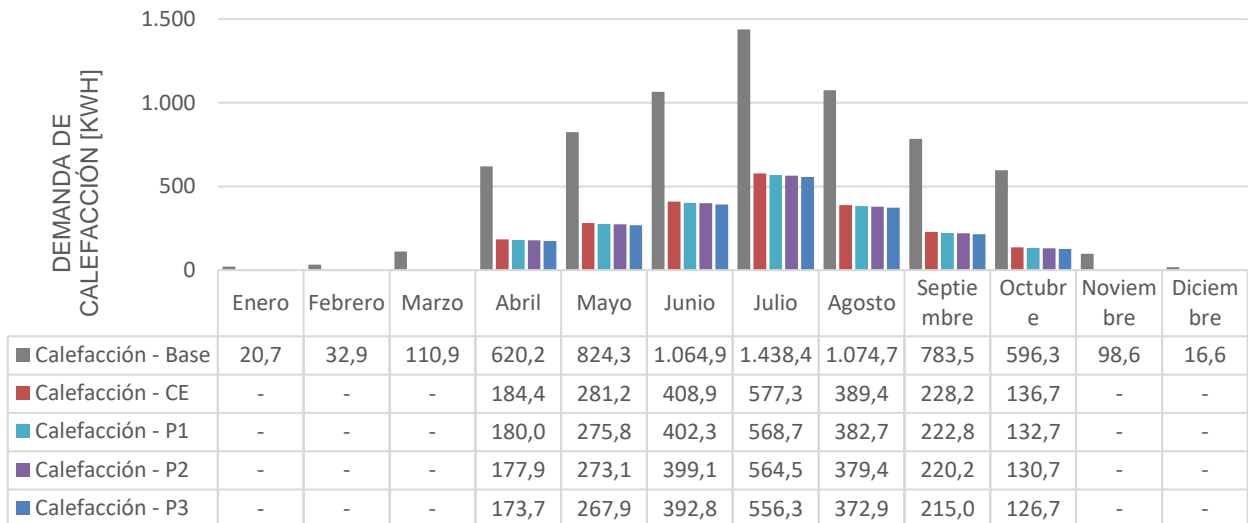
Fuente: Elaboración propia, 2024.

3.3.6.2.-Comparativa de Demanda Energética:

Las demandas mensuales de calefacción calculadas, que se muestran en la Ilustración N°14, que presentan un valor mínimo de 136,7 kWh en el mes de octubre y un valor máximo de 577,3 kWh en el mes de julio, del caso de estudio, mientras que la propuesta 3 existe una evidente disminución con una mínima de 126,7 kWh y 556,3 kWh, en los respectivos meses.

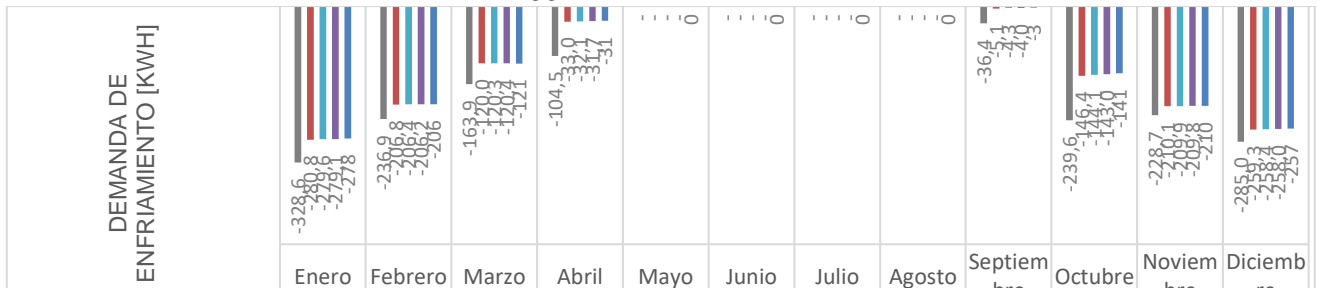
Por otro lado, las demandas mensuales de enfriamiento, representadas en la Ilustración N°15, alcanzan un valor de -280,8 kWh en el mes de enero y -5,1 kWh en septiembre del caso de estudio, evidenciando una disminución por la propuesta 3 con una mínima de -278,1 kWh y -3,3 kWh, en los respectivos meses. Estos valores reflejan las necesidades energéticas para calefacción y enfriamiento en función de las condiciones climáticas específicas de cada mes, donde la propuesta 3 demuestran un ahorro energético evidente al estar por debajo de lo exigido por el estándar, reflejado en los respectivos gráficos de demanda de calefacción y enfriamiento de caso base, lo mínimo exigido en la herramienta de CEV.

Ilustración N°14: Resumen de demanda de calefacción mensual, planilla de resultados 03-PBTD.



Fuente: Elaboración propia, 2024.

Ilustración N°15: Resumen demanda de enfriamiento mensual, planilla de resultados BTD 03.-PBD.



DEMANDA DE ENFRIAMIENTO [KWH]	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
■ Refrigeración - Base	-328,6	-236,9	-163,9	-104,5	-	-	-	-	-36,4	-239,6	-228,7	-285,0
■ Refrigeración - CE	-280,8	-206,8	-120,0	-33,0	-	-	-	-	-5,1	-146,4	-210,1	-259,3
■ Refrigeración - P1	-279,6	-206,4	-120,3	-32,1	-	-	-	-	-4,3	-144,1	-209,9	-258,4
■ Refrigeración - P2	-279,1	-206,2	-120,4	-31,7	-	-	-	-	-4,0	-143,0	-209,8	-258,0
■ Refrigeración - P3	-278,1	-205,9	-120,7	-30,8	-	-	-	-	-3,3	-140,9	-209,6	-257,3

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La demanda total de energética del Caso de Estudio es de 78,2 kWh/m²-año, mientras que en el Caso Propuesto 3 se observa una reducción a 75,6 kWh/m²-año. Esta disminución refleja una mejora en la eficiencia energética del sistema, lo que indica que la propuesta implementa medidas que optimizan el consumo energético en comparación con el caso de estudio, que incluso ya posee un estándar alto. La diferencia de 2,6 kWh/m²-año destaca un ahorro significativo en la demanda total, evidenciando el impacto positivo de las modificaciones introducidas en el diseño propuesto, mejorando un 4,6% en su demanda de calefacción y un 1,4% en su demanda de refrigeración, que se detallan en la Tabla 11, que resume la demanda energética por calefacción y refrigeración.

Tabla N°11: Resumen de demanda energética por calefacción y refrigeración, de caso estudio y casos propuestos.

Caso	Demanda Calefacción (kWh/m ² -año)	Diferencia porcentual en Calefacción, con respecto a CE	Demanda Refrigeración (kWh/m ² -año)	Diferencia porcentual en Refrigeración, con respecto a CE	Demanda Total (kWh/m ² -año)	Letra
CE	49,8	--	28,5	--	78,2	B
P1	48,8	2,0%	28,3	0,70%	77,2	B
P2	48,4	2,8%	28,3	0,70%	76,6	B
P3	47,5	4,6%	28,1	1,40%	75,6	B

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con el análisis de resultados, con respecto a las mejoras incorporadas en la vivienda con una “Propuesta 3” respecto al “Caso Estudio”, y cómo afecta o impacta en la transmitancia térmica y en el confort térmico de la vivienda, la incorporación de una cámara de aire no ventilada en la techumbre de dos aguas con cielo inclinado de una vivienda industrializada en madera ubicada en la zona E.

a.- Transmitancia Térmica

Impacta en la vivienda una mejora en la transmitancia térmica de la envolvente alcanzando un 16,13%, pasando de un valor U de 0,31 W/m²·K a 0,26 W/m²·K. Esta mejora permite alcanzar un valor de U máximo que amplía las zonas térmicas en las que se puede utilizar como solución constructiva especificada en los proyectos arquitectónicos, conforme a la zonificación térmica establecidos en la norma chilena 1079. Según la reglamentación térmica vigente, el complejo de techumbre cumple para zona E, como caso de estudio, y como también puede cubrir un rango de zonas térmicas que va desde la zona A hasta la zona G, con valores de transmitancia térmica que varían entre 0,84 y 0,28 W/m²·K, respectivamente, y detallada en la tabla N°12, de la tabla 10 de transmitancia térmica U máxima y resistencia térmica Rt mínima para complejos de techumbre, muros perimetrales, piso ventilado y puertas opacas, en la nueva reglamentación térmica que va de la zona A a la zona I (Reglamento térmico, 2024).

Tabla N°12: Resumen de las zonas que la transmitancia térmica U máxima para complejos de techumbre cumple propuesta 3.

Zona	Valor U	Propuesta 3
A	0,84	0,26
B	0,47	0,26
C	0,47	0,26
D	0,38	0,26
E	0,33	0,26
F	0,28	0,26
G	0,28	0,26
H	0,25	N/C
I	0,25	N/C

Fuente: Elaboración propia, 2024.

b.- Confort térmico

b.1.- Flujo energéticos

En términos de ganancia de energía, el caso propuesto 3 muestra una mejora del 0.92%, lo que significa que reduce ligeramente la cantidad de energía ganada en comparación con el caso base. Esta pequeña reducción ayuda a evitar el sobrecalentamiento durante el verano, contribuyendo a mantener la vivienda más fresca. Y en términos de pérdida de energía, muestra una mejora significativa del 15.32%, lo que indica que reduce considerablemente la cantidad de energía perdida hacia el exterior en invierno. Esto

contribuye a un mejor aislamiento térmico, manteniendo la vivienda más cálida durante los meses fríos.

El Caso Propuesto 3 ofrece un rendimiento superior en ambos aspectos clave, control de la temperatura en verano y conservación del calor en invierno, en comparación con el caso estudio, lo que lo convierte en una opción más eficiente y cómoda para optimizar el comportamiento térmico de la vivienda a lo largo del año.

b.2.-Confort térmico con respecto a la demanda de calefacción y enfriamiento

En cuanto a la demanda de calefacción y refrigeración, se observa una mejora en el rendimiento energético de la vivienda. La demanda de calefacción disminuye de 2.206,1 kWh/año a 2.105,3 kWh/año, lo que representa una reducción del 4,57%. Por otro lado, la demanda de refrigeración experimenta una disminución, pasando de 1.261,4 kWh/año a 1.246,6 kWh/año, lo que equivale a una reducción del 1,18%. Al comparar la vivienda "Caso Estudio" con el "Caso Propuesto 3", se observa que la demanda energética general disminuye de 78,2 kWh/m²-año a 75,6 kWh/m²-año, lo que implica una reducción del 3,32% en su consumo total. A pesar de esta mejora, la vivienda mantiene su calificación energética en la letra B, reflejando una eficiencia energética aún destacable dentro de su clasificación.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, las mejoras incorporadas en el "Caso Propuesta 3" respecto al "Caso Estudio" han demostrado un impacto positivo en varios aspectos clave de la eficiencia energética de la vivienda. La mejora en la transmitancia térmica de la envolvente, con una reducción del valor U de 0,31 W/m²-K a 0,26 W/m²-K, con 16,13% de mejora respecto al caso de estudio, que ha permitido optimizar el aislamiento térmico y ampliar las zonas térmicas de la vivienda, cumpliendo con la normativa vigente y mejorando la eficiencia energética global.

Los resultados de los flujos energéticos también reflejan mejoras, especialmente en las pérdidas de calor durante el mes de julio, donde se redujeron un 15,3%, mientras que en enero las ganancias por flujo térmico mostraron una ligera disminución, indicando una optimización en la retención de calor.

En términos de demanda energética, la vivienda experimentó una reducción tanto en calefacción como en refrigeración, con una disminución total de la demanda energética de 3,32%. Aunque la calificación energética se mantuvo en la letra B, esta mejora indica un rendimiento más eficiente. Finalmente, aunque el tiempo de desconfort térmico por calor aumentó ligeramente, el tiempo de desconfort por frío disminuyó levemente, lo que sugiere que las mejoras fueron más efectivas para controlar el confort térmico en condiciones de temperaturas frías que en situaciones de sobrecalentamiento. En conjunto, estas mejoras demuestran un avance hacia una mayor eficiencia energética, aunque aún quedan áreas de oportunidad para optimizar el confort térmico en todos los climas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Attia, S., Eleftheriou, P., Xeni, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., & Hidalgo-Betanzos, J. M. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155, 439-458
2. Anon, Simplified Energy Balances, European commission (2021), https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_s/default/table?lang=en
3. Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., & Pulido-Arcas, J. A. (2020). Energy saving potential in current and future world built environments based on the adaptive comfort approach. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119306. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119306>
4. S. Colclough, O. Kinnane, N. Hewitt, P. Griffiths. (2018). Investigation of nZEB social housing built to the Passive House standard *Energy Build.*, 179, pp. 344-359, 10.1016/j.enbuild.2018.06.069.
5. Consejo de Construcción Industrializada, CCI, (2021), "Metodología para la Construcción Industrializada"
6. Dear, R., y Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>
7. European Commission, (2011). A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050 (Brussels, Belgium).
8. Hagentoft C.E. and Pallin S, (2021). A conceptual model for how to design for building envelope characteristics. Impact of thermal comfort intervals and thermal mass on commercial buildings in U.S. climates *J. Build. Eng.*, 35 (November 2020) (2021), Article 101994, 10.1016/j.jobe.2020.101994.
9. Han J. , Lu L., Yang H.(2009), Investigación sobre el rendimiento térmico de diferentes estructuras de cubiertas ligeras y su efecto sobre la carga de refrigeración del espacio. *Appl Therm. Eng.*, 29 (11–12) (2009) , págs. 2491-2499, 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.024
10. Instituto Nacional de Normalización (INN). (2007). Norma Chilena NCh853: Acondicionamiento térmico - Requisitos de acondicionamiento térmico para edificios. Santiago, Chile: POSADA.
11. Kong et al., 2022 Kong X., Chang Y., Li N., Li H., Li W. Comparison study of thermal comfort and energy saving under eight different ventilation modes for space heating *Build. Simul.*, 15 (7) (2022), pp. 1323-1337, 10.1007/s12273-021-0814-7
12. Mata, É., Sasic Kalagasidis, A., & Johnsson, F. (2010). Retrofitting measures for energy savings in the Swedish residential building stock—assessing methodology. In 11th International Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes

-
- of Whole Buildings, Buildings XI; Sheraton Sand Key Resort in Clearwater Beach Clearwater; United States; 5 December 2010 through 9 December 2010.
13. Manual CES. Manual Certificación Edificio Sustentable Versión 1, 2014. (<https://www.calificacionenergetica.cl/como-se-obtiene-la-letra-de-la-calificacion-energetica/>)
 14. Manual de ASHRAE. (2017). Fundamentos. Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado. Atlanta, GA: ASHRAE.
 15. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Chile), 2018, Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas en Chile.
 16. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Chile), 2019, Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas en Chile.
 17. Ministerio de Energía (Chile), 2017. Energía 2050. Política Energética de Chile.
 18. Ministerio de Energía (Chile), 2021, Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026.
 19. NCh 853 Of. 2007 “Acondicionamiento térmico – Envoltura Térmica de Edificios– Cálculos de resistencias y transmitancias térmicas”.
 20. NCh1973/2014. Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción – Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial – Métodos de cálculo.
 21. NCh 1079.Of 2008. Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.
 22. Pérez-Fargallo, A., Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., Gallego-Maya, I., & Guevara-García, F. J. (2018). Influence of Adaptive Comfort Models on Energy Improvement for Housing in Cold Areas. *Sustainability*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su10030859>
 23. Pérez *et al.*, 2022 Pérez G., Coma J., Chàfer M., Cabeza L.F. Seasonal influence of leaf area index (LAI) on the energy performance of a green facade Build. Environ., 207 (June 021) (2022), 10.1016/j.buildenv.2021.108497
 24. Retrofoam Company, 2021 Empresa Retrofoam RetroFoam de la Costa del Golfo (2021) <https://www.gulfcoastrofoam.com/>
 25. Stern, P.C., Janda, K.B., Brown, M.A., Steg, L., Vine, E.L., Lutzenhiser, L., 2016. Opportunities and insights for reducing fossil fuel consumption by households and organizations. *Nat. Energy* 1. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.43>.

-
26. Sun *et al.*, 2021 Sun Y., Wilson R., Liu H., Wu Y. Numerical investigation of a smart window system with thermotropic parallel slat transparent insulation material for building energy conservation and daylight autonomy *Build. Environ.*, 203 (2021), Article 108048, 10.1016/j.buildenv.2021.108048
27. Zhu *et al.*, 2022 Zhu L., *et al.* Uncertainty and sensitivity analysis of cooling and heating loads for building energy planning *J. Build. Eng.*, 45 (2021) (2022), Article 103440, 10.1016/j.job.2021.103440