



Mix Sustentável



Simulação CFD e otimização passiva do conforto térmico em habitação social em contextos andinos

CFD SIMULATION AND PASSIVE OPTIMIZATION OF THERMAL COMFORT IN SOCIAL HOUSING IN ANDEAN CONTEXTS

SIMULACIÓN CFD Y OPTIMIZACIÓN PASIVA DEL CONFORT TÉRMICO EN VIVIENDA SOCIAL EN CONTEXTOS ANDINOS

Pablo Andrés Echeverría-Landín¹

Guillermo Guzmán-Chávez²

¹ Grupo de Investigación Colectivo de Investigación de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Hábitat Infraestructura y Creatividad, Carrera de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador-Santo Domingo

² Grupo de Investigación Estudios del Territorio y Hábitat, Escuela de Hábitat Infraestructura y Creatividad, Carrera de Arquitectura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador-Ibarra

Correspondencia para: paecheverrial@pucesd.edu.ec

Resumo: O presente estudo avalia as condições de conforto térmico em uma habitação de interesse social localizada na cidade de Quito, Equador, por meio do uso de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e da aplicação de estratégias de projeto passivo. A pesquisa baseia-se em um modelo representativo construído com sistemas convencionais de concreto e alvenaria, caracterizados por um desempenho ambiental limitado. A metodologia emprega o software STAR-CCM+ para analisar a distribuição de temperatura, o comportamento do

ARTIGO ORIGINAL - SEÇÃO CIENTÍFICA

Editor responsável pelo artigo: Lisiane Ilha Librelotto, Dr. Eng., Paulo Cesar Machado Ferroli, Dr. Eng.

Recebido em

26/11/2025

Aprovado em

26/12/2025

Publicado em

10/09/2026

PID

10.29183/2447-

3073.MIX2026.v12.n3.19-41



Texto padrão da Licença

Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional.

Declaração de Copyright

Autores mantém os direitos autorais e concedem à revista o direito de primeira publicação, com o trabalho simultaneamente licenciado sob a Licença Creative Commons Attribution que

fluxo de ar e os indicadores de qualidade ambiental interna, especificamente o Voto Médio Estimado (PMV) e a Percentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD), conforme a norma ISO 7730. Foram avaliados quatro cenários: modelo base, melhoria da envolvente, incorporação de sistemas de captação de vento e otimização da orientação e das aberturas. Os resultados evidenciam que intervenções centradas exclusivamente na envolvente geram melhorias limitadas, enquanto estratégias integradas que combinam ventilação natural e projeto arquitetônico permitem reduzir a temperatura interna em até 2°C e aumentar significativamente a área de conforto. O estudo demonstra que o conforto térmico em habitações sociais depende da interação entre materiais, ventilação e configuração espacial, oferecendo uma abordagem replicável para contextos andinos.

Palavras-chave: Conforto térmico; Simulação CFD; Habitação social; Projeto passivo; Ventilação natural.

Abstract: This study evaluates thermal comfort conditions in a social housing unit located in Quito, Ecuador, through the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations and passive design strategies. The research is based on a representative housing model constructed with conventional concrete and masonry systems, characterized by limited environmental performance. The methodology employs STAR-CCM+ software to analyze temperature distribution, airflow behavior, and indoor environmental quality indicators, specifically Predicted Mean Vote (PMV) and Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD), in accordance with ISO 7730 standards. Four scenarios were assessed: baseline model, envelope improvement, implementation of wind-capturing systems, and optimization of building orientation and openings. The results demonstrate that interventions focused solely on the building envelope produce limited improvements, whereas integrated strategies combining natural ventilation and architectural design achieve a reduction in indoor temperature of up to 2°C and a significant increase in the area of thermal comfort. The study confirms that thermal comfort in social housing depends on the interaction between materials, ventilation, and spatial configuration, providing a replicable approach for similar Andean contexts.

Keywords: Thermal comfort; CFD simulation; Social housing; Passive design; Natural ventilation.

Resumen: El presente estudio evalúa las condiciones de confort térmico en una vivienda de interés social ubicada en la ciudad de Quito, Ecuador, mediante el uso

permite o compartilhamento do trabalho com reconhecimento da autoria e publicação inicial nesta revista.

Contribuição dos autores segundo a Taxonomia CRediT

PAEL: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. GGCH: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Conflito de interesses

Nothing to declare.

Fonte de financiamento

Nothing to declare.

de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y la aplicación de estrategias de diseño pasivo. La investigación se basa en un modelo representativo construido con sistemas convencionales de hormigón y mampostería, caracterizados por un desempeño ambiental limitado. La metodología emplea el software STAR-CCM+ para analizar la distribución de temperatura, el comportamiento del flujo de aire y los indicadores de calidad ambiental interior, específicamente el Voto Medio Estimado (PMV) y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD), conforme a la norma ISO 7730. Se evaluaron cuatro escenarios: modelo base, mejora de la envolvente, incorporación de sistemas de captación de viento y optimización de la orientación y aperturas. Los resultados evidencian que las intervenciones centradas únicamente en la envolvente generan mejoras limitadas, mientras que las estrategias integradas que combinan ventilación natural y diseño arquitectónico permiten reducir la temperatura interior hasta en 2 °C y aumentar significativamente el área de confort. El estudio demuestra que el confort térmico en vivienda social depende de la interacción entre materiales, ventilación y configuración espacial, aportando un enfoque replicable para contextos andinos.

Palabras clave: Confort térmico; Simulación CFD; Vivienda social; Diseño pasivo; Ventilación natural.

Como citar: ECHEVERRÍA-LANDÍN, Pablo Andrés; GUZMÁN-CHÁVEZ, Guillermo. Simulación CFD y optimización pasiva del confort térmico en vivienda social en contextos andinos. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v.12,n.3, p.19-41,2025. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2026.v12.n3.19-41>.

1 INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es reconocido a nivel global como uno de los principales responsables del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero, representando aproximadamente el 36% del consumo de energía y el 37% de las emisiones de CO_2 a nivel mundial. En este contexto, el desempeño ambiental de las edificaciones residenciales, y en particular de la vivienda de interés social, se ha convertido en un campo de investigación prioritario, debido a su implementación masiva y su impacto directo en la calidad de vida de la población (Cabeza; Chàfer; Mata, 2020). En países en desarrollo, especialmente en América Latina, los proyectos de vivienda social suelen estar condicionados por criterios de reducción de costos, lo que con frecuencia conlleva a la desatención de aspectos fundamentales como el confort térmico y la calidad ambiental interior.

El confort térmico constituye un componente esencial de la calidad ambiental interior (Indoor Environmental Quality, IEQ), influyendo directamente en la salud, el bienestar y el desempeño de los ocupantes (Xu; Zhang, 2024). Tradicionalmente, su evaluación se ha basado en modelos estáticos como el Voto Medio Estimado (PMV) propuesto por Fanger, los cuales establecen condiciones de equilibrio térmico en función de variables físicas y fisiológicas. No obstante, en las últimas décadas se han desarrollado modelos adaptativos que incorporan la interacción del usuario con el entorno, reconociendo la variabilidad de las condiciones climáticas y culturales (Dear; Brager, 1998; Jha *et al.*, 2024). A pesar de estos avances, en el contexto de la vivienda social, especialmente en regiones de alta altitud como la zona andina, la evaluación del confort térmico continúa siendo limitada y frecuentemente reducida a parámetros normativos simplificados.

En el caso ecuatoriano, el crecimiento sostenido del sector de la construcción durante la última década ha impulsado el desarrollo de programas de vivienda social a gran escala. Sin embargo, los marcos normativos vigentes, como la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), si bien incorporan criterios de eficiencia energética, presentan limitaciones en cuanto a la evaluación integral del confort térmico y la ventilación natural. Como resultado, muchas viviendas presentan deficiencias en su desempeño ambiental, evidenciando problemas como sobrecalentamiento, ventilación insuficiente y condiciones propicias para la aparición de humedad y condensaciones. Estas problemáticas se intensifican en ciudades como Quito, donde las condiciones climáticas están determinadas por factores complejos como la altitud, la radiación solar intensa y patrones de viento variables.

Diversos estudios han demostrado que la envolvente térmica del edificio desempeña un papel determinante en el comportamiento térmico interior, especialmente en relación con los mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Sin embargo, las investigaciones centradas exclusivamente en propiedades materiales tienden a omitir la interacción dinámica entre el flujo de aire y la configuración arquitectónica, aspecto fundamental para comprender los procesos de ventilación natural (Peker; Street, 2025). En este sentido, el comportamiento del aire en el interior de los espacios construidos se configura como un factor crítico para el logro del confort térmico pasivo, particularmente en edificaciones que no dependen de sistemas mecánicos de climatización (Heiselberg, 2000).

En este contexto, la Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) se ha consolidado como una herramienta avanzada para el análisis del comportamiento del aire y la transferencia térmica en edificaciones. Esta metodología permite simular con alto nivel de detalle variables como velocidad del aire, presión, turbulencia y distribución térmica, facilitando la comprensión de fenómenos complejos que difícilmente pueden ser capturados mediante métodos analíticos tradicionales (Wehrle *et al.*, 2024; Blocken, 2015). En el ámbito de la arquitectura y la ingeniería de edificaciones, el uso de CFD ha demostrado ser eficaz para evaluar estrategias de ventilación natural, optimizar la orientación de los edificios y mejorar el desempeño energético (Chow, 1996).

A pesar de sus ventajas, la aplicación de herramientas CFD en el estudio de la vivienda social sigue siendo limitada, especialmente en contextos latinoamericanos, donde predominan enfoques basados en simulaciones energéticas simplificadas o mediciones empíricas (Givoni, 2011; Dear; Brager, 2002). Asimismo, existe una brecha significativa en la integración de estas simulaciones con índices estandarizados de confort térmico, como el PMV y el Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD), establecidos en la norma ISO 7730, los cuales permiten traducir variables físicas en indicadores centrados en el usuario (ISO 7730, 2005). La articulación entre estos enfoques resulta clave para desarrollar estrategias de diseño basadas en evidencia.

En regiones tropicales de alta altitud, como la región andina, la interacción entre radiación solar, variaciones térmicas diurnas y patrones de viento genera condiciones ambientales complejas que desafían los enfoques convencionales de diseño arquitectónico (Givoni, 1998; Emmanuel, 2005). En este tipo de contextos, las estrategias pasivas, tales como la ventilación natural, la orientación del edificio y la optimización de la envolvente térmica, adquieren una relevancia fundamental, al permitir mejorar el confort interior sin incrementar el consumo energético (Peker; Street, 2025). No obstante, su efectividad depende de un entendimiento preciso de la dinámica del aire y su interacción con los elementos arquitectónicos.

En este marco, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las condiciones de confort térmico en una vivienda de interés social ubicada en la ciudad de Quito, mediante una metodología basada en simulación CFD utilizando el software STAR-CCM+. La investigación se enfoca en analizar la relación entre las características de la envolvente, el comportamiento del flujo de aire y el confort térmico interior, empleando índices estandarizados como PMV y PPD. A diferencia de enfoques tradicionales centrados únicamente en la temperatura, este trabajo incorpora la dinámica del aire como variable central en la evaluación del confort.

Para ello, se plantean tres escenarios de intervención: (1) mejora de la envolvente térmica mediante la incorporación de aislamiento, (2) optimización de la ventilación natural mediante sistemas de captación de viento, y (3) reconfiguración de la orientación y aperturas del edificio en función de los vientos dominantes. Estos escenarios son evaluados mediante simulaciones numéricas, permitiendo comparar su impacto en las condiciones térmicas interiores.

El aporte principal de esta investigación radica en demostrar que el confort térmico pasivo en la vivienda social no depende exclusivamente de la mejora de los materiales constructivos, sino de la integración entre la configuración arquitectónica, la ventilación natural y el contexto ambiental. Mediante la combinación de simulación CFD e índices de confort, se propone un enfoque metodológico replicable en contextos climáticos similares, contribuyendo al desarrollo de estrategias de diseño más eficientes y sostenibles.

2 ESTADO DEL ARTE

En la última década, la investigación sobre confort térmico en edificaciones ha experimentado una transformación significativa, impulsada por la necesidad de reducir el consumo energético, mejorar la calidad ambiental interior y responder a los desafíos del cambio climático. Este cambio ha llevado a una evolución desde enfoques tradicionales centrados en variables estáticas hacia modelos integrados que consideran la interacción entre el edificio, el usuario y el entorno (Maghami *et al.*, 2025; Kirme; Kapse, 2024).

Actualmente, el estudio del confort térmico en vivienda social se articula en tres ejes principales: (i) optimización de la envolvente térmica, (ii) estrategias avanzadas de ventilación natural y (iii) la integración de herramientas de simulación de alto nivel, particularmente CFD, dentro de enfoques de diseño basado en desempeño (performance-based design).

2.1 Desempeño térmico de la envolvente en vivienda social

La envolvente térmica constituye uno de los elementos más influyentes en el comportamiento energético y ambiental de los edificios. Estudios recientes han demostrado que la transmitancia térmica, la inercia térmica y la composición material de los cerramientos determinan en gran medida las condiciones interiores de temperatura y confort (Cabeza; Chàfer; Mata, 2020). En el caso de la vivienda social, donde predominan sistemas constructivos convencionales como bloques de hormigón y estructuras de baja eficiencia térmica, la envolvente suele presentar elevados coeficientes de transmisión de calor, lo que incrementa la vulnerabilidad térmica de los ocupantes (Krelling *et al.*, 2023).

Investigaciones en América Latina han evidenciado que la incorporación de materiales aislantes, como el poliestireno expandido (EPS) o la lana mineral, puede reducir significativamente las cargas térmicas internas y mejorar el desempeño energético (Kirme; Kapse, 2024; Nguyen *et al.*, 2022). Sin embargo, varios estudios coinciden en que las mejoras en la envolvente, aunque necesarias, no son suficientes por sí solas para garantizar condiciones de confort, especialmente en climas donde la ventilación natural juega un rol determinante (Givoni, 2011).

Adicionalmente, investigaciones han destacado la importancia de considerar la envolvente como un sistema integral, en el que la interacción entre fachadas, cubiertas y aperturas influye de manera conjunta en el comportamiento térmico del edificio (Maghami *et al.*, 2025). Este enfoque sistémico ha permitido superar las limitaciones de estudios aislados, promoviendo análisis más integrales del desempeño edificatorio.

2.2 Ventilación natural y confort térmico

La ventilación natural ha sido ampliamente reconocida como una estrategia pasiva clave para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético en edificaciones (Heiselberg, 2000). Su efectividad depende de múltiples factores, entre los que destacan la orientación del edificio, la configuración de las aperturas, la velocidad y dirección del viento, y la geometría interior de los espacios (Hashemi; Mills, 2025; Geros *et al.*, 2005).

En climas cálidos y templados, diversos estudios han demostrado que la ventilación cruzada puede generar reducciones significativas en la temperatura interior, mejorando las condiciones de confort sin necesidad de sistemas mecánicos (Niza *et al.*, 2024). No obstante, en contextos de alta altitud como la región andina, donde las condiciones climáticas presentan una combinación de alta radiación solar y temperaturas moderadas, la ventilación natural adquiere características particulares que requieren análisis específicos (Emmanuel; Steemers, 2018).

Investigaciones recientes han explorado el uso de dispositivos arquitectónicos tradicionales, como torres de viento (wind catchers) y chimeneas solares, para potenciar el flujo de aire en edificaciones (Obeidat; Kamal; Almalkawi, 2021; Jia; Srinivasan, 2020). Estos sistemas han demostrado ser efectivos para incrementar la velocidad del aire interior y mejorar la renovación del aire, contribuyendo al confort térmico en entornos con baja velocidad de viento.

Sin embargo, uno de los principales desafíos en el estudio de la ventilación natural radica en la complejidad de los flujos de aire en espacios interiores, los cuales están influenciados por fenómenos de turbulencia, recirculación y gradientes de presión. Estos fenómenos no pueden ser adecuadamente representados mediante modelos simplificados, lo que ha impulsado el uso de herramientas avanzadas de simulación.

2.3 Aplicación de CFD en el análisis del confort térmico

El uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha experimentado una expansión significativa en el ámbito de la edificación durante los últimos años, consolidándose como una herramienta clave para el análisis del comportamiento del aire y la transferencia térmica (Nielsen, 2015). A diferencia de los modelos tradicionales, el CFD permite capturar fenómenos complejos como turbulencias, recirculaciones y gradientes de presión, los cuales son determinantes en la ventilación natural.

Las investigaciones más recientes han avanzado hacia la integración de CFD con modelos acoplados (co-simulation), combinando simulaciones de flujo de aire con análisis energético y modelos de confort (Jia; Srinivasan, 2020). Este enfoque permite evaluar de manera simultánea múltiples variables, generando una comprensión más completa del desempeño ambiental de los edificios.

En el caso específico de la vivienda social, el uso de CFD ha permitido identificar problemáticas que no son evidentes mediante métodos tradicionales, como la formación de zonas de estancamiento del aire,

diferencias térmicas verticales y patrones de ventilación ineficientes (Ramponi; Blocken, 2012; Nguyen *et al.*, 2022). Estos hallazgos han sido fundamentales para el desarrollo de estrategias de diseño más eficientes.

No obstante, a pesar de estos avances, la aplicación de CFD en contextos latinoamericanos sigue siendo limitada, particularmente en investigaciones enfocadas en vivienda social. Esto se debe, en parte, a la complejidad técnica del modelado y a la necesidad de recursos computacionales avanzados (Slimani; Mazouz; Nekhila, 2025).

2.4 Confort térmico: hacia enfoques centrados en el usuario

El concepto de confort térmico ha evolucionado significativamente, incorporando enfoques adaptativos y modelos probabilísticos que consideran la percepción subjetiva del usuario (Kaushik *et al.*, 2020; López-pérez; Flores-prieto; Ríos-rojas, 2019). En este contexto, el uso de índices como PMV y PPD continúa siendo relevante, pero su interpretación se ha enriquecido mediante la incorporación de variables dinámicas como la velocidad del aire y la variabilidad térmica.

Estudios recientes han demostrado que la distribución espacial del confort es tan importante como su valor promedio, lo que ha llevado al desarrollo de metodologías que analizan el confort en términos de áreas dentro del espacio (Peker; Street, 2025). Este enfoque resulta particularmente relevante en viviendas, donde las condiciones térmicas pueden variar significativamente entre diferentes zonas.

Asimismo, se ha evidenciado que la ventilación natural puede ampliar los rangos aceptables de confort térmico, especialmente en climas cálidos y templados, lo que refuerza la importancia de integrar esta variable en los modelos de evaluación (Karyono *et al.*, 2020).

3 METODOLOGÍA

El enfoque cuantitativo fundamentado en simulaciones numéricas es el que se desarrolla en la investigación. A través del uso de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se evalúa el comportamiento, así como la dinámica del flujo de aire en una vivienda de interés social. El desarrollo metodológico se aborda en cuatro fases: (i) definición del caso de estudio, (ii) modelado geométrico y configuración del dominio, (iii) simulación CFD y (iv) evaluación del confort térmico mediante índices estandarizados.

3.1 Caso de estudio

El objeto de estudio corresponde a una vivienda de interés social ubicada en la ciudad de Quito, Ecuador, caracterizada por un sistema constructivo convencional basado en estructura de hormigón armado y cerramientos de bloque de hormigón. La selección del caso responde a su representatividad dentro de los modelos

habitacionales desarrollados en contextos urbanos andinos. Las condiciones climáticas del entorno se definieron a partir de datos meteorológicos locales, considerando temperatura exterior, humedad relativa, velocidad y dirección del viento predominante, así como condiciones de radiación solar. Se establecieron escenarios de análisis correspondientes a condiciones críticas de temperatura, con valores exteriores de hasta 28 °C y temperaturas de cubierta superiores debido a la incidencia solar.

3.2 Modelado geométrico y configuración del dominio

El modelo tridimensional de la vivienda fue desarrollado a partir de su configuración arquitectónica real, incorporando los elementos constructivos principales: fachadas, cubiertas, divisiones interiores y aperturas. El dominio de simulación incluyó tanto el espacio interior como un volumen exterior circundante, con el fin de capturar adecuadamente la interacción entre el flujo de aire exterior e interior. Para ello se utilizó el software Revit, con el cual se procedió a realizar las simulaciones de geometría solar para identificar los elementos de mayor o menor incidencia y acumulación de calor.

En el estudio del confort interior de un espacio ocupa un rol importante el aire y sus renovaciones, para entender su accionar tanto en la parte exterior así como en el interior del modelo de estudio fue necesario el empleo del software Flow Design, con el cual, al simular un túnel de viento, se pudo evidenciar las zonas de alta y baja presión, áreas que tienen influencia directa en el confort interior de los espacios de uso diario.

De igual manera intervienen los procesos de intercambio y transformación de energía entre el medio ambiente y la envolvente térmica del modelo de estudio, para conseguir los datos de transmitancias de los componentes de la envolvente se empleó el software Condensaciones, obteniendo de esta manera los valores de transmitancias térmicas de la envolvente.

Para el análisis CFD se empleó el software STAR-CCM+, ampliamente utilizado en estudios de mecánica de fluidos aplicada a edificaciones. Este programa permitió modelar la capa última de la envolvente térmica en la cual fue colocado los valores de transmitancias térmicas obtenidas del programa Condensaciones.

3.3 Discretización y análisis de independencia de malla

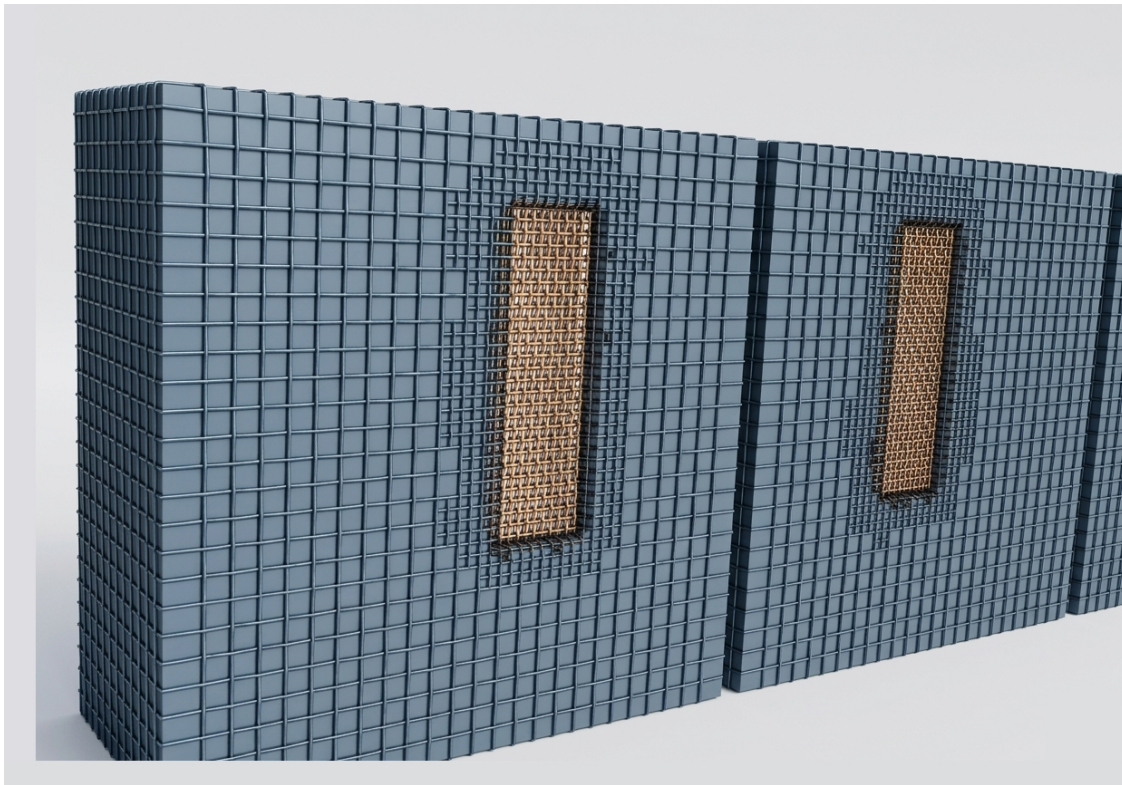
El dominio computacional fue discretizado mediante un mallado tridimensional estructurado, con un tamaño base de celda de 0.10 m. Se aplicó refinamiento local en zonas críticas, particularmente en aperturas (ventanas y puertas), donde se producen gradientes significativos de velocidad y presión.

El tamaño base del mallado fue definido en 0.10 m, con refinamientos de hasta el 25% en zonas de entrada y salida de flujo (Figura 1).

Con el fin de garantizar la independencia de los resultados respecto al tamaño de la malla, se realizó un análisis de sensibilidad utilizando tres configuraciones: malla gruesa, media y fina. Se compararon variables clave como temperatura y velocidad del aire en puntos representativos del dominio, observándose variaciones

inferiores al 5% entre las mallas media y fina. En consecuencia, se adoptó la malla intermedia como solución óptima, equilibrando precisión y eficiencia computacional.

Figura 1 – Configuración de malla en modelado para simulación



Fuente: Autores.

3.4 Configuración de la simulación CFD

La simulación se desarrolló bajo condiciones de régimen estacionario, considerando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ (k-epsilon), ampliamente validado en estudios de ventilación natural en edificaciones. Las condiciones de contorno se definieron de la siguiente manera:

- Entrada de aire (inlet): velocidad constante de 0.58 m/s, correspondiente al viento predominante, con intensidad de turbulencia definida;
- Salida de aire (outlet): condiciones de presión atmosférica constante;
- Temperatura exterior: 28 °C;
- Temperatura inicial interior: 23 °C;
- Propiedades del aire: definidas como fluido incompresible con comportamiento newtoniano.

Adicionalmente, se incorporaron propiedades termofísicas de los materiales constructivos, incluyendo conductividad térmica, densidad y capacidad calorífica, con el fin de simular los procesos de transferencia de calor a través de la envolvente. Se realizaron iteraciones hasta alcanzar la convergencia de los residuos, estableciendo un umbral de estabilidad entre 400 y 1000 iteraciones, garantizando la consistencia de los resultados.

3.5 Escenarios de simulación

Para la evaluación del impacto respecto a diferentes estrategias pasivas en el confort térmico se definió tres escenarios, sin considerar al Escenario base: configuración original de la vivienda:

Escenario 1: mejora de la envolvente térmica mediante incorporación de aislamiento.

Escenario 2: incorporación de un sistema de captación de viento para optimizar la ventilación.

Escenario 3: reestructuración en cuanto a la orientación del edificio, así como la estructuración de aperturas en función del viento dominante

3.6 Evaluación del confort térmico

El análisis del confort térmico se realizó mediante la implementación de los índices PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), conforme a la norma ISO 7730. Estos índices fueron integrados dentro del entorno de simulación mediante expresiones matemáticas programadas en el software, permitiendo su cálculo en función de variables como temperatura, velocidad del aire y condiciones metabólicas estándar. La evaluación se efectuó en planos de análisis ubicados a 0.10 m y 1.70 m sobre el nivel del piso, correspondientes a las alturas representativas del cuerpo humano. Adicionalmente, se analizó la distribución espacial del confort, cuantificando las áreas interiores que cumplen con condiciones aceptables según los criterios normativos.

4 RESULTADOS

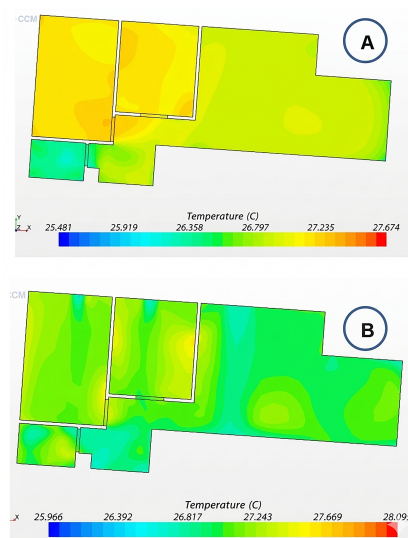
Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones CFD permiten analizar de manera integral el comportamiento térmico y la dinámica del flujo de aire en la vivienda de interés social bajo los diferentes escenarios planteados. El análisis se estructura en tres dimensiones principales: (i) comportamiento térmico, (ii) dinámica del flujo de aire y (iii) evaluación del confort térmico mediante los índices PMV y PPD.

4.1 Comportamiento térmico interior

En el escenario base, correspondiente a la configuración original de la vivienda, se evidencian condiciones térmicas desfavorables, caracterizadas por un incremento significativo de la temperatura interior respecto a los rangos de confort establecidos. Los resultados muestran temperaturas promedio de hasta 27 °C en los planos de análisis, superando el límite superior recomendado por la normativa ecuatoriana (26 °C). Este comportamiento está directamente asociado a la alta transmitancia térmica de la envolvente y a la incidencia directa de radiación solar sobre la cubierta y fachadas.

El análisis por planos revela una estratificación térmica vertical, donde las temperaturas a 1.70 m (nivel de cabeza) son superiores a las registradas a 0.10 m (nivel inferior), evidenciando un gradiente térmico que contribuye al disconfort. Este fenómeno ha sido identificado en estudios recientes como un indicador de ventilación ineficiente y acumulación de calor en zonas superiores del espacio interior (Figura 2).

Figura 2 – Resultado de simulación de temperatura del modelo inicial de estudio, con un plano de corte a 10cm del suelo (A) y plano de corte a 1.70 m (B)

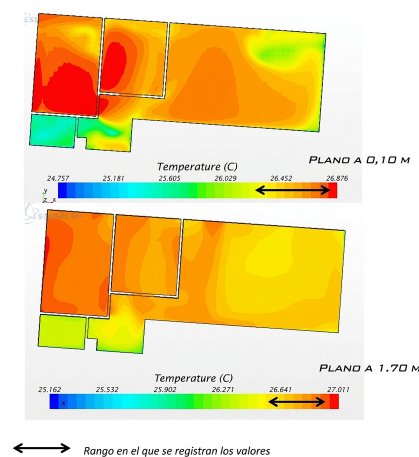


Fuente: Autores.

En el escenario 1, correspondiente a la mejora de la envolvente térmica mediante la incorporación de aislamiento, se observa una reducción moderada de la temperatura interior, en el orden del 3% al 5% respecto al modelo base. Sin embargo, esta disminución no resulta suficiente para alcanzar condiciones de confort, ya que las temperaturas continúan ubicándose en valores cercanos a los límites superiores. Este resultado confirma que la mejora de la envolvente, aunque efectiva en la reducción de ganancias térmicas, no resuelve por sí sola las deficiencias asociadas a la ventilación (Figura 3).

En el escenario 2, que incorpora un sistema de captación de viento, se observa una mejora más significativa en la distribución térmica, particularmente en las zonas superiores del espacio. La reducción de temperatura se mantiene en valores similares al escenario 1, pero con una mayor homogeneidad térmica en el interior. Esto

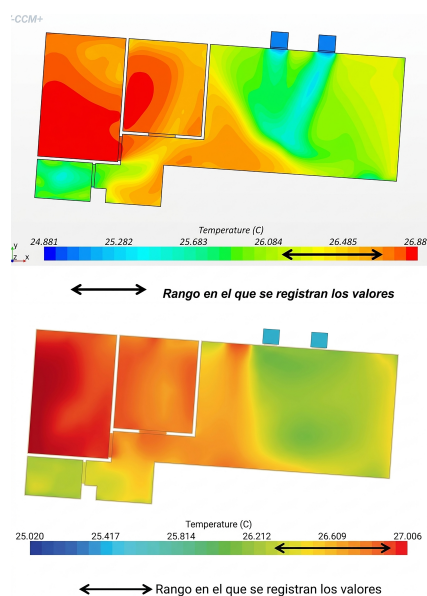
Figura 3 – Resultado de simulación de temperatura escenario 1



Fuente: Autores.

indica que la ventilación inducida contribuye a disipar el calor acumulado, reduciendo la estratificación térmica (Figura 4).

Figura 4 – Resultado de simulación de temperatura escenario 2

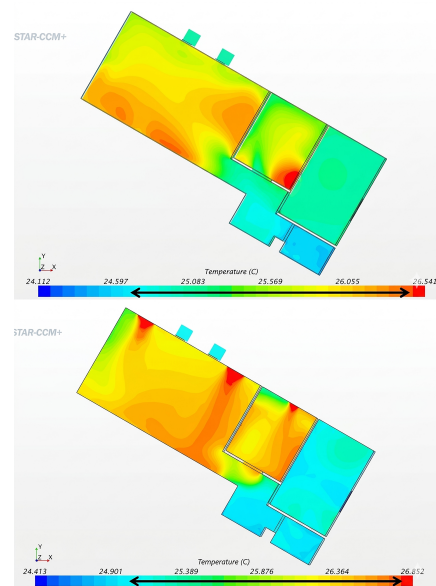


Fuente: Autores.

Finalmente, el escenario 3, que integra la optimización de la orientación del edificio y la reconfiguración de aperturas, presenta el mejor desempeño térmico. En este caso, se registra una reducción de aproximadamente 2 °C en la temperatura interior, alcanzando valores promedio cercanos a 25.5 °C, dentro del rango de confort. Este resultado evidencia la importancia de la orientación y el diseño arquitectónico en el control de las ganancias térmicas y la eficiencia de la ventilación natural (Figura 5).

Como se observa en la Tabla 1, la reducción térmica más significativa se alcanza en el escenario 3, evidenciando la efectividad de la optimización de la orientación y ventilación.

Figura 5 – Resultado de simulación de temperatura escenario 3



Fuente: Autores.

Tabla 1 – Comparación de temperatura interior por escenario

Escenario	Temp. promedio (°C)	Temp. máxima (°C)	Estratificación térmica	Cumplimiento normativo (18–26 °C)
Base	27,0	28,5	Alta	No cumple
Escenario 1 (Aislamiento)	26,2	27,3	Moderada	Parcial
Escenario 2 (Captación de viento)	26,0	27,0	Baja	Parcial
Escenario 3 (Optimización)	25,5	26,2	Baja	Cumple

Fuente: Autores.

4.2 Dinámica del flujo de aire

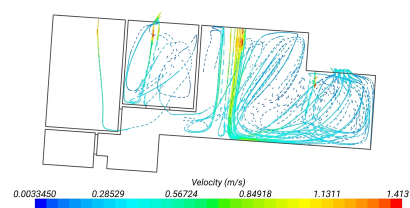
El análisis del flujo de aire revela diferencias sustanciales entre los escenarios evaluados. En el modelo base, el comportamiento del aire se caracteriza por una circulación limitada, con presencia de zonas de baja velocidad o estancamiento, especialmente en áreas alejadas de las aperturas. Estas zonas, conocidas como “zonas muertas”, generan condiciones de disconfort al impedir una adecuada renovación del aire.

Las líneas de corriente evidencian que el flujo de aire pierde velocidad al interactuar con elementos interiores, como paredes y divisiones, lo que reduce su capacidad de ventilación efectiva. Este comportamiento coincide con estudios recientes que destacan la influencia de la geometría interior en la eficiencia de la ventilación natural.

En el escenario 1, las modificaciones en la envolvente no generan cambios significativos en la dinámica del flujo de aire, los resultados no tuvieron modificaciones por ello se utiliza el mismo grafico para ambas condiciones (Figura 6), lo que refuerza la idea de que las estrategias térmicas pasivas deben complementarse con intervenciones en la ventilación.

En el escenario 2, la incorporación de la torre captadora de viento modifica sustancialmente el patrón de flujo, incrementando la velocidad del aire en el interior y mejorando la renovación del aire en zonas previa-

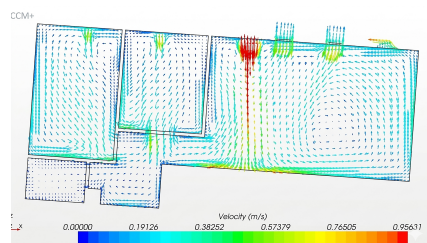
Figura 6 – Resultado de simulaciones de comportamiento del aire en el interior del modelo de estudio escenario 1



Fuente: Autores.

mente estancadas. Se observa una mayor penetración del flujo hacia las zonas internas, lo que contribuye a la reducción de temperaturas y mejora de las condiciones de confort (Figura 7).

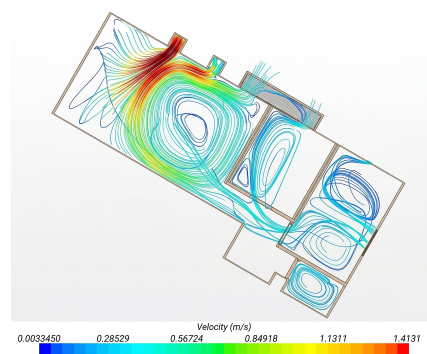
Figura 7 – Resultado de simulaciones de comportamiento del aire en el interior del modelo de estudio escenario 2



Fuente: Autores.

El escenario 3 presenta el comportamiento más eficiente del flujo de aire. La reorientación del edificio en función del viento dominante permite una ventilación más uniforme y continua, eliminando en gran medida las zonas de baja presión. Además, la incorporación de nuevas aperturas facilita la ventilación cruzada, optimizando la trayectoria del aire desde zonas secas hacia zonas húmedas, conforme a criterios normativos (Figura 8).

Figura 8 – Resultado de simulaciones de comportamiento del aire en el interior del modelo de estudio escenario



Fuente: Autores.

Este resultado confirma que la eficiencia de la ventilación natural depende no solo de la presencia de

aperturas, sino de su correcta disposición en relación con las condiciones climáticas externas.

La Tabla 2 evidencia un incremento progresivo en la velocidad del aire, particularmente en el escenario 3, donde se alcanza una distribución homogénea del flujo.

Tabla 2 – Comportamiento del flujo de aire por escenario

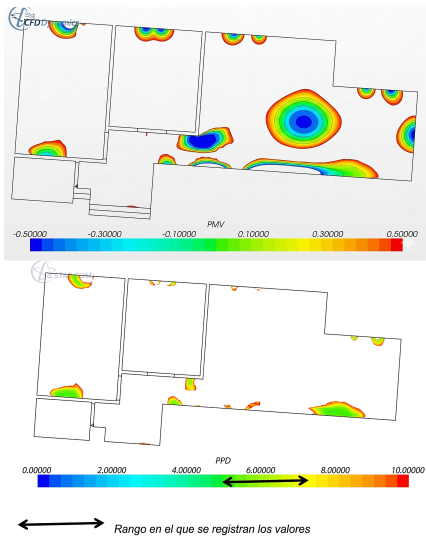
Escenario	Velocidad promedio (m/s)	Zonas de estancamiento	Distribución del flujo	Eficiencia de ventilación
Base	0.10 – 0.15	Alta	Irregular	Baja
Escenario 1	0.10 – 0.15	Alta	Irregular	Baja
Escenario 2	0.20 – 0.30	Media	Moderada	Media
Escenario 3	0.30 – 0.45	Baja	Homogénea	Alta

Fuente: Autores.

4.3 Evaluación del confort térmico (PMV y PPD)

La evaluación del confort térmico mediante los índices PMV y PPD permite traducir las condiciones físicas obtenidas en términos de percepción del usuario (Figura 9).

Figura 9 – Resultado de simulación del índice de confort interior PMV y PPD del modelo inicial de estudio



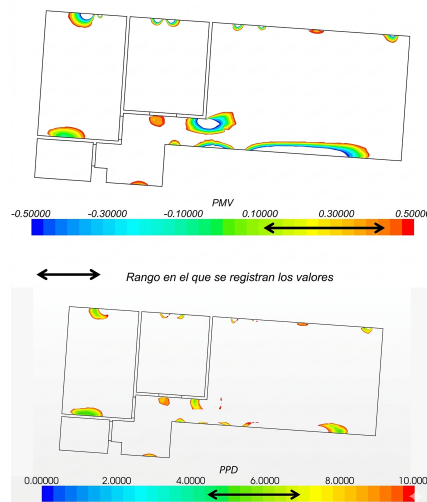
Fuente: Autores.

En el modelo base, los valores de PMV indican condiciones de desconfort por exceso de calor, con valores superiores a +1, lo que corresponde a una sensación térmica de “ligeramente caluroso” a “caluroso”. En términos de PPD, se registran valores superiores al 90%, lo que implica que la mayoría de los usuarios se encontrarían insatisfechos con las condiciones térmicas.

El análisis espacial del confort muestra que únicamente un porcentaje reducido del área interior (inferior al 10%) cumple con condiciones aceptables, lo que evidencia un desempeño deficiente del modelo original.

En el escenario 1, los valores de PMV y PPD presentan mejoras marginales, sin alcanzar niveles aceptables de confort. Este resultado refuerza la limitación de las estrategias centradas exclusivamente en la envolvente (Figura 10).

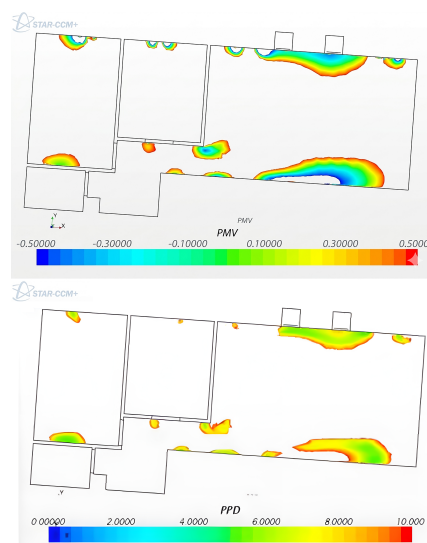
Figura 10 – Resultado de simulación del índice de confort interior PMV y PPD en el escenario 1



Fuente: Autores.

El escenario 2 muestra una mejora moderada en los índices de confort, con una reducción en los valores de PPD y un aumento en las áreas de confort. Sin embargo, aún se mantienen niveles significativos de desconfort en ciertas zonas del espacio (Figura 11).

Figura 11 – Resultado de simulación del índice de confort interior PMV y PPD en el escenario 2

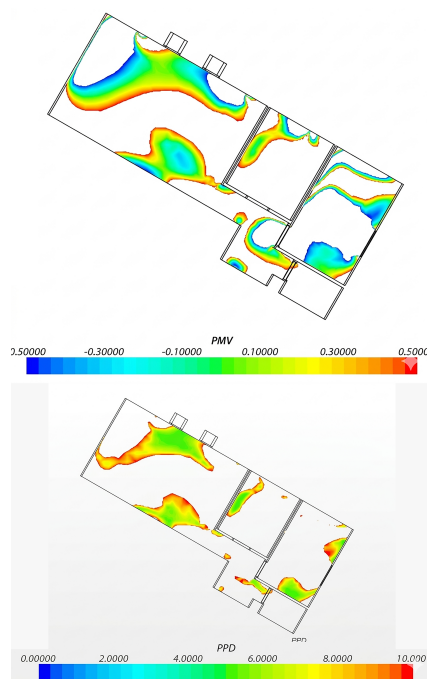


Fuente: Autores.

El escenario 3 presenta los mejores resultados en términos de confort térmico. Los valores de PMV se aproximan al rango neutro (0), mientras que el PPD se reduce a valores cercanos o inferiores al 10% en una

proporción significativa del espacio. El análisis espacial indica que el área de confort alcanza aproximadamente el 30%–35% del total, lo que representa un incremento sustancial respecto al modelo base (Figura 12).

Figura 12 – Resultado de simulación del índice de confort interior PMV y PPD en el escenario 3



Fuente: Autores.

Como se muestra en la Tabla 3, el escenario 3 alcanza condiciones cercanas al confort térmico óptimo según ISO 7730.

Tabla 3 – Indicadores de confort térmico por escenario

Escenario	PMV promedio	PPD (%)	Área en confort (%)	Condición de confort
Base	+1.2	90%	< 10%	No confortable
Escenario 1	+0.9	70%	15%	Bajo confort
Escenario 2	+0.6	40%	20%	Moderado
Escenario 3	+0.3	< 10%	30–35%	Confort aceptable

Fuente: Autores.

4.4 Síntesis comparativa de resultados

Los datos muestran que:

- La mejora de la envolvente térmica reduce la temperatura, pero no garantiza confort;
- La ventilación natural, especialmente cuando es inducida u optimizada, tiene un impacto significativo en el confort;

- La configuración de aperturas, así como la orientación son variables concluyentes en el desempeño térmico.

En conjunto, estos hallazgos demuestran que el confort térmico en vivienda social es el resultado de la interacción entre variables constructivas, ambientales y de diseño arquitectónico, y no puede ser abordado desde una perspectiva unidimensional.

La Tabla 4 sintetiza el desempeño global, evidenciando que el confort térmico es resultado de la integración de múltiples variables.

Tabla 4 – Comparación integral de desempeño por escenario

Variable	Base	Esc. 1	Esc. 2	Esc. 3
Reducción térmica	—	Baja	Media	Alta
Ventilación	Deficiente	Deficiente	Mejorada	Óptima
Confort térmico	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto
Estrategia dominante	—	Material	Ventilación	Integrada

Fuente: Autores.

5 DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el confort térmico en vivienda de interés social no puede ser abordado de manera aislada desde la mejora de la envolvente, sino que requiere una integración entre variables constructivas, dinámicas del flujo de aire y decisiones de diseño arquitectónico. Esta afirmación se alinea con investigaciones recientes que destacan la necesidad de enfoques sistémicos en el análisis del desempeño térmico de edificaciones (Madushika *et al.*, 2023; Maghami *et al.*, 2025).

En primer lugar, los resultados del escenario 1 confirman que la mejora de la envolvente térmica mediante la incorporación de aislamiento genera reducciones en la temperatura interior, pero con un impacto limitado en el confort térmico global. Este hallazgo coincide con estudios recientes que señalan que, en climas donde la ventilación natural es un factor dominante, las estrategias basadas exclusivamente en materiales no son suficientes para garantizar condiciones de confort (Mirrahimi *et al.*, 2016; Hashemi; Mills, 2025). En este sentido, la envolvente debe entenderse como parte de un sistema más amplio, donde su interacción con el flujo de aire es determinante.

Por otro lado, la incorporación de sistemas de captación de viento en el escenario 2 demuestra que la ventilación natural puede desempeñar un rol significativo en la mejora del confort térmico, especialmente al reducir la estratificación térmica y favorecer la renovación del aire. Este resultado es consistente con investigaciones contemporáneas que destacan la efectividad de estrategias pasivas basadas en ventilación inducida, particularmente en edificaciones de bajo costo (Obeidat; Kamal; Almalkawi, 2021; He *et al.*, 2025). Sin embargo, los resultados también muestran que estas estrategias, cuando se aplican de manera aislada, presentan limitaciones en su capacidad para alcanzar condiciones óptimas de confort.

El escenario 3, que integra la optimización de la orientación y la reconfiguración de aperturas, evidencia que el diseño arquitectónico desempeña un papel fundamental en el control del confort térmico. La mejora significativa en los índices PMV y PPD, así como en la distribución espacial del confort, confirma que la disposición de los elementos arquitectónicos en relación con las condiciones climáticas externas es un factor determinante. Este hallazgo se alinea con estudios recientes que posicionan el diseño arquitectónico como una variable activa en la regulación del ambiente interior (He *et al.*, 2025; Jia; Srinivasan, 2020).

Asimismo, los resultados destacan la importancia de la dinámica del flujo de aire como variable central en la evaluación del confort térmico. La identificación de zonas de estancamiento en el modelo base y su reducción en los escenarios optimizados coincide con investigaciones que evidencian la influencia de la geometría interior en la eficiencia de la ventilación (Ramponi; Blocken, 2012; Nguyen *et al.*, 2022). En este sentido, el uso de herramientas CFD permite visualizar y cuantificar fenómenos que no son detectables mediante métodos convencionales, reforzando su relevancia en el diseño basado en desempeño.

Desde la perspectiva del confort térmico, los resultados confirman la validez de integrar índices como PMV y PPD en el análisis de simulaciones CFD. La mejora progresiva de estos indicadores entre escenarios demuestra que la combinación de variables físicas (temperatura y velocidad del aire) influye directamente en la percepción térmica del usuario. Este enfoque coincide con tendencias recientes que promueven la evaluación del confort desde una perspectiva centrada en el usuario, superando los enfoques puramente físicos (Kaushik *et al.*, 2020; Karyono *et al.*, 2020).

No obstante, es importante reconocer que, aunque el escenario 3 presenta mejoras significativas, el área de confort alcanzada (30%–35%) indica que aún existen limitaciones en el desempeño térmico de la vivienda. Este resultado sugiere que, si bien las estrategias pasivas optimizadas pueden mejorar significativamente las condiciones interiores, su efectividad puede estar condicionada por factores adicionales como la ocupación, el comportamiento del usuario y las variaciones climáticas temporales.

En este contexto, el principal aporte de la investigación radica en demostrar que el confort térmico en vivienda social debe ser abordado desde una perspectiva integrada, en la que la envolvente, la ventilación y el diseño arquitectónico actúan de manera complementaria. Asimismo, el estudio contribuye a la literatura al evidenciar la aplicabilidad de herramientas CFD en contextos de vivienda social en regiones andinas, un campo aún poco explorado en la investigación científica contemporánea.

Los resultados refuerzan la necesidad de incorporar herramientas de simulación avanzada en las etapas tempranas del diseño arquitectónico, permitiendo evaluar el desempeño ambiental de manera anticipada y optimizar las decisiones proyectuales en función de criterios de confort y sostenibilidad.

6 CONCLUSIÓN

La investigación generó evidencias para el desarrollo de políticas de vivienda social integrando conceptos de desempeño ambiental, lo cual se traduce en la mejora de calidad de vida de los usuarios, así como suscitar el desarrollo urbano sostenible, todo esto mediante la comprensión del confort térmico ahondando en

la interacción de variables, en las que el diseño arquitectónico tiene un papel central. La simulación avanzada aplicada en la metodología no solo diagnosticó problemas existentes, sino condujo a la toma de decisiones con el diseño de soluciones sostenibles, eficientes y adaptadas al contexto climático.

Los datos relacionados a temperaturas interiores superiores a los rangos del confort, así como la distribución térmica heterogénea, afirma que el desempeño en este aspecto muestra deficiencias en su distribución original. Dicho comportamiento manifiesta las limitaciones de los convencionales modelos habitacionales, los cuales priorizan aspectos económicos ante el desempeño ambiental, haciendo subóptima las condiciones de habitabilidad.

La incorporación de aislamiento aporta de manera positiva respecto a la envolvente térmica, sin embargo, resulta insuficiente relacionado al confort térmico, aun cuando existe reducción al interior de la temperatura, no se avala escenarios acordes de habitabilidad, evidenciando abordar el problema desde un aspecto integral.

Para mejorar el confort térmico un aspecto clave es la ventilación natural. Se optimizó la circulación del aire mediante la incorporación de técnicas de captación de viento, reduciendo la estratificación térmica y mejorando la renovación del aire interior. Sin embargo, aplicar estas estrategias de manera aislada, evidencia la limitación en la capacidad de alcanzar condiciones óptimas de confort.

La investigación subraya la importancia que tiene la orientación de los edificios en el diseño arquitectónico, así como la configuración de las aperturas, consolidando estos aspectos como factores principales en el desempeño térmico de la vivienda. La optimización de los parámetros mencionados redujo el PPD a niveles aceptables, el PMV alcanzo valores cercanos a condiciones neutras, ambos en una proporción relevante del espacio interior, reforzando la pertinencia del diseño pasivo como estrategia en contextos de recursos limitados.

En cuanto a la metodología, se comprueba la eficiencia en la aplicación de herramientas CFD para determinar el comportamiento térmico, así como análisis de ventilación en elementos construidos. Se superan los enfoques tradicionales mediante el uso de herramientas de simulación de fenómenos complejos, como la distribución térmica, así como la dinámica del flujo de aire, permitiendo la comprensión minuciosa del ambiente interior. De igual manera el PPD y PMV como índices de confort térmico, facilita el entendimiento de variables físicas en indicadores centrados en el usuario, robusteciendo la aplicación en el campo del diseño arquitectónico.

Las simulaciones con condiciones estacionarias no posibilitan la toma de la variabilidad temporal del clima, convirtiéndose en una limitación en la investigación, influyendo en la precisión de los resultados. Por otro lado, se debería cubrir la ausencia de validación experimental mediante incorporación de mediciones in situ.

Relacionando con el aspecto antes descrito, se evidencia líneas de investigaciones futuras a ser desarrolladas. La implementación de validar los modelos a través de monitoreo en viviendas reales, permitiendo optimizar la confiabilidad y precisión de resultados. Adicional desarrollar estudios que integren simulaciones CFD con modelos de comportamiento climático, incorporando diferenciaciones climáticas en el transcurso del tiempo. Finalmente, la integración de plataformas BIM y SIG con herramientas CFD, ampliaría la escala hacia contextos urbano-territoriales.

REFERENCIAS

- Blocken, B. Computational fluid dynamics for urban physics: importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. **Building and Environment**, v. 91, p. 219–245, 2015.
- Cabeza, L. F.; Chàfer, M.; Mata, Comparative analysis of web of science and scopus on the energy efficiency and climate impact of buildings. **Energies**, v. 13, n. 2, p. 409, 2020.
- Chow, W. K. Application of computational fluid dynamics in building services engineering. **Building and Environment**, v. 31, n. 5, p. 425–436, 1996.
- Dear, R. de; Brager, G. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference**. Berkeley, 1998. Available at: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>.
- Dear, R. J. de; Brager, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ashrae standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549–561, 2002.
- Emmanuel, R. **An urban approach to climate-sensitive design**. London: Spon Press, 2005.
- Emmanuel, R.; Steemers, K. Connecting the realms of urban form, density and microclimate. **Building Research & Information**, v. 46, n. 8, p. 804–808, 2018.
- Geros, V. *et al.* On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 3, p. 243–257, 2005.
- Givoni, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- Givoni, B. Indoor temperature reduction by passive cooling systems. **Solar Energy**, v. 85, n. 8, p. 1692–1726, 2011.
- Hashemi, F.; Mills, G. On the impact of urban climate and heat islands on building energy performance: a critical review. **Energy and Buildings**, v. 343, p. 115946, 2025.
- He, G. *et al.* An experimental study of wind-driven ventilation with double skin facade during transition seasons. **Energies**, v. 18, n. 13, p. 3249, 2025.
- Heiselberg, P. **Design Principles for Natural and Hybrid Ventilation**. [S.l.], 2000.
- Jha, S. K. *et al.* Incorporation of phase change materials in buildings. **Construction Materials**, v. 4, n. 4, p. 676–703, 2024.
- Jia, M.; Srinivasan, R. Building performance evaluation using coupled simulation of energyplus and an occupant behavior model. **Sustainability**, v. 12, n. 10, p. 4086, 2020.
- Karyono, K. *et al.* The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future. **Developments in the Built Environment**, v. 4, p. 100032, 2020.
- Kaushik, A. *et al.* Effect of thermal comfort on occupant productivity in office buildings. **Building and Environment**, v. 180, p. 107021, 2020.

- Kirme, S. K.; Kapse, V. S. A comprehensive review of residential building energy efficiency measures in india. **Energy and Buildings**, v. 319, p. 114537, 2024.
- Krelling, A. F. *et al.* A thermal performance standard for residential buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, v. 281, p. 112770, 2023.
- López-pérez, L. A.; Flores-prieto, J. J.; Ríos-rojas, C. Adaptive thermal comfort model for educational buildings. **Building and Environment**, v. 150, p. 181–194, 2019.
- Madushika, U. G. D. *et al.* Energy retrofitting technologies of buildings: A review-based assessment. **Energies**, v. 16, n. 13, p. 4924, 2023.
- Maghami, M. R. *et al.* Net zero energy buildings: an overview of passive and active designs. **Energy Reports**, v. 14, p. 1327–1348, 2025.
- Mirrahimi, S. *et al.* The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1508–1519, 2016.
- Nguyen, Y. Q. *et al.* Cfd analysis of different ventilation strategies for a room with a heated wall. **Buildings**, v. 12, n. 9, p. 1300, 2022.
- Nielsen, P. V. Fifty years of cfd for room air distribution. **Building and Environment**, v. 91, p. 78–90, 2015.
- Niza, I. L. *et al.* Air quality and ventilation. **Results in Engineering**, v. 24, p. 103157, 2024.
- Obeidat, B.; Kamal, H.; Almalkawi, A. Cfd analysis of an innovative wind tower design. **Journal of Ecological Engineering**, v. 22, n. 2, p. 86–97, 2021.
- Peker, E.; Street, E. Spatial planning for thermal comfort justice in an era of climate extremes. **Habitat International**, v. 166, p. 103600, 2025.
- Ramponi, R.; Blocken, B. Cfd simulation of cross-ventilation for a generic isolated building. **Building and Environment**, v. 53, p. 34–48, 2012.
- Slimani, A. L.; Mazouz, S.; Nekhila, S. Cfd-based quantitative assessment of thermal comfort. **Sustainability**, v. 17, n. 22, p. 10229, 2025.
- Wehrle, J. *et al.* Introducing new morphometric parameters to improve urban canopy air flow modeling. **Urban Climate**, v. 58, p. 102173, 2024.
- Xu, L.; Zhang, Z. Effects of residential indoor environments on occupant satisfaction and performance. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 23, n. 1, p. 282–293, 2024.