

Determination of Effective Thermal Conductivity of *Stipa ichu*: Numerical Shape Factor Calibration in a Reduced-Scale Hot Box

Yamil Quispe Esperilla¹; Aquiles Taylor Ramos Yapo²; Steven Alex Mayta Lampa³; Armando Tito Cruz Cabrera⁴; Julio Fredy Chura Acero⁵; Michael Farwest Chura Yaresi⁶; Erick Carlos Yana Benito⁷
^{1,3,5,7}Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 49044726@est.unap.edu.pe, 73021125@est.unap.edu.pe, mailto:jchura@unap.edu.pe, 73439090@est.unap.edu.pe
^{2,4,6} Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 74396959@est.unap.edu.pe, acruzc@unap.edu.pe, miki.invo.123@gmail.com

Abstract—Energy vulnerability in High-Andean dwellings necessitates the development of efficient, indigenous thermal insulation solutions. This study characterizes the thermal conductivity of *Stipa Ichu* fiber using a geometrically corrected, reduced-scale Hot Box method. To mitigate the metrological uncertainty inherent to low-cost devices, a hybrid experimental-numerical (CFD) methodology was implemented. Analysis using the SST $k-\omega$ turbulence model showed that scale reduction induces multidimensional heat fluxes and lateral losses at the edges, making the assumption of fully one-dimensional heat transfer physically inconsistent. Therefore, a global efficiency factor $\eta = 0.47$ was adopted within an experimental-numerical calibration strategy to correct the prototype geometric bias. Upon applying this correction, an effective thermal conductivity of $0.094 \pm 0.005 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ was obtained for a compaction density of $150 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Keywords: *Stipa Ichu*, Thermal Conductivity, Hot Box, CFD, Shape Factor.

Determinación de la conductividad térmica efectiva de *Stipa ichu*: Calibración numérica del factor de forma en una Hot Box a escala reducida

Yamil Quispe Esperilla¹; Aquiles Taylor Ramos Yapo²; Steven Alex Mayta Lampa³; Armando Tito Cruz Cabrera⁴; Julio Fredy Chura Acero⁵; Michael Farwest Chura Yaresi⁶. Erick Carlos Yana Benito⁷
^{1,3,5,7}Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 49044726@est.unap.edu.pe, 73021125@est.unap.edu.pe, mailto:jchura@unap.edu.pe, 73439090@est.unap.edu.pe
^{2,4,6} Universidad Nacional del Altiplano Puno, Perú, 74396959@est.unap.edu.pe, acruzca@unap.edu.pe, miki.invo.123@gmail.com

Resumen– La vulnerabilidad energética en viviendas altoandinas exige el desarrollo de aislamientos térmicos autóctonos y eficientes. Este estudio caracteriza la conductividad térmica de la fibra de *Stipa Ichu* mediante un método de Caja Caliente (Hot Box) a escala reducida, corregido geoméricamente. Para mitigar la incertidumbre metrológica de los equipos de bajo costo, se implementó una metodología híbrida experimental-numérica (CFD). El análisis mediante el modelo de turbulencia SST $k-\omega$ mostró que la reducción de escala induce flujos de calor multidimensionales y pérdidas laterales en los bordes, por lo que la hipótesis de transferencia térmica estrictamente unidimensional resulta físicamente inconsistente. En consecuencia, se adoptó un factor global de eficiencia $\eta = 0.47$ dentro de una estrategia de calibración experimental-numérica para corregir el sesgo geométrico del prototipo. Tras aplicar esta corrección, se obtuvo una conductividad térmica efectiva de $0.094 \pm 0.005 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ para una densidad de compactación de 150 kg/m^3 .

Palabras Clave: *Stipa Ichu*, Conductividad Térmica, Caja Caliente, CFD, Factor de Forma.

I. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la crisis climática, las regiones situadas a altitudes superiores a los 3,800 m.s.n.m. en la cordillera de los Andes afrontan condiciones de vulnerabilidad térmica extrema, asociadas localmente al “frijaje” o a las heladas. La literatura técnica reciente sostiene que la precariedad habitacional en estas zonas no se explica solo por factores socioeconómicos, sino también por la baja eficiencia térmica de los materiales constructivos tradicionales, que no alcanzan la resistencia térmica (R) requerida para atenuar el diferencial de temperatura entre el exterior y el interior; esta limitación condiciona el confort y el riesgo térmico en vivienda altoandina [1].

De forma tradicional, la industria de la construcción ha dependido de polímeros sintéticos y lanas minerales para el aislamiento. No obstante, revisiones recientes reportan su impacto ambiental y el costo elevado que implican para comunidades rurales, lo que restringe su adopción en contextos de alta vulnerabilidad [2], [3]. En este marco, las fibras naturales biobasadas, en particular la *Stipa Ichu*, se consideran una alternativa técnica para el desarrollo de soluciones de bajo impacto. Los estudios previos sobre el Ichu se han orientado principalmente a su desempeño mecánico en matrices poliméricas; sin embargo, su caracterización como aislante

térmico en condición “pura” exige precisión metrológica que suele ser inaccesible en laboratorios regionales, debido al costo de equipos basados en Placa Caliente Protegida (guarded hot plate, GHP) conforme a ASTM C177 (American Society for Testing and Materials). [1], [4], [5]

El desafío científico del presente estudio se centra en validar un método alternativo de medición: la caja caliente (hot box) a escala reducida. La literatura reporta que la reducción de escala introduce errores sistemáticos asociados a pérdidas de calor tridimensionales en aristas y uniones, que distorsionan el balance térmico del equipo y comprometen la trazabilidad del resultado.[6]. En ese contexto, ignorar dichas pérdidas volvería inconsistente cualquier estimación de conductividad térmica (k). Por ello, esta investigación no se limita a evaluar la *Stipa Ichu* como material sostenible, sino que plantea una metodología híbrida que integra experimentación física con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para cuantificar y corregir los sesgos de borde.

Mediante modelado numérico, sustentado en el esquema de turbulencia SST omega, se caracteriza el flujo de calor efectivo y se estima un factor de eficiencia del prototipo, con el fin de corregir el resultado experimental frente a pérdidas no deseadas [7]. Con ello, un prototipo de bajo costo se convierte en un instrumento con capacidad de medición defendible, al alinear la disponibilidad de recursos con el rigor requerido por la evaluación térmica. El objetivo central es determinar la conductividad térmica efectiva de la *Stipa Ichu* bajo condiciones controladas, reportándola como “k” corregida mediante el factor de eficiencia.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Preparación y Caracterización de la Biomasa (*Stipa Ichu*)

La fibra de *Stipa ichu* empleada como material aislante se recolectó en la región altoandina de Puno (3,820 m.s.n.m.). El material se limpió manualmente y se secó en estufa a 60°C. Hasta alcanzar masa constante, con el fin de eliminar humedad residual que pudiera sesgar la conductividad térmica por efectos asociados a transferencia de calor latente. Posteriormente, para garantizar la homogeneidad del medio poroso y validar la hipótesis de isotropía en la simulación, la compactación se ejecutó mediante un **protocolo estratificado de tres capas**

sucesivas, por gravimetría antes del cierre de la cámara en tres capas sucesivas en moldes de sección cuadrada ($0.20 \times 0.20 \text{ m}$) hasta una densidad de control $\rho \approx 150 \text{ kg/m}^3$. Esta densidad responde a un compromiso entre la porosidad necesaria para retener aire (principal contribución aislante) y la integridad estructural exigida en paneles de revestimiento [1], [8].

B. Diseño del Dispositivo Experimental de Bajo Costo

Con el fin de atender las limitaciones logísticas de equipos industriales (ASTM C177) se diseñó una cámara de medición basada en el principio de flujo de calor estacionario [5] La configuración adoptó una geometría cúbica reportada por [9] y [10]. El dispositivo se construyó con un recinto de poliestireno expandido (EPS) de alta densidad ($k = 0.034 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) y una fuente de calor central de 100 W. La selección de una geometría simple responde a una decisión de ingeniería orientada a simplificar la discretización nodal en el análisis de pérdidas, reducir errores de mallados asociados a formas complejas y mantener control directo sobre las direcciones de flujo de calor.

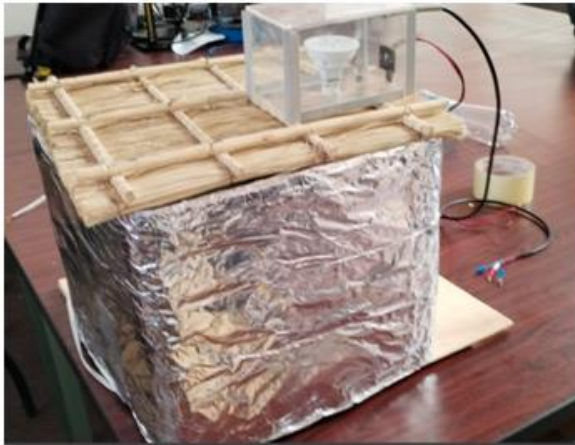


Fig. 1 Configuración general del prototipo experimental (Hot Box). Se detalla la ubicación de la muestra de fibra de *Stipa Ichu* en la superficie superior para la evaluación del flujo térmico vertical.

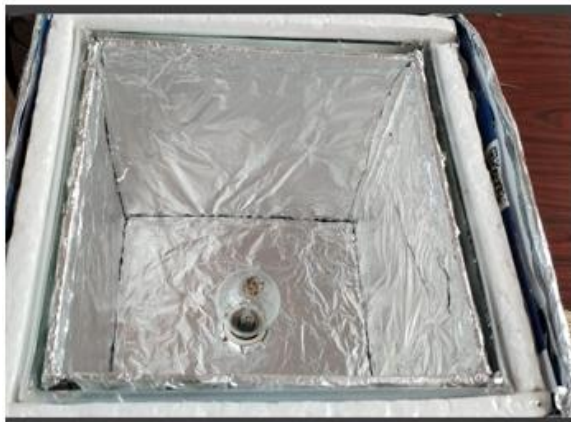


Fig. 2 Detalle de la cámara de aislamiento. El recubrimiento de poliestireno expandido (EPS) fue dimensionado para minimizar las pérdidas laterales y concentrar el gradiente térmico en la muestra.

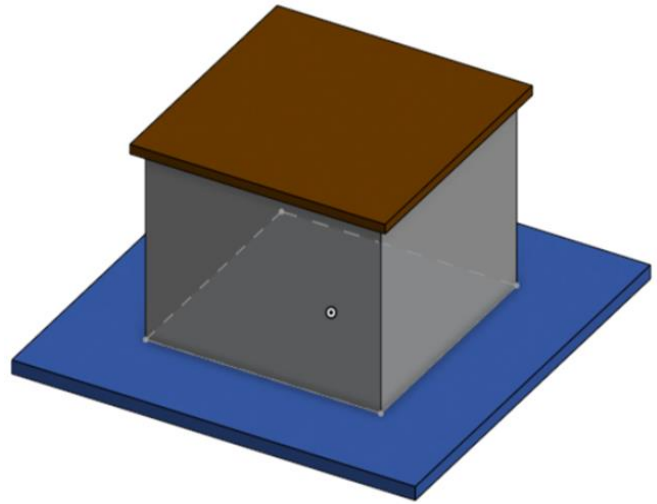


Fig. 3 Modelado CAD de la geometría del dispositivo. Se muestra la configuración cúbica (30x30x30 cm) diseñada para asegurar la simetría del flujo de calor.

C. Instrumentación y Protocolo de Adquisición

El sistema se instrumentó con sensores digitales calibrados y termopares tipo K, integrados a un sistema de adquisición de datos basado en un microcontrolador ESP32. Los puntos de medición se distribuyeron en una matriz 3×3 en ambas caras de la muestra, con el objetivo de capturar el gradiente térmico efectivo y reducir el sesgo asociado a mediciones puntuales.

Criterio de estado estacionario (steady-state): Dado que los dispositivos a escala reducida no incorporan guardas activas automáticas, la validez del dato depende de la estabilidad temporal del régimen térmico. Se adoptó un criterio de convergencia: los registros se consideraron válidos únicamente cuando la variación de la temperatura interna (ΔT_{int}) fue menor a 0.2°C durante un intervalo continuo de 30 min, de modo que la medición correspondiera al equilibrio termodinámico y no a transitorios térmicos [9].

D. Modelo de Corrección por Eficiencia (η)

Para fortalecer la trazabilidad del resultado, la metodología incorporó dos componentes complementarios: un análisis de incertidumbre expandida y un modelo CFD para evaluar la distribución espacial del campo térmico dentro del prototipo. El primero permitió identificar las principales fuentes de error instrumental y geométrico del ensayo, mientras que el segundo permitió verificar si la hipótesis de flujo estrictamente unidimensional era físicamente válida en una Hot Box a escala reducida.

En este contexto, la corrección por eficiencia no se interpreta como una propiedad intrínseca del material, sino como un parámetro global de calibración del prototipo. Su incorporación responde a la evidencia experimental de

convergencia térmica y a la evidencia numérica de pérdidas laterales, puentes térmicos en aristas y gradientes espaciales no uniformes observados en el modelo CFD. [7], [9]

TABLA I
RESUMEN DEL PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRE
INSTRUMENTAL Y GEOMÉTRICA.

Variable	Instrumento / fuente	Especificación	Tipo	Uso en el cálculo
T_{ext}	DS18B20	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; resolución $0.0625 \text{ }^{\circ}\text{C}$	B	cálculo de (ΔT)
T_{int}	Termopar tipo K + módulo	según fabricante	B	cálculo de (ΔT)
L	Vernier / regla	según resolución	B	espesor
A	Medición geométrica	$0.20 \times 0.20 \text{ m}$	B	área efectiva
Q_{nom}	Fuente térmica	100 W nominales	B	balance energético
Repetibilidad	Ensayo estable (14–30 min)	desviación estándar	A	incertidumbre global

La incertidumbre combinada de la conductividad corregida se estimó mediante propagación de incertidumbres del modelo de medición:

$$\frac{u_c(k_{corr})}{k_{corr}} = \sqrt{\left(\frac{u(Q_{nom})}{Q_{nom}}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2 + \left(\frac{u(A)}{A}\right)^2 + \left(\frac{u(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2}$$

donde:

$$u(\Delta T) = \sqrt{u^2(T_{int}) + u^2(T_{ext})}$$

y la incertidumbre expandida se expresó como:

$$U(k_{corr}) \approx 2 u_c(k_{corr})$$

En esta etapa, η se trató como un parámetro global de calibración experimental-numérica del prototipo y, por tanto, no se incluyó dentro del presupuesto instrumental resumido en la Tabla I; la incertidumbre expandida reportada para k_{corr} se asoció a las variables medidas del ensayo (Q_{nom} , L , A , ΔT) y a la repetibilidad experimental.

Un material homogéneo en **régimen estacionario** puede describirse mediante la ley de Fourier para **conducción unidimensional** a través de una placa plana. En este marco, la tasa de transferencia de calor $\dot{Q}$ a través del espesor L es proporcional al área efectiva A y al salto térmico medio ΔT

entre caras, e inversamente proporcional al espesor. Bajo esta aproximación, la conductividad térmica k se estima como:

1) Ley de Fourier (1D, estado estacionario)

$$\dot{Q} = -kA \left(\frac{dT}{dx} \right) \approx kA \left(\frac{\Delta T}{L} \right) \quad (1)$$

Donde, k = conductividad térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], Q = flujo de calor [W], A = área de transferencia [m^2], $\Delta T = T_{interno} - T_{externo}$ [K], L = espesor de la muestra [m]. [11]

Para relacionar el ensayo con la potencia eléctrica suministrada, se adopta un balance energético de primer orden: el flujo de calor que atraviesa la muestra se aproxima como una fracción de la potencia disipada por la fuente. En una formulación ideal, ello equivale a suponer paredes laterales adiabáticas y una ruta dominante de transferencia a través del “techo” (muestra). No obstante, en prototipos a escala reducida esta hipótesis introduce sesgo, debido a pérdidas tridimensionales asociadas a puentes térmicos en aristas y uniones, además de recirculación por convección natural interna. Por ello, se incorpora un factor global de eficiencia η , entendido como la fracción de energía que cruza efectivamente la muestra [12], [13], [14].

2) Balance energético con eficiencia global

$$Q_{muestra} \approx \eta \cdot P_{elec} \text{ (con } P_{elec} \approx Q_{nom}) \quad (2)$$

Donde η es la fracción de potencia que atraviesa la muestra

($0 < \eta < 1$)

3) Conductividad térmica corregida por eficiencia

$$k_{corr} = \frac{Q_{nom} \cdot \eta \cdot L}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Donde Q_{nom} es la potencia suministrada (100W) L el espesor de la muestra, A el área efectiva de transferencia y ΔT el salto térmico promedio entre caras [11]. En este trabajo, $\eta = 0.47$ se adoptó dentro de una estrategia de corrección geométrica basada en la convergencia experimental del sistema y en la evidencia numérica proporcionada por el CFD, el cual mostró una distribución térmica no uniforme y gradientes espaciales incompatibles con un flujo estrictamente unidimensional. Por tanto, η no debe interpretarse como una propiedad intrínseca del material, sino como un factor global de eficiencia del montaje experimental. Las simulaciones numéricas se ejecutaron mediante la plataforma **SimScale** (basada en el método de volúmenes finitos). El dominio computacional reprodujo la geometría experimental bajo condiciones de frontera de Dirichlet y Robin mixtas: generación volumétrica de 100 W y convección natural externa con $T_{\infty} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $h \approx 8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$, calibradas con las condiciones medias del laboratorio. El solver empleó el modelo de turbulencia **SST $k-\omega$** (validado para flujos parietales en edificación [7]), convergiendo con residuos menores que 10^{-6} .

Este esquema de corrección aproxima el desempeño del dispositivo de bajo costo al marco de medición por flujo estacionario, al depurar el dato del sesgo geométrico inducido por pérdidas en bordes y puentes térmicos, coherente con reportes de sistemas portátiles de conductividad térmica basados en caja caliente [10]

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Dinámica Temporal y Validación del Estado Estacionario

La validación experimental se sustenta en la capacidad del sistema para alcanzar y sostener el equilibrio termodinámico. La Fig. 4 muestra el historial térmico de una sesión de prueba representativa de 30 min. Se distingue una fase transitoria inicial asociada a la inercia térmica de la biomasa y de las paredes de la cámara, en la que el almacenamiento de energía domina la respuesta térmica antes de que el intercambio por conducción se establezca.

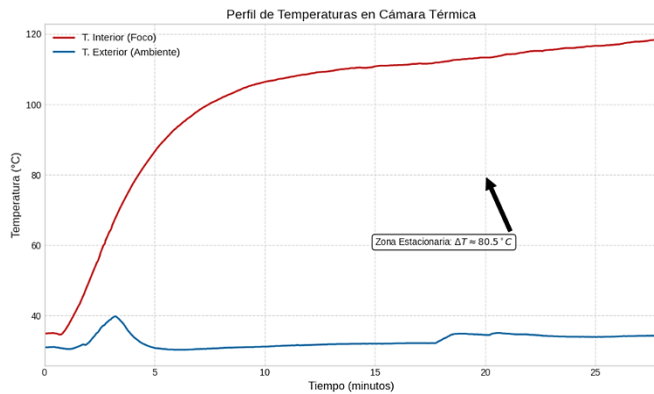


Fig. 4 Historial térmico experimental. Se observa la estabilización de las temperaturas interna (T_{int}) y externa (T_{ext}) a partir del minuto 30, confirmando el régimen estacionario necesario para la medición.

Como se muestra en la Tabla II, los datos se discretizaron para evaluar la convergencia térmica. Se observa un transitorio inicial con incremento rápido de temperatura, seguido por una estabilización progresiva. En este tramo, la diferencia entre $k_{aparente}$ y $k_{corregida}$ evidencia el efecto de pérdidas térmicas del sistema y la necesidad de reportar la conductividad en su forma corregida.

TABLA II
REGISTRO DE EVOLUCIÓN TÉRMICA Y COMPARATIVA DE CONDUCTIVIDAD ($k_{APARENTE}$ VS $k_{EFECTIVA}$)

Tiempo (min)	T. Int (°C)	T. Ext (°C)	$\Delta(^{\circ}C)$	k Aparent (100W)	k Corregido ($\eta = 0.47$)
2	52.4	22.8	29.5	0.5464	0.2568
4	74	24.9	49.1	0.3285	0.1544
6	88.5	26.6	61.9	0.2605	0.1224
8	98.3	28	70.3	0.2296	0.1079
10	104.8	29.2	75.6	0.2132	0.1002
12	109.2	30.1	79.1	0.204	0.0959
14	112.1	30.9	81.2	0.1985	0.0933
16	114.1	31.5	82.6	0.1953	0.0918

18	115.4	32	83.4	0.1934	0.0909
20	116.3	32.4	83.8	0.1924	0.0904
22	116.9	32.8	84.1	0.1918	0.0901
24	117.3	33	84.2	0.1915	0.09
26	117.5	33.3	84.2	0.1914	0.09
28	117.7	33.5	84.2	0.1915	0.09
30	117.8	33.6	84.2	0.1915	0.09

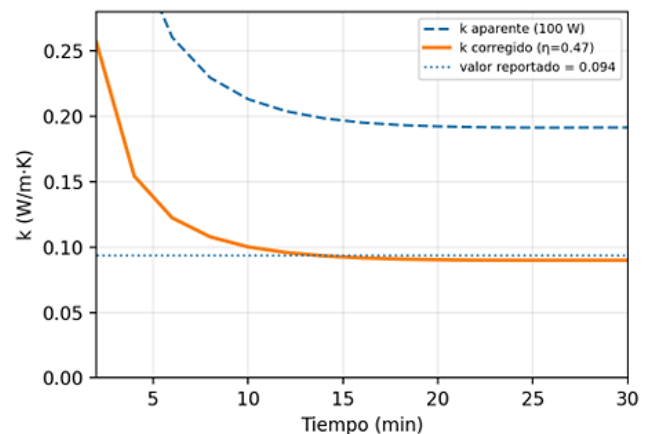
El sistema alcanzó el régimen estacionario (steady-state) a partir del minuto 30, cumpliendo el criterio de estabilidad propuesto por Ramírez-Rivera et al. [9], donde la tasa de variación temporal de la temperatura superficial $\left|\frac{\partial T}{\partial t}\right|$ se mantuvo por debajo de 0.05 K/min durante un intervalo de integración de 30 min. Este comportamiento confirma que el control PID implementado en el microcontrolador estabiliza la potencia térmica suministrada y mantiene un diferencial de temperatura estable, condición necesaria para la aplicación de la ley de Fourier. Frente a métodos dinámicos como los reportados por [6], el enfoque estacionario reduce la incertidumbre asociada a la respuesta transitoria y a la heterogeneidad propia de materiales fibrosos como el Ichu, lo que mejora la consistencia en la estimación de $k_{corregida}$.

B. Fenomenología del Flujo de Calor y Factor de Eficiencia

El análisis numérico (CFD)

se empleó para cuantificar los errores sistemáticos asociados a la escala reducida. Las simulaciones mostraron que el transporte térmico dentro del recinto no es estrictamente unidimensional. En particular, los contornos de velocidad de la Fig. 6 evidencian la formación de celdas de recirculación por convección natural en las esquinas superiores de la cámara, en línea con el comportamiento reportado para cavidades cerradas en condiciones de gradientes térmicos significativos [14], [15].

Fig. 5 Convergencia de la conductividad térmica efectiva (k_{eff}). La línea



continua indica el valor estabilizado en **0.094 W/mK** tras aplicar el factor de eficiencia $\eta = 0.47$, utilizado para corregir el sesgo geométrico del prototipo respecto del caso ideal.

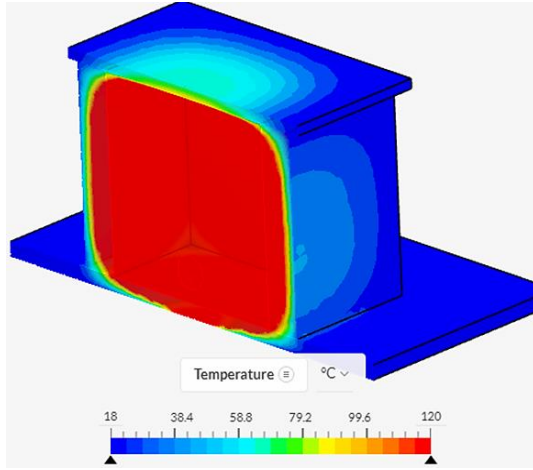


Fig. 6 Simulación numérica del perfil térmico (CFD). Los contornos de temperatura evidencian las pérdidas de calor laterales, gradientes hacia bordes y aristas, y una distribución térmica no uniforme dentro del prototipo, respaldando la necesidad de una corrección global $\eta < 1$.

Estas corrientes convectivas, sumadas a la conducción a través de puentes térmicos en el recinto de EPS, desvían una fracción no despreciable de la energía suministrada. En consecuencia, el análisis CFD mostró que el prototipo no puede describirse mediante una hipótesis estrictamente unidimensional ni adiabática en paredes laterales. Este hallazgo respalda la introducción de un factor global de eficiencia $\eta = 0.47$ dentro de una calibración experimental-numérica, con el fin de corregir el sesgo geométrico del dispositivo y evitar la sobreestimación de la conductividad térmica del material. Al incorporar η en la ecuación de cálculo, se separa la respuesta del material de las pérdidas geométricas propias del montaje experimental [9], [13]. Además, este planteamiento es consistente con la advertencia de [12], según la cual ignorar el efecto del factor de forma en prototipos pequeños tipo “Hot Box” conduce a una sobreestimación marcada de la conductividad térmica.

C. Conductividad Térmica Efectiva y Comparativa

Tras aplicar el modelo de corrección a los datos experimentales, se obtuvo una conductividad térmica corregida para la **Stipa Ichu** (densidad 150 kg/m^3) de:

$$k_{\text{corr}} = 0.094 \pm 0.005 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$$

La Tabla III contextualiza el desempeño de la fibra de **Stipa Ichu** frente a materiales de uso común. Con $k_{\text{corr}} = 0.094 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ el Ichu presenta un desempeño térmico superior al de materiales tradicionales de albañilería como el adobe ($k \approx 0.25 - 0.40 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) lo que implica una resistencia térmica del orden de tres veces mayor para un mismo espesor [10], [16]. En comparación con ladrillos de arcilla, cuyos rangos típicos se sitúan en el orden de $0.70 - 1.00 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, la diferencia resulta más marcada, reforzando el valor del Ichu como núcleo aislante en envoltentes ligeras [17]

TABLA III
COMPARACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS CON MATERIALES DE REFERENCIA

Material	$k \text{ (W/mK)}$	Referencia
Stipa Ichu (Puro)	0.094	<i>Este Estudio</i>
Ladrillo de Arcilla	0.70 - 1.00	<i>Aza – Medina [1]</i>
Adobe Tradicional	0.25 - 0.40	<i>Cosentino [2]</i>
Paja de Trigo	0.08 - 0.12	<i>Csanády [18]</i>

El desempeño térmico del Ichu es comparable al reportado para fibras vegetales comercializadas (p. ej., cáñamo con $k \approx 0.098 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), lo que respalda su tratamiento como material de ingeniería para envoltentes y no solo como recurso vernáculo [2], [3]

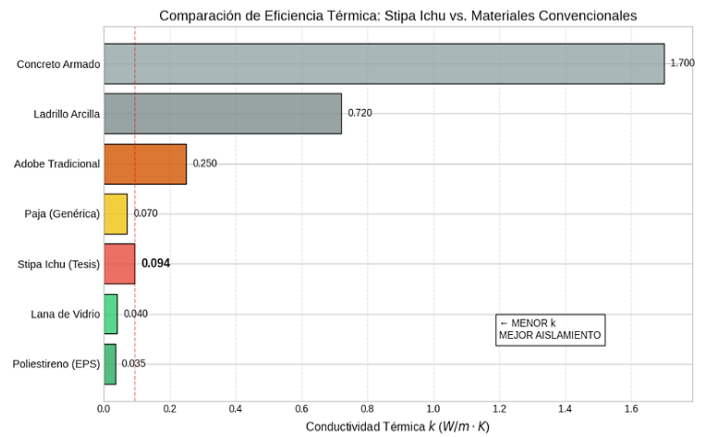


Fig. 7 Comparación de desempeño térmico. La fibra de **Stipa Ichu** demuestra propiedades aislantes superiores a los materiales vernáculos (adobe, ladrillo) y competitivos frente a aislantes industriales

D. Impacto en la Envoltente Térmica Altoandina

La relevancia práctica de estos resultados se refleja en la mitigación del friaje mediante mejoras pasivas en la envoltente. Para un muro base de adobe de 40 cm ($R \approx 0.46 \text{ m}^2\text{K/W}$), la incorporación de un revestimiento de 5 cm de **Stipa Ichu** con $k_{\text{corr}} = 0.094 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ aportaría $\Delta R = L/k_{\text{corr}} \approx 0.53 \text{ m}^2\text{K/W}$, elevando la resistencia total a $R_{\text{tot}} \approx 0.99 \text{ m}^2\text{K/W}$ y, en la práctica, duplicando la capacidad aislante del cerramiento [1]. Bajo criterios de confort adaptativo aplicados a vivienda rural altoandina, esta ganancia reduce el descenso térmico nocturno y sostiene temperaturas interiores por encima de umbrales de riesgo respiratorio, sin recurrir a calefacción activa de mayor consumo o costo [8].

En términos de implementación, el Ichu constituye un recurso disponible en el entorno altoandino y, en muchos casos, subutilizado como insumo técnico para la envoltente. En ese marco, el aporte de este estudio no se limita a reportar un valor puntual de conductividad, sino a entregar un parámetro **corregido** (k_{corr}) y un esquema de corrección por eficiencia que permiten dimensionar revestimientos con una base cuantitativa, evitando sobreestimar el desempeño por pérdidas tridimensionales en prototipos a escala reducida [12]. Esta

validación fortalece el uso de fibras biobasadas como alternativa de aislamiento en contextos donde la logística y el costo condicionan la adopción de soluciones industriales, y se alinea con la evidencia de desempeño térmico de biomasas y aislantes naturales reportada en el ámbito de edificaciones energéticamente eficientes [2], [3], [19]

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio caracterizó térmicamente la fibra de *Stipa Ichu* mediante un enfoque híbrido experimental-numérico, y sustentó su aplicación como aislante en viviendas altoandinas expuestas a heladas y friaje. A partir de los resultados obtenidos, se derivan las siguientes conclusiones:

Validación metodológica: Se demostró que un prototipo tipo “Hot Box” a escala reducida y de bajo costo puede emplearse para estimar conductividad térmica si se acompaña de una calibración experimental-numérica. El análisis CFD mostró pérdidas tridimensionales por puentes térmicos en aristas, gradientes espaciales no uniformes y recirculación convectiva interna, lo que justificó la incorporación de un factor global de eficiencia del prototipo $\eta = 0.47$, usado para separar el sesgo geométrico del dispositivo respecto a la respuesta del material [9], [12], [13]

Propiedad térmica del Ichu: La conductividad térmica **corregida** de *Stipa Ichu* (densidad 150 kg/m^3) se determinó como $k_{\text{corr}} = 0.094 \pm 0.005 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Este valor ubica al Ichu como aislante funcional frente a materiales de cerramiento tradicionales (adobe, ladrillo) y consistente con el rango reportado para biomasas fibrosas, donde el aire ocluido en la estructura porosa domina el desempeño térmico [2], [3], [18]

Impacto en la habitabilidad: La incorporación de un revestimiento de 5 cm de fibra de Ichu compactada sobre muros típicos de adobe puede incrementar la resistencia térmica del cerramiento (R-value) en más del 100%, lo que se traduce en mayor amortiguamiento del enfriamiento nocturno sin recurrir a calefacción activa de alto costo. En términos de confort interior, el resultado es coherente con intervenciones de aislamiento biobasado reportadas para vivienda rural altoandina [1], [8].

Como trabajo futuro, se recomienda evaluar el comportamiento higrotérmico del material bajo variaciones extremas de humedad relativa y desarrollar soluciones de encapsulamiento con desempeño frente a fuego y degradación, de modo que el aislamiento conserve prestaciones en servicio y mantenga condiciones de seguridad a largo plazo [1], [3].

Aunque el análisis CFD respaldó físicamente la necesidad de introducir un factor global de eficiencia η , su validación en esta etapa debe interpretarse como experimental-numérica y principalmente cualitativa, ya que no se contó con una comparación punto a punto completa entre temperaturas simuladas y medidas en posiciones homólogas del prototipo.

REFERENCIAS

- [1] L. C. Aza-Medina, H. A. Ccama-Condori, D. K. Pari-Quispe, A. H. Torres-Benavides, and J. A. Humalla-Quispe, “Thermo-insulating panels based on *Stipa Ichu*, cellulose and gypsum for high Andean housing claddings,” *Estoa*, vol. 14, no. 28, pp. 11–24, Jul. 2025, doi: 10.18537/est.v014.n028.a01.
- [2] L. Cosentino, J. Fernandes, and R. Mateus, “A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials,” Jun. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16124676.
- [3] P. Raja *et al.*, “A Review of Sustainable Bio-Based Insulation Materials for Energy-Efficient Buildings,” Oct. 01, 2023, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/mame.202300086.
- [4] I. Yang, D. Kim, and S. Lee, “Construction and preliminary testing of a guarded hot plate apparatus for thermal conductivity measurements at high temperatures,” 2018. [Online]. Available: www.randb.co.kr.
- [5] A. Society for Testing, “ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded Hot-Plate Apparatus.”
- [6] K. Trgala, M. Pavelek, and R. Wimmer, “Energy Performance of Five Different Building Envelope Structures Using a Modified Guarded Hot Box Apparatus-Comparative Analysis,” 2019.
- [7] M. Mirzaei *et al.*, “CFD simulation and experimental validation of multiphase flow in industrial cyclone preheaters,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 465, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.142757.
- [8] V. M. Torres and J. R. Tacza, “Bio Thermal Panels Applied to the Comfort of Rural Homes in the District of Sincos in 2024,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Mar. 2025. doi: 10.1051/e3sconf/202562003002.
- [9] F. A. Ramírez-Rivera, N. Guerrero-Rodríguez, Y. García-Frómata, D. Vargas, and M. Montanaro, “Experimental Characterization of Thermal Conductivity with a New Compact Hot-Box Prototype,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15084137.
- [10] E. Palo-Tejada, A. Puma, V. Campos-Falcon, A. Guzman, R. Perez, and J. Tunti, “Low-cost portable system for measuring thermal conductivity of building,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Feb. 2022. doi: 10.1088/1742-6596/2180/1/012002.
- [11] Y. A. ; G. A. J. Çengel, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 6th ed. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2020.
- [12] X. Zhao, S. A. Mofid, M. R. A. Hulayel, G. W. Saxe, B. Petter Jelle, and R. Yang, “Reduced-Scale Hot Box Method for Thermal Characterization of Window Insulation Materials,” 2019.
- [13] H. Al-Awadi, A. Alajmi, and H. Abou-Ziyan, “Energy Assessment of the Thermal Bridging Effects on Different Structural Envelope Types Using Mixed-Equivalent-Wall Method,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 12, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15124493.
- [14] Q. Yang, X. Wu, J. Li, and M. Wang, “Optimization study of thermal defects in prefabricated rural residential buildings based on Fluent,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 75, p. 107120, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.107120.
- [15] S. Tao, N. Yu, F. Jiang, X. Su, and K. Zhao, “First Section, North of Second Ring Road 9 Chengdu.” [Online]. Available: <https://ssrn.com/abstract=4439368>
- [16] M. H. Cuenca, J. M. Pias, M. A. Mendoza, F. S. Espinoza, J. L. Solis, and M. M. Gomez, “Design and construction of a portable apparatus to measure thermal conductivity,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Mar. 2021. doi: 10.1088/1742-6596/1841/1/012009.
- [17] M. Lachheb, N. Youssef, and Z. Younsi, “A Comprehensive Review of the Improvement of the Thermal and Mechanical Properties of Unfired Clay Bricks by Incorporating Waste Materials,” Sep. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/buildings13092314.
- [18] D. Csanády, O. Fenyvesi, and B. Nagy, “Heat transfer in straw-based thermal insulating materials,” *Materials*, vol. 14, no. 16, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14164408.
- [19] K. E. Mazur, W. J. Wardal, J. Barwicki, and M. Tseyko, “Thermal Insulation of Agricultural Buildings Using Different Biomass Materials,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.3390/en18030636.