OPTIMIZACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO DE UNA CASA ECOLÓGICA: MODELAMIENTO EN OPENFOAM DE MUROS SANDWICH CON AISLANTE DE ICHU (STIPA ICHU)

Recibido 03/03/2026
Aceptado 27/05/2026

OPTIMIZATION OF THE THERMAL COMFORT OF AN ECO-FRIENDLY HOUSE: OPEN FOAM MODELING OF SANDWICH-TYPE WALLS WITH ICHU (STIPA ICHU) INSULATION

OTIMIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO DE UMA CASA ECOLÓGICA: MODELAGEM NO OPENFOAM DE PAREDES SANDWICH COM ISOLAMENTO DE ICHU (STIPA ICHU)

Henry Javier-Ninahuaman (Autor de Correspondencia)
Doctor en Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible
Docente, Facultad de Ingenieria, Escuela Profesional de Ingenieria Agroindustrial
Universidad Tecnológica del Perú
Huancayo, Perú
https://orcid.org/0000-0002-3864-4181
C21259@utp.edu.pe

Jose Rojas-Guillén
Doctor en Ciencias de la Educación
Docente, Departamento de Ingeniería
Universidad Tecnológica del Perú
Huancayo, Perú
https://orcid.org/0009-0002-3210-0762
c27875@utp.edu.pe

Kenny Montalvo-Morales
Magíster en agronegocios
Docente, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma
Tarma, Perú
https://orcid.org/0000-0003-4403-4360
kmontalvo@unaat.edu.pe

Grimaldo Quispe-Santivañez
Doctor en Ingeniería
Docente e investigador, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial
Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma
Tarma, Perú
https://orcid.org/0000-0001-6168-8935
gquispe@unaat.edu.pe

CC BY SA

Revista Hábitat Sustentable Vol. 16, N°. 1. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 56 - 69
https://doi.org/10.22320/07190700.2026.16.01.04

RESUMEN

El uso de materiales sostenibles es una alternativa importante para lograr el confort térmico en viviendas ubicadas en climas fríos. El estudio realiza un análisis por dinámica de fluidos computacional (CFD) en OpenFoam de una casa ecológica, con el fin de optimizar las paredes de tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) mediante la metodología de superficie de respuesta en un diseño central completo, para lograr confort térmico en entornos de frío extremo mediante el índice de predicción de voto medio (PMV). La evaluación recogió datos de una estación meteorológica in situ, los validó, simuló y predijo su desempeño a temperaturas ambientales de frío extremo. Los resultados indican el grosor de pared óptimo para el confort térmico en la casa ecológica con temperaturas externas de -10 °C y -20 °C y, además, explican los efectos complejos del comportamiento de la temperatura externa sobre el PMV. EL estudio proporciona las medidas mínimas óptimas de la pared tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) que logran preservar el confort térmico.

Palabras clave
aislamiento térmico, materiales de construcción, dinámica de fluidos computacional, bioclimatismo, vivienda rural

ABSTRACT

The use of sustainable materials is an important means of achieving thermal comfort in homes in cold climates. The study performs CFD (computational fluid dynamics) analysis in OpenFOAM of an eco-friendly house to optimize the sandwich-type walls (wood chipboard/stipa ichu/wood chipboard) using response surface methodology in a complete central design, to achieve thermal comfort in extreme cold environments using the PMV average vote prediction index. The evaluation collected data from an on-site weather station, validated it, simulated it, and predicted its performance at extreme cold ambient temperatures. The results indicate the optimal wall thickness for thermal comfort in the eco-friendly house at external temperatures of -10 °C and -20 °C, and explain the complex effects of external temperature on PMV. The study concludes by providing the optimal minimum dimensions of the sandwich-type wall (wood chipboard/stipa ichu/wood chipboard) that preserve thermal comfort.

Keywords
thermal insulation, construction materials, computational fluid dynamics, bioclimatism, rural housing

RESUMO

O uso de materiais sustentáveis constitui uma alternativa importante para garantir o conforto térmico em residências localizadas em climas frios. O presente estudo realiza uma análise por dinâmica de fluidos computacional (CFD) no programa OpenFoam de uma casa ecológica, com o objetivo de otimizar as paredes do tipo sanduíche (madeira/ichu/madeira) por meio da metodologia de superfície de resposta em um projeto central completo, para alcançar o conforto térmico em ambientes extremamente frios, utilizando o índice de previsão de votação média (PMV). A avaliação coletou dados de uma estação meteorológica in situ, validou-os, simulou-os e previu seu desempenho em condições de temperatura ambiente extremamente baixa. Os resultados indicam a espessura ideal da parede para o conforto térmico na casa ecológica em contextos com temperaturas externas de -10 °C e -20 °C, além de explicar os efeitos complexos do comportamento da temperatura externa sobre o PMV. O estudo fornece as medidas mínimas ideais para paredes do tipo sanduíche capazes de preservar o conforto térmico.

Palavras-chave
isolamento térmico, materiais de construção, dinâmica de fluidos computacional, bioclimatismo, habitação rural

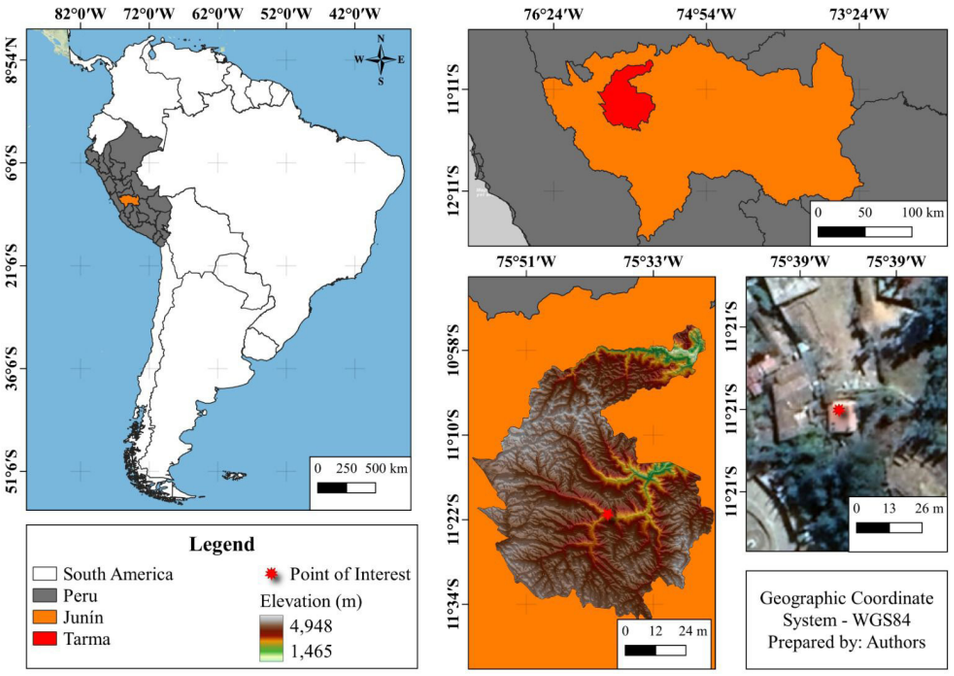


Figura 1. Ubicación de la unidad experimental: casa ecológica en Muruhuay - Perú. Fuente: Elaboración de los autores.

INTRODUCCIÓN

El confort térmico es un factor clave para garantizar condiciones de vida adecuadas y reducir la demanda energética en las viviendas de climas fríos, especialmente en regiones altoandinas, donde las temperaturas pueden descender drásticamente durante la noche, estas zonas constan de viviendas convencionales que suelen presentar problemas de aislamiento térmico, lo que aumenta la dependencia de fuentes de calefacción, que generan altos costos (Marchante González & González Santos, 2020). Estos costos energéticos son los causantes de la llamada pobreza energética, cuyos efectos sobre la salud y la economía de los habitantes está ampliamente documentada (Hills, 2012).

El uso de materiales sostenibles y de origen local se presentan como una alternativa eficiente para mejorar el desempeño térmico de las construcciones (Ortiz Caicedo et al., 2023). En las zonas altoandinas de Perú o Bolivia se cuenta con el ichu (*Stipa ichu*), esta fibra es una gramínea autóctona de los Andes, crece en altitudes superiores a los 3500 m s.n.m. es un recurso clave para la construcción, la alimentación de ganado y la conservación del suelo. El ichu crece en suelos pobres y con escasa humedad, tolera temperaturas extremas, desde heladas hasta radiación solar intensa, además de ser resistente a vientos fuertes y precipitaciones (Charca et al., 2015). Sus fibras son ligeras, flexibles y de fácil manejo, son huecas lo que permite que el núcleo de aire estático en su interior le confiera baja conductividad térmica, pues actúan como micro-barreras térmicas que reducen la transferencia de calor por conducción, como resultado, permite la reducción de la pérdida de calor en climas fríos (Frías et al., 2020; Piñas et al., 2020).

A pesar de sus beneficios, el uso del ichu en la construcción aún presenta desafíos, especialmente en lo que respecta a la optimización de su volumen en el espesor. La falta de estudios técnicos detallados ha limitado su aplicación al tipo de construcciones tradicionales sin criterios cuantificables de eficiencia. Por ello, es necesario analizar su comportamiento térmico mediante herramientas avanzadas, que permitan evaluar su desempeño en diferentes configuraciones, este estudio propone la optimización del confort térmico por medio de la variación del espesor de las paredes de ichu en viviendas ecológicas mediante simulación CFD (Computational Fluid Dynamics) (Moreno-Casas et al., 2020).

METODOLOGÍA

La investigación tiene un flujo que inicia con las mediciones In-situ (temperatura y humedad), lo que permitió implementar el modelo y verificar la veracidad de la simulación, por lo que se procedió a la validación con el índice del error absoluto medio entre el Modelo CFD y la realidad. Posterior a ello se siguió el diseño estadístico para usar los datos de simulación de temperatura externa y grosores de pared para calcular el PMV y optimizar el confort térmico por Superficie de Respuesta (RSM).

La casa ecológica para el análisis del confort térmico y validación del modelo se localiza en el Centro Poblado

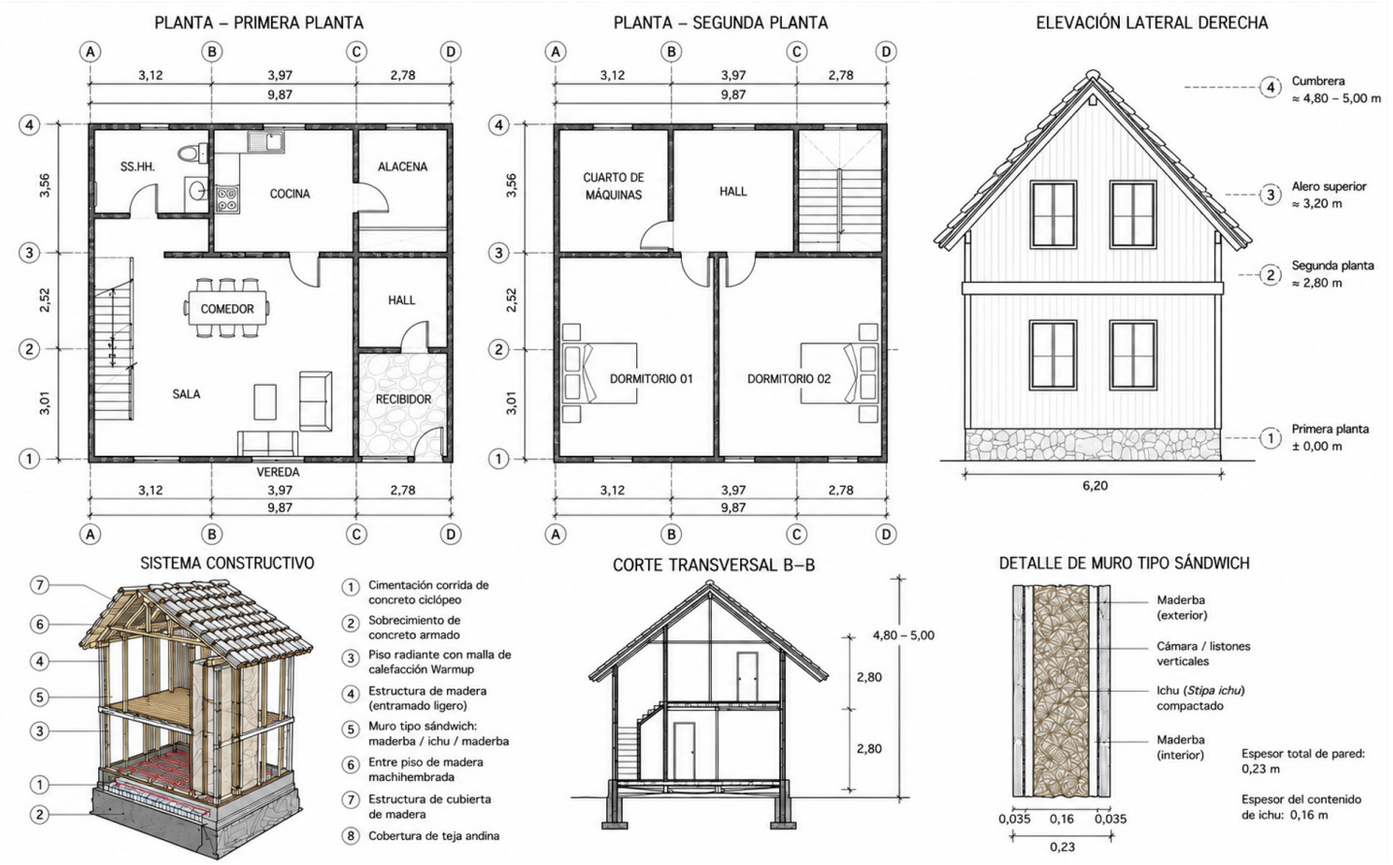


Figura 2. Esquema constructivo de la vivienda en estudio. Fuente: Elaboración por los autores.

Muruhuay de Tarma – Perú de coordenadas -11,347435 N; -75,652674 E (Figura 1).

La casa de estudio dispone de una construcción sostenible de dos niveles, el primero consta de sala-comedor, cocina, servicios higiénicos, hall y alacena; en el segundo nivel dos dormitorios y un cuarto de máquinas. Estructura de madera Huayruro reforzada con soportes de acero, las paredes y puertas son tipo sándwich (maderba/ichu/maderba) de 23 cm de espesor, el ichu fue recolectado en estado de madurez fisiológica, secado al natural a temperatura ambiente con contenido de humedad en equilibrio con el entorno (8-12% de humedad), tiene piso radiante con malla de calefacción warmup sobre una cama de viruta, el techado consta de una cumbrera de teja andina y por debajo tiene un cielo raso con triplay (Presidente de la Comisión Organizadora de la UNAAT, 2017). La dinámica del flujo de calor al interior se incrementa durante el día y disminuye durante la noche. La investigación asume orientación norte y ventanas de doble acristalamiento y representa a una vivienda real. La Figura 2 representa un esquema de la infraestructura de la casa en estudio.

Los escenarios consistieron en realizar las simulaciones de estado estacionario, que representan los escenarios fríos más críticos nocturnos, condiciones correspondientes a los valores extremos de diseño para la zona altoandina durante el solsticio de invierno, momento de temperaturas más bajas y radiación solar nula. Fueron evaluados diferentes espesores de paredes desde 7,75 cm a 57,2 cm, temperaturas externas de -27,4 °C a 15 °C. Se establecieron dos capas fijas de madera de 15 mm de espesor cada una, para mantener sus propiedades termofísicas constantes, dejando al espesor del núcleo de ichu como parámetro variable (de 4,75 cm a 54,2 cm), no se realizaron otros cambios en la estructura de la casa.

DESARROLLO DEL MODELO DE CONFORT TÉRMICO CFD EN OPEN FOAM

El confort térmico es la condición mental que expresa satisfacción con el entorno térmico (Fanger, 1970) y puede ser predicho por variables predictoras del ambiente. Los datos meteorológicos fueron recolectados por el equipo meteorológico (RK 900 05 marca RIKA) diariamente en intervalos de 15 minutos durante 4 meses (diciembre y enero de 2025; febrero y marzo de 2026), los sensores externos a la casa fueron ubicados a 3,78 m del piso paralelo a una de las ventanas ubicadas al norte y el sensor interno fue ubicado a 1,5 m de altura al interior de la parte central del hall principal en el primer nivel, estas ubicaciones ya fueron utilizadas por Marchante González & González Santos (2020), por sus efectos en personas de altura media , la evaluación de los vientos y ciclos térmicos en la ubicación de la unidad de

estudio. Los sensores enviaron los datos a un data logger inalámbrico, y fueron exportados a formatos csv para su procesamiento, de ellas, fueron tomadas muestras representativas reales para su diseño en CFD. Los datos fueron validados de acuerdo a las métricas estándar para evaluación de la diferencia entre CFD y las mediciones en campo, mediante el indicador de error absoluto medio (MAE) que fue de 10,6%, para la muestra de 40 observaciones *y* (y_i,,,2,3 … , n) y *40* predicciones (Hodson, 2022). Posterior a ello el procesamiento de los datos consistió en la determinación del índice de conductividad térmica de las paredes en función de los datos reales de la casa. Con esos datos se diseñaron las simulaciones, incluido el cálculo del PMV y la optimización de acuerdo al diseño experimental.

El dominio numérico en OpenFOAM fue construido al utilizar blockMesh, se definió un volumen de control que representó la sección trasversal del muro sándwich. Sobre la resolución mínima para la estabilidad numérica se siguieron los criterios de Tominaga et al. (2008) sobre la resolución mínima para la estabilidad numérica, el dominio fue dividido en tres bloques funcionales a lo largo del eje X, estos correspondieron a la configuración física del cerramiento (maderba/ichu/maderba). Cada bloque fue discretizado al inicio con una malla base de 10x10x10 celdas, de esta forma se aseguró la densidad de nodos suficiente en cada etapa. La garantía de precisión en la captura de los gradientes térmicos en las interfaces fue dada por el nivel de refinamiento 1 (Advanced Refinement) que acrecentó la resolución en las zonas con transición térmica. Los cálculos fueron realizados bajo los esquemas de segundo orden de Gauss linear y un esquema temporal de Euler implícito, de esta forma fue monitoreada la convergencia que alcanzó un residuo absoluto de 10^{-6} para la ecuación de la energía, suficiente para asegurar la estabilidad y validez de los resultados térmicos.

Es necesario señalar que la simulación CFD consideró una envolvente arquitectónica con alta hermeticidad, se omitieron las infiltraciones por carpinterías o rejillas de ventilación, con el propósito de evaluar el potencial máximo de aislamiento del panel de ichu que evita las interferencias de pérdidas. De esta forma los flujos creados obedecen exclusivamente a las gradientes de densidad que mueven el aire de un nivel inferior a uno superior.

DETALLES NUMÉRICOS DE LA SIMULACIÓN

Respecto al tipo de discretización espacial, fue empleada una malla estructurada compuesta por celdas hexaédricas, la malla consta de 3 bloques funcionales (capas del muro tipo sándwich). Los esquemas numéricos incluyeron: la derivada temporal de Euler; las gradientes mediante Gauss linear y el Laplaciano mediante Gauss linear corrected (esquema de segundo orden que incluyó una corrección para la no-ortogonalidad de la malla). Una interpolación (interpolationSchemes) linear, es decir de segundo orden; y la gradiente en las caras (snGradSchemes) normal a las caras, corregido por la no-ortogonalidad. Además de los criterios de Convergencia (fvSolution), para el *solver* de la temperatura (T), se utilizó un tolerance de $1x10^{-6}$ y un relTol (tolerancia relativa) de 0. El *solver* iteró hasta que el residuo de la ecuación de temperatura se redujo por debajo de 10^{-6} (en valor absoluto) para que el aseguramiento numérico sea estable y físicamente consistente.

Las condiciones de contorno e iniciales fueron determinadas según los archivos 0/*/T y blockMeshDict, las condiciones de contorno (sección boundary en blockMeshDict) fueron señaladas para la atmosphere (tipo patch) con el fin de agrupar las caras exteriores donde se aplica la condición de temperatura fija. Las caras específicas son definidas por números que refieren a los índices de los vértices para la formación de caras: (0 4 8 0), (3 7 11 7), (0 1 5 4), (2 3 7 6) y (0 1 2 3). Estas caras definen las fronteras expuestas al ambiente exterior. Se usó walls (tipo wall) para agrupar las caras internas entre las regiones y otras fronteras donde se aplican las condiciones de aislamiento térmico, al ser los vértices de las caras específicas: (8 9 13 12); (9 10 14 13); (10 11 15 14); (4 5 9 8); (5 6 10 9); (6 7 11 10) y (12 13 14 15), estas caras representan a las paredes internas y las fronteras no expuestas al ambiente. Las condiciones de Contorno para la Temperatura (archivos 0/*/T) fueron dadas por walls en type zeroGradient, estas indicaron que no hay flujo de calor normal a las paredes, atmosphere para la región externa del aire en type fixedValue; value uniform; por lo que la temperatura en el contorno de la atmósfera (aire exterior) se mantuvo constante, además las condiciones iniciales para la temperatura externa (archivos 0/*/T) en internalField uniform para todas las regiones se mantuvieron uniformes de acuerdo al diseño de investigación . La Maderba utilizada tiene una conductividad térmica de 0,1 W/m·K (dato del fabricante) , dos veces mayor que el Ichu prensado (0,05 W/m.K), lo que sugiere que permite una transferencia de calor más rápida, a través de ella, la densidad y el calor específico son los mismos para ambos materiales, lo que implica que la cantidad de energía necesaria para cambiar su temperatura por unidad de masa es la misma, el aire tiene una conductividad térmica (0,026 W/m·K) significativamente menor que los sólidos, que actúan como un aislante en comparación (Atahuachi Layme & Carcausto Quispesayhua, 2018; Cárdenas Cristobal & Espinoza Ramírez, 2024; Mendoza et al., 2021). Las propiedades termo físicas se determinaron según constant/*/thermophysicalProperties, y se pueden observar en la Tabla 1.

Posteriormente se hizo la predicción de escenarios, los datos fueron procesados mediante software libre OpenFOAM v12 for Windows y Salome Version 9.10.0 luego de ser graficado en Autocad V25. El cálculo del confort térmico fue calculado al utilizar una

	Aire	Ichu	Maderba
Densidad (ρ) kg/m³	1,225	250	250
Conductividad W/m·K	0,026	0,05	0,10
Calor específico (Cp) J/kg.K	1000	1200	1200

Tabla 1. Propiedades termo físicas de los materiales de la casa ecológica. Fuente: Datos de fabricante; Atahuachi Layme & Carcausto Quispesayhua (2018); Cárdenas Cristobal & Espinoza Ramírez (2024).

$$PMV = (0{,}303e^{-0{,}036M} + 0{,}028) * \{(M - W) - 3{,}05 * 10^{-3} * [5733 - 6{,}99(M - V) - p_a] - 0{,}42[(M - V) - 58{,}15] - 1{,}7 * 10^{-5} * M * (5867 - p_a) - 0{,}0014 * M * (34 - t_a) - 3{,}96 * 10^{-8} * f_{cl} * [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$t_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028 * (\mathrm{M} - \mathrm{V}) - I_{cl}\{3{,}96 * 10^{-8} * f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (t_{cl} - t_a)\}$$

$$h_{cl} = \begin{Bmatrix} 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} \; si \; 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} > 12{,}1\sqrt{v_{ar}} \\ 12{,}1 * \sqrt{v_{ar}} \; si \; 2{,}38 * |t_{cl} - t_a|^{0{,}25} < 12{,}1\sqrt{v_{ar}} \end{Bmatrix}$$

$$f_{cl} = \begin{Bmatrix} 1{,}00 + 1{,}290 * l_{cl} \; si \; l_{cl} \leq 0{,}078 \; \frac{m^2}{w} \\ 1{,}00 + 0{,}645 * l_{cl} \; si \; l_{cl} > 0{,}078 \; \frac{m^2}{w} \end{Bmatrix} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

implementación estándar de la fórmula de predicción del voto medio (PMV) de la ISO 7730 (Olesen & Parsons, 2002). PMV es el estándar usado para conocer el confort térmico de acuerdo a las normas ASHRAE según los cálculos de Fanger (Ecuación 1).

Donde: M es la Tasa metabólica (W/m²); W es el Trabajo externo (W/m²); Icl es el aislamiento de la ropa (Clo); fcl es el Factor de área de la superficie de la ropa; ta es la temperatura del aire (°C); tr es la temperatura radiante media (°C), var es la velocidad del aire relativa al cuerpo (m/s); pa es la presión parcial del vapor de agua en el aire (Gilani, Khan & Pao, 2015).

Las pequeñas variaciones fueron resultados de la temperatura y humedad interna, manteniéndose constante la velocidad del aire a 0,1 m/s, con un aislamiento de ropa (clo) de 1,0 usado para la ropa de invierno moderada, Temperatura Radiante Media (Tmr) igual a la Temperatura interna, Nivel de Actividad Metabólica (Met) de 1,0 por el sedentarismo puro para reflejar la precisión de la experimentación por la escala discreta de la Tabla 2. Donde son declaradas las zonas de confort térmico bajo la metodología (Fanger, 1970) y las normas ASHRAE en Mora & Bean (2018), pues se indican los valores de confort térmico dividida en tres clases en base al PMV (Roelofsen & Jansen, 2024)

Los análisis estadísticos fueron procesados en el software Minitab versión 20 de licencia educativa, mediante el Diseño experimental DOE y Superficie de Respuesta RSM de Diseño Central Compuesto de 13 tratamientos, de 4 puntos axiales negativas, 4 positivas y 5 puntos (Tabla 3.),

Confort	PMV
Mucho frío	-3,0
Bastante frío	-2,0
Algo de frío	-1,0
Neutro	0
Algo de calor	+ 1,0
Bastante calor	+ 2,0
Mucho calor	+ 3,0
Clase	Intervalos de PMV
A	-0,2 < PMV<0,2
B	-0,5 < PMV<0,5
C	-0,7 < PMV<0,7

Tabla 2. Escala discreta y Clases de predicción de voto medio PMV. Fuente: Mora & Bean (2018).

de donde se obtuvieron los gráficos de contorno, mallas sólidas, interacciones y optimización.

Se determinó el ancho de la pared óptima por minimización del confort térmico aceptable según la ISO 7730 Ergonomía del ambiente térmico, la determinación analítica e interpretación del confort térmico (Fanger, 1970; Olesen & Parsons, 2002) mediante el cálculo de PMV, el intervalo para ser confortable de clase C, inicia en -0,7, debido a que solo hay algo de frío, hasta +0,7,

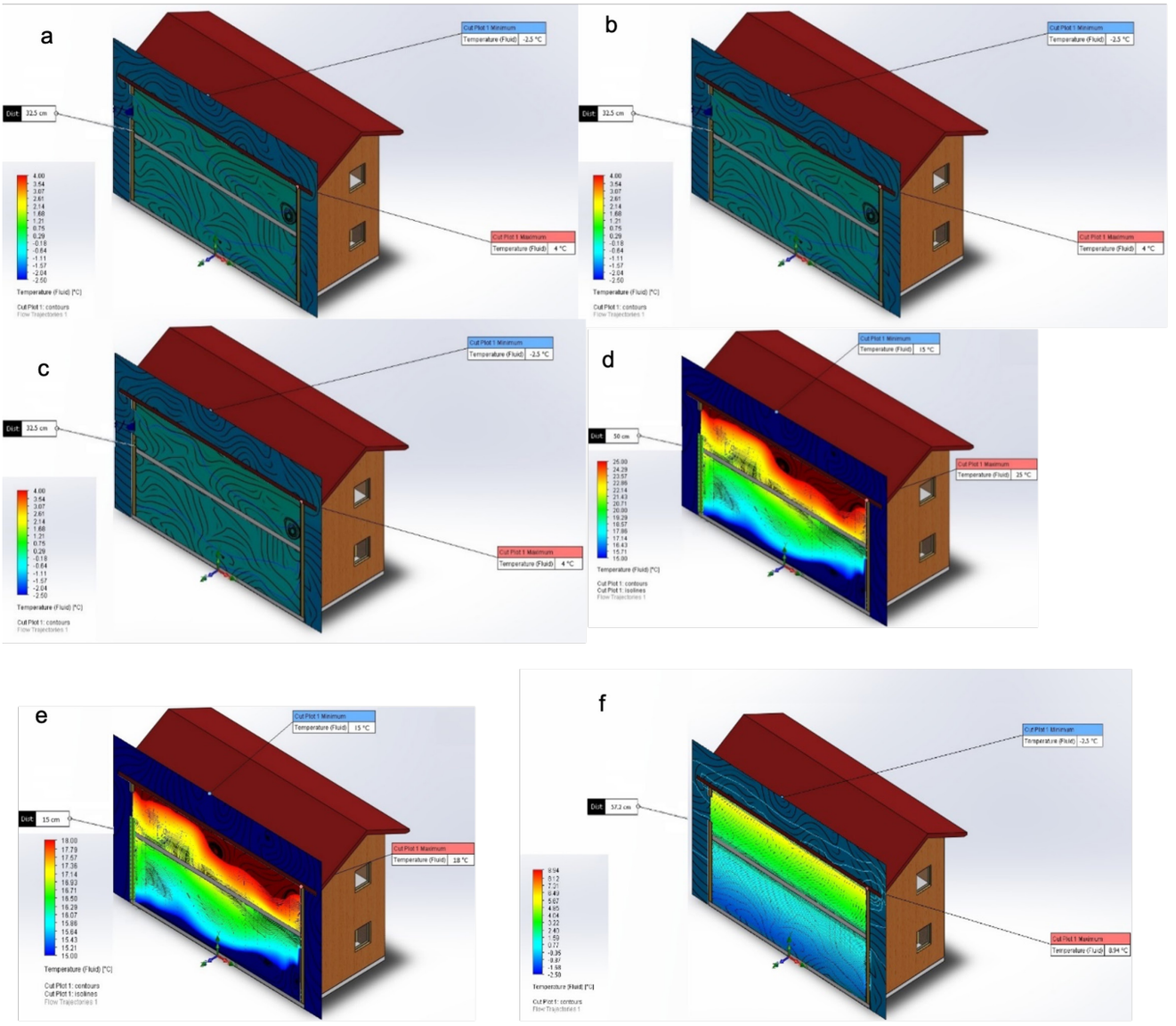


Figura 3. Comparativo de las simulaciones CFD de la casa ecológica, de acuerdo al diseño de optimización experimental, donde se observa el espesor de las paredes, la escala de temperatura exterior e interior. Parte 1. Fuente: Elaboración de los autores.

siendo los mejores valores cercanos a 0, los de clase A varían de -0,2 a +0,2, simulados a la temperatura de extrema de -10 °C y -20 °C.

RESULTADOS

SIMULACIÓN CFD

Gráficamente se observa el comportamiento del confort térmico al interior de la casa ecológica, en la Figura 3 a, b y c se observan temperaturas bajas de hasta 4 °C, distribuidos en todo el interior de la casa cuando la temperatura externa es de -2,5 °C y un grosor de pared de 32,5 cm, este efecto de la temperatura interna se incrementa hasta 8,94°C cuando la pared es de 57,2 cm y se distingue mayor temperatura de viento en el nivel superior que en el inferior, notándose que hay mayor frigidez en el nivel inferior Figura 3 f.

Temperaturas externas de 22,24°C y paredes de 32,5 cm tienen efectos de sobrecalentamiento al interior que llegan hasta 28,74°C en el segundo nivel, y mínimos de hasta 22,24 °C (Figura 4 a) a este nivel se recomendaría cambios de vestimenta a ligeras. Al reducir el grosor de la pared a 7,75 cm con temperaturas bajo cero como la Figura 4 b se obtienen temperaturas cercanas a 0°C, a temperaturas de -20°C a menos con grosores de pared entre 32,5 cm a 50 cm, se observan en estos puntos fríos al interior disconfort térmico. Figura 3 c- Figura 3 g.

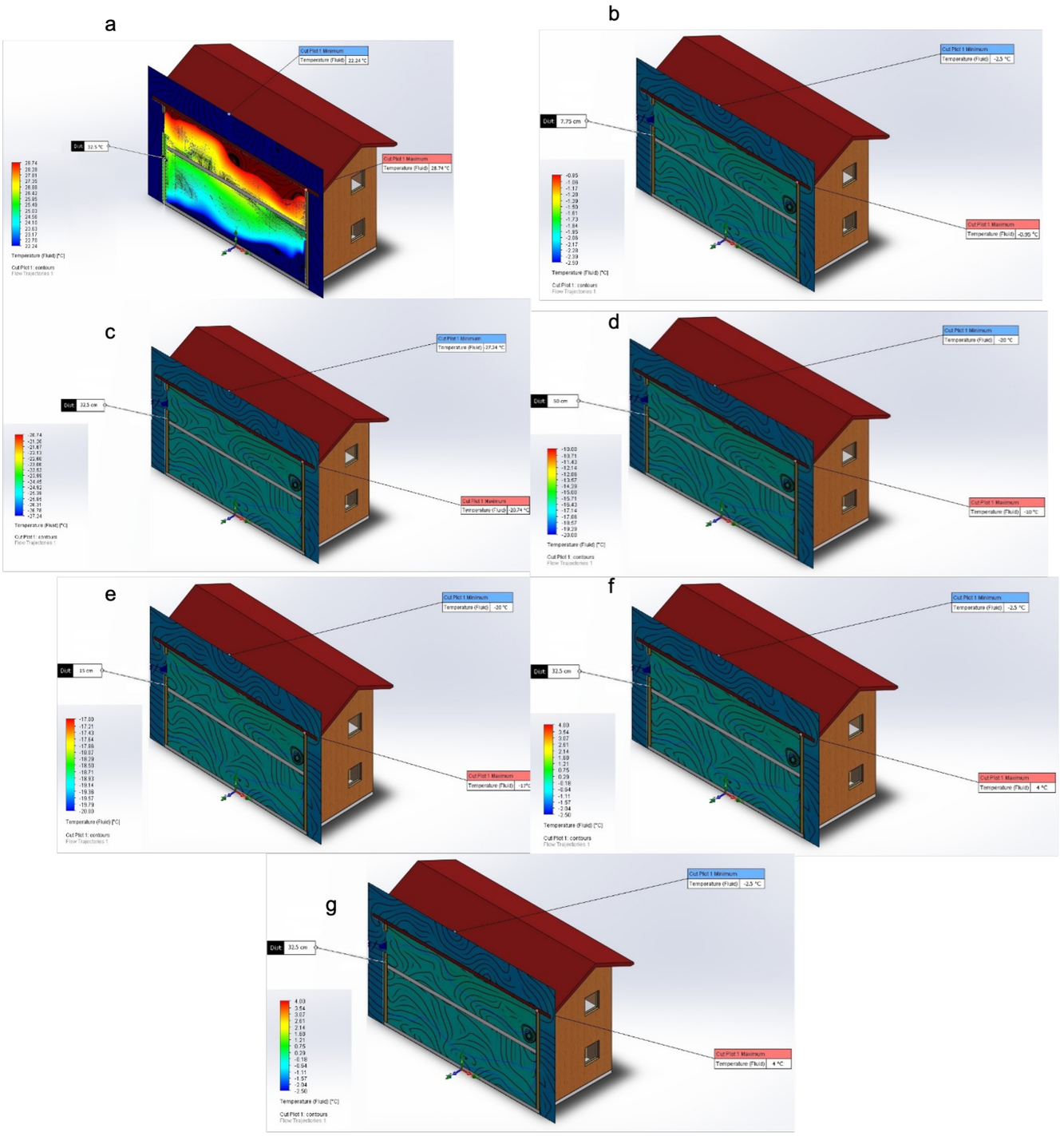


Figura 4. Comparativo de las simulaciones CFD de la casa ecológica, de acuerdo al diseño de optimización experimental donde se observa el espesor de las paredes y la escala de temperatura exterior e interior. Parte 2. Fuente: Elaboración de los autores.

El grosor de la pared tiene efecto de primer grado, y la temperatura externa a la casa ecológica tiene un efecto de segundo grado, esto evidencia que ambos factores son altamente significativos (α=0,05) al confort térmico al interior de la casa, pero con efectos complejos respecto a la temperatura externa por la variación del índice PMV de forma contraintuitiva a temperaturas externas muy frías (Figura 5 a).

El diagrama de contornos (Figura 5 c) demuestra las zonas de confort térmico incluso a temperaturas menores de entre 0 °C a -20 °C, siendo esto posible al incrementar el grosor de la pared que contiene el ichu, si se tiene en cuenta que los valores de PMV entre -0,7 y 0,7 son confortables, es posible lograr confort con grosores de pared mayores a 40 cm, incluso se puede identificar que el ichu favorece el confort térmico en climas templados hasta los 15°C de temperatura ambiental.

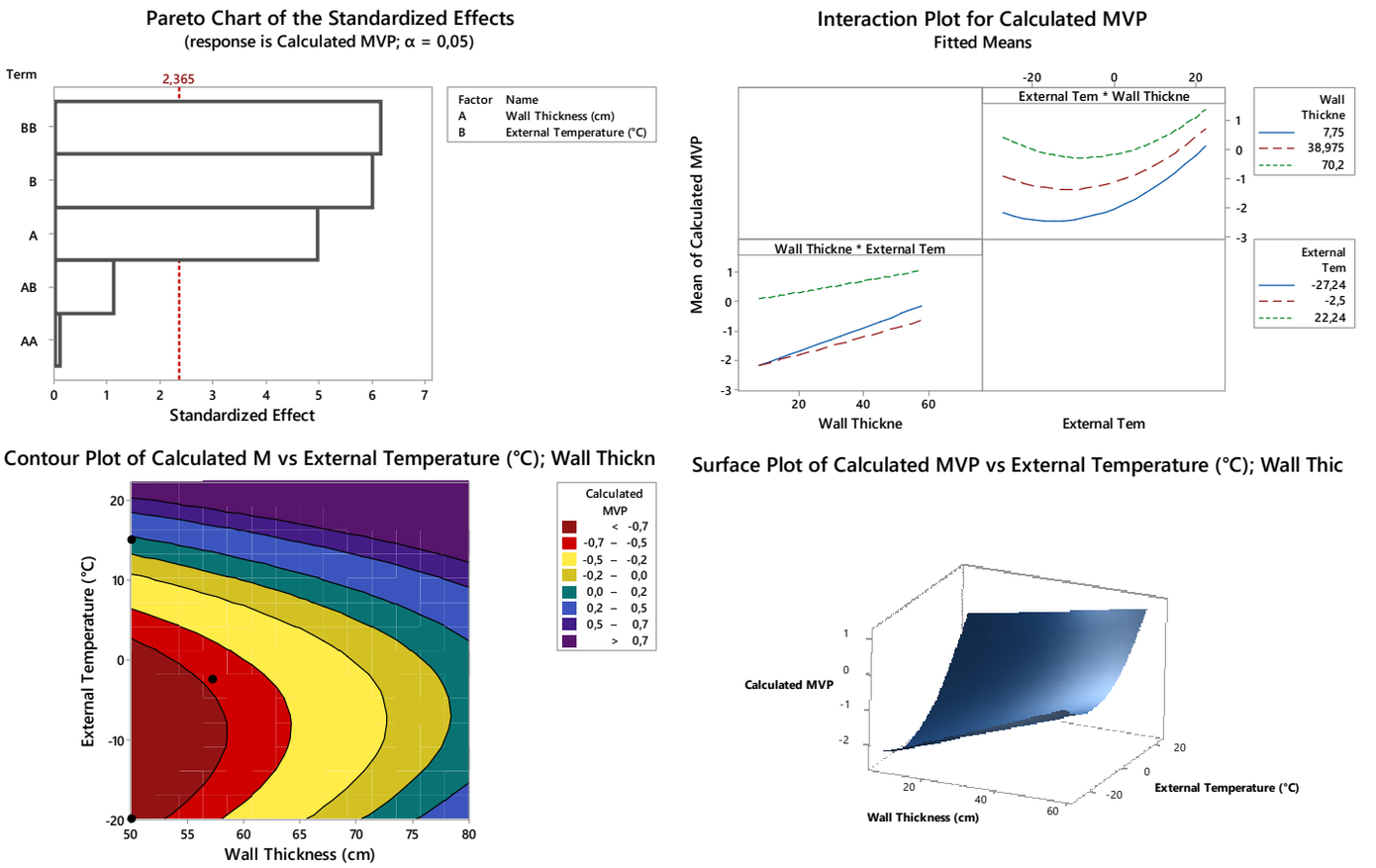


Figura 5. a) Diagrama de Pareto que identifica los efectos estandarizados. b) interacción de medias de PMV. c) gráfico de contorno que muestra los espacios de confort y disconfort térmico. d) Gráfico 3D del confort térmico en la casa ecológica. Fuente: Elaboración de los autores.

En la Figura 5 d se observa el gráfico superficie de respuesta de tres dimensiones, evidencia que los valores de optimización, a mayor temperatura y grosor de pared se obtiene un mayor PMV, que supera incluso los rangos de confort térmico (clase A, B y C), este valor disminuye cuando menor es el grosor de la pared, así como la temperatura baja a niveles extremos (-20°C), al tener en cuenta el rango de confort térmico de clase A es de -0.2 a 0.2, clase B de -0.5 a 0.5 y clase C de -0,7 a 0,7, se puede observar que se puede lograr confort térmico por PMV con grosores de pared entre 50, 60 y 65 cm, para temperaturas extremas de -10 °C a -20 °C (Zheng et al., 2021).

Se realizaron los cálculos puntuales para conocer los valores mínimos de grosor de pared para -10 °C en el caso de PMV de 0; -0,7; -0,5 y -0,2 el grosor mínimo es de 57,20 cm (Figura 6 a – Figura 6 d) y para temperaturas de -20 °C se obtuvieron grosores mínimos de 57; 53,0727; 57,20 y 57,20 respectivamente (Figura 6 e – Figura 6 h).

CÁLCULO DEL CONFORT TÉRMICO POR LA PREDICCIÓN DE VOTO MEDIO (PMV)

El modelo fue sometido a la determinación del confort térmico por PMV, de acuerdo al diseño experimental, con los valores de grosor de pared (cm) y temperatura externa (°C) de la casa ecológica, los demás parámetros externos fueron constantes. Según el diseño estadístico de superficie de respuesta los resultados indicaron los valores que se muestran en la Tabla 3.

DISCUSIONES

La mayor conductividad térmica de la Maderba (0,10W/m*K) indica que los cambios de temperatura producen su propagación, a través de ella más rápidamente que el Ichu (0,05 W/m · K), el valor encontrado por la simulación es similar al hallazgo de Mendoza et al. (2021), quienes reportan valores de 0,047 a 0,113 W/m · K, esto resalta la fidelidad del modelo. El ichu tiene propiedades aislantes de conductividad térmica menores a la madera tornillo (0,141 W/m · °C), esta propiedad favorece al modelo estructural propuesto, además de ser encontrada fácilmente en la zona altoandina donde el frío afecta a los pobladores (Mendoza et al., 2021). La distribución de la casa ecológica evidencia diferentes

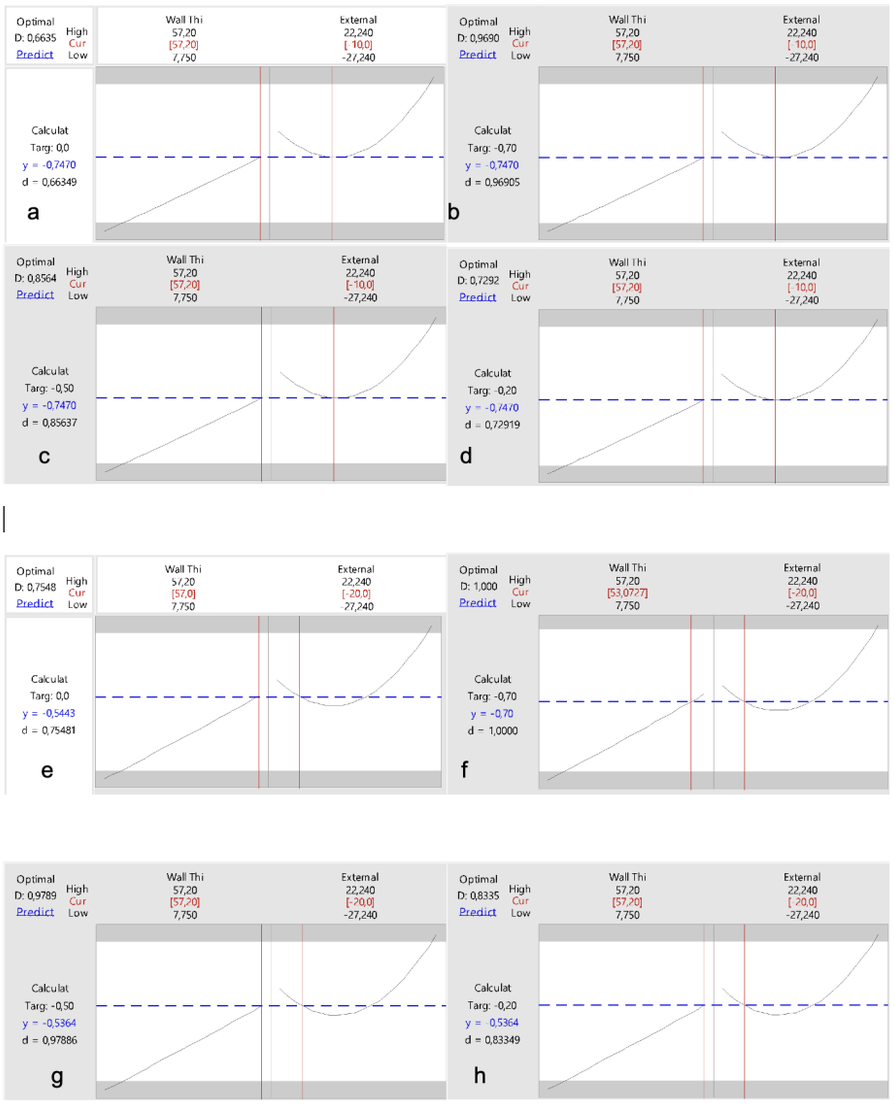


Figura 6. Optimización de grosor de pared a temperaturas ambientales extremas a -20 °C y -10 °C bajo predicción y deseabilidad aceptable. Fuente: Elaboración de los autores.

Grosor de Pared (cm)	Temperatura externa (°C)	Temperatura interna	Cálculo de PMV
32,5	-2,5	16	-1,29
32,5	-2,5	15,5	-1,42
32,5	-2,5	15	-1,57
50	15	20	0
15	15	17	-0,99
57,2	-2,5	18	-0,69
32,5	22,24	24	0,89
7,75	-2,5	14	-1,92
32,5	-27,24	16	-1,29
50	-20	18	-0,69
15	-20	13	-2,22
32,5	-2,5	16	-1,35
32,5	-2,5	15	-1,55

Nota: Las repeticiones en la Tabla 3. Corresponden a los puntos centrales del diseño experimental y permiten medir la varianza del modelo y reflejan claramente la sensibilidad del sistema ante la inercia térmica, como la casa tiene la capacidad de almacenar calor, la temperatura interna y el PMV no son estáticos, que presentan ligeras fluctuaciones por el flujo de calor residual producido por el ciclo térmico.

Tabla 3. Diseño de optimización y el Cálculo de confort térmico por la predicción de voto medio PMV de la casa ecológica. Fuente: Elaboración de los autores.

comportamientos térmicos, en la parte del techo de la casa ecológica se registran mayores temperaturas en todas las simulaciones, presumiblemente por el uso de tejas (0,476 W/m·K de conductividad térmica), madera y maderba en el cielo raso que incrementan naturalmente la temperatura (Rat et al., 2023; Suleiman et al., 1999), además se debe recordar que el aire caliente siempre se desplaza hacia la parte superior por el "efecto chimenea", explicado por el movimiento causado por la diferencia de presión del aire (0,1 m/s) que impulsa el aire menos denso hacia la parte superior (Suárez & Molina, 2015).

Un hallazgo principal consiste en el descubrimiento de la relación cuadrática entre la temperatura externa y el PMV, existe un punto óptimo de temperatura externa donde el confort térmico mínimo corresponde a un grosor de pared, esta no linealidad es un resultado empírico, y está relacionado a la compleja interacción entre los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección natural dentro de la casa) además del almacenamiento de energía en los diferentes componentes.

El espesor de la pared con ichu es superior a los resultados experimentales realizados por Molina-Fuertes, Horn-Mutschler & Gómez-León (2024) que al utilizar lana de vidrio de 0,4 m logra una amplitud térmica interior de 17,1 °C en el exterior a 6,4 °C y a las paredes de adobe provistas de madera sólida de 0,40 m en forma de contraventana colocados por las noches, que logra valores cercanos a confort térmico. Se puede confirmar la efectividad del uso del ichu en el interior de las paredes con el fin de conservar el calor interno de la vivienda por más tiempo, y su uso ocuparía un ligero mayor espacio que el actualmente usado por otros materiales. Se han identificado varias zonas de confort térmico incluso a temperaturas menores a -20°C al engrosar la pared con ichu y maderba tipo sándwich, ambos materiales tienen una conductividad térmica relativamente baja (0,05 W/m·K y 0,10 W/m·K respectivamente), al incrementar el grosor de la pared se incrementa el Δx en la ecuación de la resistencia térmica , esto se traduce en un aumento de la resistencia térmica de la pared, lo que a su vez reduce la tasa de flujo de calor, a través de la misma desde el interior cálido hacia el exterior frío (González-Domínguez, Monzón-Verona & García-Alonso, 2019). La temperatura interior se mantiene estable y menos afectada por la temperatura externa a -20°C y -10 °C con paredes mayores a 57,20 cm, lo que manifiesta mejores PMV.

El espesor recomendado de 57,20 cm satisface al estándar ISO 7730, el confort térmico óptimo se logra con un PMV cercano a 0, con un rango aceptable de clase A generalmente entre -0,2 y +0,2 (Olesen & Parsons, 2002). El ancho calculado de la pared para poder obtener confort térmico en base al PMV es coherente y de acuerdo a la resistencia térmica de la madera, el ichu en disposición tipo sándwich y sostenible económicamente (van Niekerk, 2020). Se afirma entonces que estos valores optimizados corresponden a una inclusión económica de los habitantes de las zonas altas frías y de temperaturas extremas a la luz de los objetivos de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2019).

La validación del espesor optimizado de 57,2 cm se realiza por comparación de la Resistencia Térmica Total (Rt) con los materiales convencionales. La conductividad del ichu (k=0,05 W/m·K) permite un muro propuesto de Rt=11,44 m^2.K/W, a diferencia de un muro de adobe estándar (k=0,80 W/m·K) que requiere 9,15 m para asemejarse a dicho aislamiento (Piñas et al., 2020). El ancho propuesto de la pared sandwich aunque parece de espesor elevado en estándares urbanos, es eficiente y realista en fríos extremos de las zonas rurales, con el beneficio de prescindir de sistemas de calefacción activos de alto costo energético.

CONCLUSIONES

La pared tipo sandwich maderba/ichu/maderba es una solución técnica altamente eficaz para el aislamiento térmico en climas de frío extremo, mediante la metodología de Superficie de Respuesta (RSM) se pudo determinar que un espesor crítico de 57,2 cm permite confort térmico de Clase A al interior de una casa ecológica con temperaturas exteriores de -20 °C.

El grosor de pared tiene relación de primer grado con el PMV, pero la temperatura externa tiene efecto del tipo cuadrático, lo que representa efectos complejos en el logro del confort térmico. Por lo tanto, la pérdida de confort se acelera de forma no lineal ante el descenso extremo de la temperatura exterior, que valida la necesidad de espesores de aislamiento superiores a los convencionales en zonas altoandinas para contrarrestar este fenómeno físico.

La dinámica de fluidos computacionales confirma la estratificación térmica en las viviendas de dos niveles, el aire desplazado por la diferencia de presión interna es concentrada en el segundo nivel, sugiere que el diseño arquitectónico debería de priorizar las áreas de dormitorio en los niveles superiores para aprovechar la energía calorífica lograda por el sistema sándwich.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, H.J.; Curación de datos, J.R.; Análisis formal, H.J.; Adquisición de financiación H.J., G.Q.; Investigación, H.J., K.M.; Metodología, H.J.; Administración de proyecto, H.J., G.Q.; Recursos, J.R.; Software. J.R.; Supervisión, H.J.; Validación, K.M., J.R.; Visualización, H.J.; Escritura – borrador original, H.J.; Escritura – revisión y edición, H.J., K.M.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Tecnológica del Perú por el Financiamiento de código P-2024-SUR-19, mediante el concurso de proyectos I+D 2024 UTP Región Sur de acuerdo a la RR N° 0168-2024-R-UTP

GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

CFD: Dinámica de Fluidos computacionales. Es una disciplina que utiliza algoritmos y métodos numéricos para resolver casos de fluidos y transferencia de calor.

Conductividad térmica (k): Propiedad para conducir el calor, sus unidades son W/mK

Discretización espacial: División del dominio continuo en un número finito de celdas.

Esquema de Euler: Método numérico implícito de primer orden para la discretización de derivadas temporales.

Gauss Linear: Discretización de segundo orden basado en el teorema de la divergencia de Gauss.

Inercia térmica: Capacidad de mantener la energía recibida y liberarla progresivamente.

Malla Hexaédrica: Malla compuesta por elementos de seis caras (cubos o prismas)

OpenFOAM: Software de código abierto, para solución de problemas de simulación térmica y fluidos.

PMV: Voto medio estimado. Es un índice que predice la sensación térmica del valor medio de los votos.

PPD: Porcentaje predicho de insatisfechos. Índice que cuenta a las personas térmicamente incómodas.

RSM: Metodología de Superficie de respuesta. Técnicas estadísticas y matemáticas para el modelado y análisis de respuestas influenciadas por variables de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Atahuachi Layme, G. M., & Carcausto Quispesayhua, Y. N. (2018). *Aislante termoacústico a base de Stipa Ichu para atenuar el ruido y cambios drásticos de temperatura en viviendas de sectores en expansión urbana de la ciudad de Puno*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional - UNAP. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/11138

Cárdenas Cristobal, J. M., & Espinoza Ramírez, K. (2024). Utilización de unidades termo-modulares de vivienda para combatir el friaje extremo con materiales oriundos de Tayabamba - La Libertad – 2021 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional - UNS. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSR_09f576f8c5882bcc0a5e467258693592/Description#details

Charca, S., Noel, J., Andia, D., Flores, J., Guzman, A., Renteros, C., & Tumialan, J. (2015). Assessment of Ichu fibers as non-expensive thermal insulation system for the Andean regions. *Energy and Buildings*, 108, 55–60. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.053

Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press.

Frías, M., Caneda-Martínez, L., Sánchez de Rojas, M. I., Tenazoa, C., & Flores, E. (2020). Scientific and technical studies on eco-efficient binary cements produced with thermally activated ichu grass: Behaviour and properties. *Cement and Concrete Composites*, 111, 103613. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103613

Gilani, S. I. U. H., Khan, M. H., & Pao, W. (2015). Thermal Comfort Analysis of PMV Model Prediction in Air Conditioned and Naturally Ventilated Buildings. *Energy Procedia*, *75*, 1373–1379. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.218

González-Domínguez, P. I., Monzón-Verona, J. M., & García-Alonso, S. (2019). New Thermal-Conductivity Constitutive Matrix in Fourier's Law for Heat Transfer Using the Cell Method. *Applied Sciences, 9*(21), 4521. https://doi.org/10.3390/APP9214521

Hills, J. (2012). *Getting the measure of fuel poverty: final report of the Fuel Poverty Review*. CASE report 72. https://sticerd.lse.ac.uk/dps/case/cr/casereport72.pdf

Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, *15*(14), 5481–5487. https://doi.org/10.5194/GMD-15-5481-2022

Marchante González, G., & González Santos, A. I. (2020). Evaluación del confort y disconfort térmico. *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, *41*(3), 21–40. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9513886

Mendoza, M. A., Piñas Moya, M. J., Horn Mutschler, M. J., & Gómez León, M. M. M. (2021). Conductividad térmica de compuestos tipo sándwich usados en la industria de la construcción. *TECNIA*, *31*(1), 42–50. https://doi.org/10.21754/tecnia.v21i1.1198

Molina-Fuertes, J. O., Horn-Mutschler, M. J., & Gómez-León, M. M. (2024). Evaluación del comportamiento térmico de un sistema constructivo de pared en zona altoandina utilizando un módulo experimental. *Tecnia*, *34*(2), 53–61. https://doi.org/10.21754/TECNIA.V34I2.2170

Mora, R., & Bean, R. (2018). Thermal Comfort: Designing for People. *Ashrae Journal*, (02), 40-46. https://commons.bcit.ca/besys/files/2018/08/Thermal-Comfort-Design-for-People.pdf

Moreno-Casas, P. A., Scott, F., Delpiano, J,. & Vergara-Fernández, A. (2020). Computational tomography and CFD simulation of a bio filter treating a toluene, formaldehyde and benzo [a] pyrene vapor mixture. *Chemosphere*, *240,* 124924. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124924

Naciones Unidas. (2019). *Informe de Los Objetivos Del Desarrollo Sostenible 2019*. Naciones Unidas Nueva York https://ods.org.mx/docs/doctos/SDG_Report2019_es.pdf

Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, *34*(6), 537–548. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X

Ortiz Caicedo, P. L., Gonzales Vega, A. A., Montaño Roldan, V. L., Chica Tambaco, A. J., & Álava Vélez, C. E. (2023). Eficiencia de sistemas de aislamiento térmico. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, *3*(2), 43–50. https://doi.org/10.56183/IBEROTECS.V3I2.631

Piñas, J. M., Lira, L., Horn, M., Solis, J. L., & Gómez, M. M. (2020). Influence of Stipa ichu on the thermal and mechanical properties of adobe as a biocomposite material. *Journal of Physics: Conference Series*, *1433*(1), 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1433/1/012003

Presidente de la Comisión Organizadora de la UNAAT. (24 de enero de 2017). *Año del Buen Servicio al Ciudadano. RESOLUCIÓN DE PRESIDENCIA N° 007-2017-CO-P-UNAAT.* Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Terma [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2178617/RESOLUCI%C3%93N%20DE%20PRESIDENCIA%20N%C2%B0%20007-2017-CO-P-UNAAT.pdf

Rat, E., Martínez-Martínez, S., Sánchez-Garrido, J. A., Pérez-Villarejo, L., Garzón, E., & Sánchez-Soto, P. J. (2023). Characterization, thermal and ceramic properties of clays from Alhabia (Almería, Spain). *Ceramics International*, *49*(9), 14814–14825. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.05.328

Roelofsen, P., & Jansen, K. (2024). Modification in the (NEN-) EN-ISO 7730 Model, with Regard of the Thermal Indoor Climate Assessment in Dutch Offices. *Jounarl of Building Design and Environment*, *2*(2), 35033. https://doi.org/10.37155/2811-0730-0302-15

Suárez, C., & Molina, J. L. (2015). Análisis del efecto chimenea en fachadas ventiladas opacas mediante correlaciones del flujo másico inducido. Aplicación para el dimensionado de anchos de cámara. *Informes de la Construccion*, *67*(538), e087. https://doi.org/10.3989/IC.13.155

Suleiman, B. M., Larfeldt, J., Leckner, B., & Gustavssor, M. (1999). Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology*, *33*(6), 465–473. https://doi.org/10.1007/S002260050130

Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., & Shirasawa, T. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *96*(10–11), 1749–1761. https://doi.org/10.1016/J.JWEIA.2008.02.058

van Niekerk, A. J. (2020). Inclusive Economic Sustainability: SDGs and Global Inequality. *Sustainability 12*(13), 5427. https://doi.org/10.3390/SU12135427

Zheng, Z., Zhang, Y., Mao, Y., Yang, Y., Fu, C., & Fang, Z. (2021). Analysis of SET* and PMV to evaluate thermal comfort in prefab construction site offices: Case study in South China. *Case Studies in Thermal Engineering*, *26*, 101137. https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101137