

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

MÁSTER EN INGENIERIA INDUSTRIAL



"EVALUACIÓN DE ESTRATEGIAS DE
VENTILACIÓN NOCTURNA EN
VIVIENDAS UNIFAMILIARES EN CLIMAS
CÁLIDOS"

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Junio - 2025

AUTOR: Ícaro César Vera Alves

DIRECTOR/ES: Pedro J. Martínez Beltrán

RESUMEN

Este estudio evalúa la eficacia y el confort proporcionado por distintas estrategias de ventilación nocturna en climas cálidos. Los climas estudiados representan a regiones con hogares que, en 2023, reportaron imposibilidad para mantener una temperatura suficientemente fresca durante el verano. Para ello se llevaron a cabo estudio de casos en una vivienda unifamiliar aislada en Los Valientes (Murcia), mediante simulación energética con un modelo validado experimentalmente en TRNSYS-CONTAM. Se compararon estrategias de ventilación mecánica con recuperador de calor frente a estrategias híbridas que incorporan ventilación nocturna por medios naturales. Los resultados muestran que, en viviendas con altas tasas de ventilación nocturna por medios naturales, una estrategia híbrida permite aprovechar hasta 5,4 veces más el potencial de enfriamiento nocturno, reduciendo significativamente la intensidad de calor interior (hasta un 63%) y el consumo energético (hasta un 36%). En viviendas donde no sea posible ventilar con alta intensidad de manera natural durante las noches, aumentar los caudales de ventilación de un sistema mecánico permiten reducir, en menor medida, la intensidad de calor interior, sin embargo, esta estrategia no ofrece ahorros energéticos en las regiones estudiadas.

INDICE DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	5
1.1	Edificio <i>freerunning</i> o <i>freefloating</i>	7
1.2	Control adaptativo	8
1.3	Estrategias pasivas de enfriamiento. Ventilación nocturna	9
1.3.1	Eficacia de la ventilación nocturna.....	10
1.3.1.1	Factores climáticos	10
1.3.1.2	Factores constructivos	10
1.3.1.3	Factores técnicos.....	12
1.3.1.4	El potencial climático del enfriamiento nocturno	13
1.3.1.5	Beneficios energéticos del enfriamiento nocturno	15
1.4	Calidad del aire interior (CAI).....	16
1.5	Objetivos de este trabajo	16
2	METODOLOGÍA	18
2.1	Caracterización de la vivienda unifamiliar tipo en España	18
2.1.1	Necesidades de ventilación	19
2.2	Edificio de referencia.....	19
2.2.1	Requisitos de ventilación	21
2.2.2	Modelo energético	21
2.2.3	Modelo de ventilación natural	22
2.2.3.1	Acoplamiento a TRNSYS.....	23
2.2.4	Sistema de ventilación mecánico.....	26
2.3	Resumen de características.....	27
2.4	Ciudades de estudio	28
2.4.1	Análisis climático.....	28
2.5	Campaña experimental	29

2.6	Métricas evaluadas	30
2.6.1	Energía sensible de ventilación	31
2.6.2	Intensidad de calor.....	31
2.6.3	Consumo de energía	32
2.7	Casos de estudio	33
3	RESULTADOS	35
3.1	Validación del modelo, ventilación natural	35
3.2	Validación del modelo, ventilación mecánica	36
3.3	Edificio <i>freerunning</i>	38
3.3.1	Potencial climático de enfriamiento.....	38
3.3.2	Intensidad de calentamiento interior	40
3.3.3	Tasas de ventilación nocturna.....	41
3.3.4	Consumo de energía	42
3.4	Condiciones controladas.....	43
3.4.1	Consumo de energía	43
4	DISCUSIÓN	45
4.1	Edificios <i>freerunning</i>	46
4.2	Edificios con condiciones controladas de temperatura interior	47
4.3	Limitaciones del estudio.....	48
5	CONCLUSIONES	49
5.1	Futuras líneas de trabajo	49
6	BIBLIOGRAFÍA	51

1 INTRODUCCIÓN

Europa ha fijado 2050 como fecha límite para alcanzar la neutralidad climática. Dentro de la batería de medidas destinadas a tal efecto, se encuentra la descarbonización de edificios. Según estadísticas, los hogares consumen en torno al 27% de toda la energía final en Europa, siendo superado únicamente por el sector del transporte [1].

En un entorno más local, en España esa energía se destina principalmente a: calefacción, electrodomésticos y agua caliente sanitaria [2]. La refrigeración se lleva en torno al 1% de toda esa energía, lo que a priori no supone una cifra alarmante en comparación con el resto de los consumos. No obstante, existe un porcentaje significativo de usuarios que manifiestan incapacidad de mantener las condiciones de confort térmico durante el periodo estival.

Recientemente se publicó la Estrategia Nacional Contra La Pobreza Energética [3], la cual se va actualizando cada año. En el informe recogen resultados de diversas encuestas en las cuales señalan que para el cuarto verano más cálido de la serie histórica iniciada en 1961 (2012) el 25,6% de los hogares españoles manifestaron incapacidad para mantener una temperatura adecuada, índice que alcanza mayores valores en la mitad sur de la península. En un contexto más reciente, según el Instituto Nacional De Estadística (INE) [4], en 2023 el 33,6% de los hogares no mantuvieron una temperatura suficientemente fresca durante el verano, siendo las comunidades autónomas con los mayores porcentajes: Región de Murcia (40,1%), Comunidad de Madrid (37,7%) y Andalucía (34,9%) (Fig. 1).

Este resultado, que parecería estar en contradicción con el bajo de consumo energético en refrigeración, tiene su explicación en dos factores: la falta de acceso a sistemas de refrigeración (aire acondicionado) y la dificultad para afrontar el pago de facturas. Según el informe anterior, en 2017, más del 20% de los hogares del litoral mediterráneo no pudieron afrontar el pago de las facturas de suministros [3]. Esto señala una clara relación entre la dificultad para afrontar

el pago de facturas energéticas a la imposibilidad de mantener condiciones de confort adecuadas en verano.

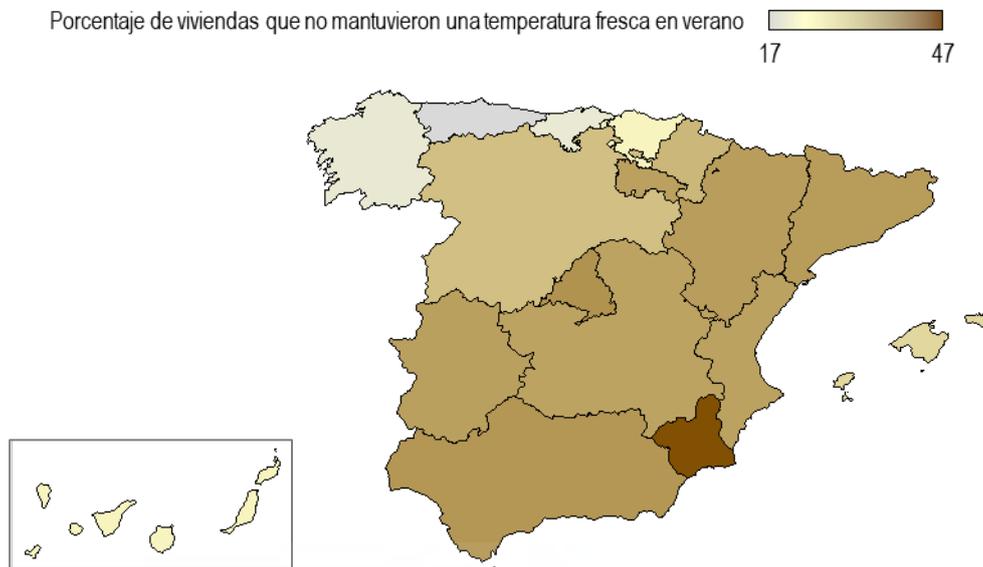


Fig. 1. Porcentaje de viviendas que manifestaron no mantener una temperatura fresca en verano [4].

Los esfuerzos para reducir la pobreza energética históricamente, tanto en Europa como en España, estuvieron orientados principalmente a reducir su efecto en las temporadas de frío, lo que podría ser contraproducente en verano [5]. A modo de ejemplo, la actualización de indicadores de la Estrategia Nacional Contra La Pobreza Energética [3] publicada en 2022 (la última hasta la fecha) no presenta datos relativos a verano. Luego, en contextos normativos, las normas de ahorro de energía en España suelen clasificar sus exigencias en términos de calidad de envolvente térmica en función de la severidad climática en invierno. No obstante, en ediciones más recientes introducen requisitos de control solar.

Diversos estudios han propuesto nuevos criterios y nuevas definiciones de pobreza energética teniendo en cuenta la habilidad para mantener condiciones térmicas confortables durante el verano. Los trabajos de Sánchez-Guevara et al. [6], [7] proponen definir tal indicador en función de las necesidades energía para alcanzar unas necesidades mínimas de confort térmico en edificios *freerunning*. Estas necesidades en vez de estar calculadas a temperaturas fijas de consigna (por ejemplo, 26°C) están evaluadas desde el punto de vista adaptivo, lo que

permite obtener resultados más realistas en viviendas que carezcan o presenten un uso limitado de refrigeración.

Se introducen entonces dos términos/conceptos importantes en este tipo de estudios: edificios *freerunning* o *freefloating* y control adaptativo.

1.1 Edificio *freerunning* o *freefloating*

Un edificio *freerunning* (o de un modo más genérico, zona térmica) se relaciona con su entorno en condiciones no controladas, es decir, sin equipos que mantengan la temperatura interior fija o dentro de un rango de confort. Se dice entonces que el edificio 'flota' libremente, siendo su temperatura el resultado de los mecanismos de transferencia de calor habituales (véase Fig. 2). En coherencia con lo expuesto, esta situación es la que presentan, en verano, aquellas viviendas que carecen de equipos de refrigeración o este se encuentra apagado.

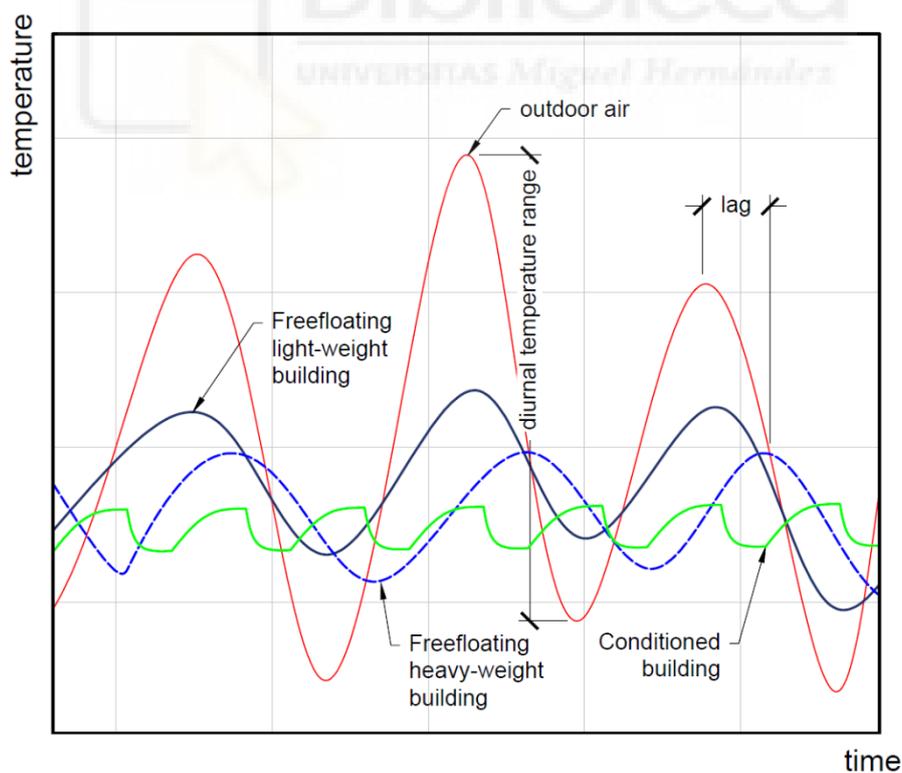


Fig. 2. Evolución de la temperatura interior de un edificio.

1.2 Control adaptativo

El término control adaptativo, hace referencia a uno de los enfoques de percepción del confort. Actualmente existen dos enfoques en esta temática: control pasivo y el control activo o adaptativo. Por un lado, el control pasivo está basado en los estudios de transferencia de calor entre el cuerpo humano y su entorno desarrollado en los trabajos de Fanger, los cuales actualmente son ampliamente empleados a través de la norma ISO 7730 para evaluar el confort térmico en espacios mecánicamente refrigerados [6]. Por otro lado, el control adaptativo se da principalmente en edificios *freerunning*, en donde si un usuario percibe una situación de no confort, tomará acciones para adaptarse a ese entorno [8]. Esas acciones pueden ser desde abrir ventanas hasta modificar niveles de vestimenta o de actividad, es decir: modificaciones en el entorno, ajustes comportamentales y ajustes psicológicos.

En los edificios *freerunning*, la predicción del confort presenta mayor correlación con el control adaptativo respecto al control pasivo, de hecho, los usuarios de estos edificios suelen tolerar un rango mayor de temperaturas [6], [8]. A nivel internacional se presentan dos enfoques de control adaptativo, el estándar ASHRAE 55 y la UNE-EN 16798-1, a continuación, se desarrolla el relativo europeo por su mayor proximidad.

El control adaptativo propuesto por la norma UNE-EN 16798-1 caracteriza la temperatura de confort en función de la temperatura media de funcionamiento exterior (θ_{rm}). Esta se establece ponderando exponencialmente las temperaturas medias de los días anteriores (ec. (1)). Como limitación, este método solo se puede emplear si $10^{\circ}\text{C} < \theta_{rm} < 30^{\circ}\text{C}$.

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \{ \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \theta_{ed-3} \dots \} \quad (1)$$

donde:

θ_{rm} : la temperatura media de funcionamiento exterior para el día en consideración ($^{\circ}\text{C}$).

θ_{ed-i} : la temperatura media de funcionamiento para el i-ésimo día anterior.

α : una constante que vale 0,8 (recomendado por la UNE-EN 16798-1).

Luego con esa temperatura media de funcionamiento se determina una temperatura de confort o de funcionamiento óptima (θ_c), según ec. (2).

$$\theta_c = 0,33\theta_{rm} + 18,8 \quad (2)$$

Es decir, la temperatura óptima depende de manera lineal de la temperatura de funcionamiento. Por último, la propia norma establece distintos niveles de aceptación según la categoría del edificio, estableciendo así los rangos de confort según este enfoque adaptativo (Tabla 1).

Tabla 1. Rango de confort en edificios freerunning

Categoría	Límite inferior	Límite superior
I (PPD < 6%)	$\theta_c - 3^\circ\text{C}$	$\theta_c + 2^\circ\text{C}$
II (PPD < 10%)	$\theta_c - 4^\circ\text{C}$	$\theta_c + 3^\circ\text{C}$
II (PPD < 15%)	$\theta_c - 5^\circ\text{C}$	$\theta_c + 5^\circ\text{C}$

Este enfoque es más laxo comparado con el control pasivo. Bienvenido-Huertas et al. [9] en su trabajo observó que el empleo del control adaptativo es apropiado para reducir el consumo de energía en edificios y garantizar el confort de los usuarios. A modo de comparación, la misma norma UNE EN-16798-1 establece para edificios de categoría II (nivel esperado en viviendas) un valor máximo 26°C para control pasivo. Luego, para cálculos energéticos con control pasivo, establece un rango de temperaturas fijo de 23-26°C, de manera similar el CTE DB-HE establece un perfil horario de temperaturas de consigna entre 25-27°C.

Este enfoque adaptativo al ser menos restrictivo con la temperatura permite explorar otras alternativas de refrigeración.

1.3 Estrategias pasivas de enfriamiento. Ventilación nocturna

Es en este contexto donde toma especial atractivo el empleo de técnicas alternativas de enfriamiento para mejorar las condiciones de confort interiores sin gasto adicional de energía. El enfriamiento gratuito o *freecooling* permite aprovechar el aire ambiente para refrigerar un espacio. En viviendas esta situación se presenta principalmente durante la noche, lo que asocia el *freecooling* al enfriamiento nocturno [10].

Su funcionamiento consiste en ventilar con mayor intensidad durante la noche, permitiendo así la entrada de un aire más fresco en horas donde las ganancias térmicas son menores debido a, por ejemplo, la ausencia de ganancias solares y la menor actividad metabólica de los usuarios. Este aire fresco enfriará la masa de la vivienda lo que provocará que al día siguiente al estar más fría pueda absorber energía retrasando así el incremento y el pico de temperatura interior, lo que se traduce directamente en ahorro energético [11], [12], [13].

1.3.1 Eficacia de la ventilación nocturna

La eficacia de la ventilación nocturna está relacionada a diversos factores, Blondeau et al. [11] las clasificó en: factores climáticos, factores constructivos y factores técnicos relacionados al sistema de ventilación.

1.3.1.1 Factores climáticos

Los factores climáticos son los más relevantes, parámetros como la temperatura mínima exterior o la amplitud diaria (diferencia entre la temperatura máxima y mínima exterior), son permiten conocer si existe potencial en la región. La temperatura mínima permite conocer si existen periodos en donde el aire exterior presente temperaturas agradables, mientras que la amplitud diaria indica la capacidad de disipar energía disponible, de hecho, según [14] este factor es de gran relevancia para activar la masa térmica del edificio. Regiones cercanas a la costa, debido a la presencia de grandes masas de agua, presentan una amplitud muy reducida lo que sumado a temperaturas mínimas elevadas indican un bajo potencial de enfriamiento nocturno.

1.3.1.2 Factores constructivos

Los factores constructivos están relacionados a la masa o inercia térmica del edificio. La masa térmica se distingue entre exterior (cerramientos) e interior (particiones interiores, muebles...). Edificios muy ligeros no permiten acumular suficiente energía y responden muy rápido a los cambios exteriores, mientras que un edificio con más masa permite atenuar esas fluctuaciones, manteniendo los niveles de confort durante mayor tiempo. El efecto de la masa térmica está fuertemente relacionado con la amplitud diaria. Su efecto positivo se presenta en

mayor medida en climas con mayores amplitudes diarias [15]. A efectos prácticos, un edificio con masa térmica presentará un retraso o *lag* y un decremento o *decrement factor* en el pico interior de temperatura respecto a exterior, esto se cuantifica en horas y en tanto por uno (ver Fig. 2).

La masa térmica de un material se expresa como el producto de su densidad por el calor específico. Existen expresiones que permiten de manera muy robusta estimar si un cerramiento presenta una inercia considerable. IDAE en [16] proporciona el siguiente índice práctico (ec. (3)):

$$\gamma = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho \cdot c_p \cdot L}{2 \cdot U}} \quad (3)$$

$\gamma > 1 \rightarrow$ inercia a considerar

$\gamma < 1 \rightarrow$ inercia despreciable

donde:

U : la transmitancia térmica del muro.

ρ : la densidad del muro.

c_p : la capacidad calorífica del muro.

L : la longitud del muro.

Otros estudios han tratado de caracterizar un valor de capacidad térmica en J/°C o J/K para edificios de viviendas. Existen estudios muy relevantes realizados por Antonopoulos et al. [17], [18], [19]. Estos autores diferencian entre capacidad térmica exterior, interior, aparente (C_a) y efectiva (C_{eff}). La capacidad térmica aparente es la suma directa de las inercias individuales de cada elemento (ec. (4)).

$$C_a = \sum v \cdot \rho \cdot c_p \quad (4)$$

donde

v : el volumen del elemento.

La capacidad térmica efectiva presenta un cálculo mucho más complejo y está basado en el comportamiento dinámico del edificio.

Estos autores, estudiaron viviendas unifamiliares en Grecia (clima mediterráneo) y proporcionan resultados de capacidad efectiva para edificios de viviendas aislados, poco aislados, unifamiliares y multifamiliares, estos autores también obtuvieron ratios C_a/C_{eff} para para estos mismos edificios. En la Tabla 2 se muestra un resumen de estos resultados. Otros autores como M. Li et al. recomiendan espesores entre 28 y 45 mm de masa térmica según el tipo de material [20].

Tabla 2. Valores de capacidad térmica para viviendas en clima mediterráneo [17].

Parámetro	Tipología	Viviendas aisladas	Viviendas poco aisladas
		$U_{muros} = 0,66 \text{ W/m}^2\text{-K}$ $U_{cubiertas} = 0,46 \text{ W/m}^2\text{-K}$	$U_{muros} = 2,13 \text{ W/m}^2\text{-K}$ $U_{cubiertas} = 3,79 \text{ W/m}^2\text{-K}$
$C_{eff} \text{ (MJ/m}^2\text{)}$	Unifamiliares	0,64	0,28
	Multifamiliares	0,27	0,20
C_a/C_{eff}	Unifamiliares	2,2	>4,5
	Multifamiliares	3,1	

1.3.1.3 Factores técnicos

Los factores técnicos están relacionados al sistema de ventilación. La ventilación puede producirse por medios mecánicos (ventiladores) o medios naturales (efectos de flotabilidad del aire y viento exterior). Ambas modalidades presentan ventajas e inconvenientes.

Previo al CTE, los sistemas de ventilación empleados en España eran naturales. La mayoría de las viviendas del parque edificado presentan sistemas de ventilación compuestos por conductos que extraen aire viciado de forma natural de las estancias húmedas, y el aire fresco entra a través de las estancias secas a mediante infiltración. Este tipo de sistemas presentan deficiencias como inversión de flujo o tasas de ventilación bajas. Esto último fue observado en el 50% de las viviendas estudiadas por García-Ortega y Linares-Alemparte [21] en España.

La manera más efectiva de ventilar por medios naturales es la ventilación cruzada puesto que, permite ventilar con gran intensidad y por tanto diluir

contaminantes como CO₂ [22]. Su funcionamiento consiste en ventilar mediante apertura en dos o más fachadas opuestas, aprovechando mejor el gradiente de presiones alrededor del edificio [23], lo que limita su aplicación según el tipo de edificio. Como orden de magnitud, diversos trabajos obtuvieron tasas de ventilación nocturna en verano entre 1,9-8 ren/h alcanzando en algún caso hasta 10 ren/h [24], [25], [26].

Por último, los sistemas de ventilación mecánica permiten ventilar asegurando niveles seguros de CAI, sin embargo, presentan un consumo de energía asociado a los ventiladores, la mayor limitación de este tipo de sistemas para el aprovechamiento del potencial climático de enfriamiento nocturno [27].

1.3.1.4 El potencial climático del enfriamiento nocturno

El potencial climático del enfriamiento nocturno puede ser evaluado para un clima dado tomando la carga sensible de ventilación como indicador. En la bibliografía existen dos enfoques sobre el potencial de la ventilación para el enfriamiento nocturno.

Por un lado, Artmann et al. [28] introdujo el Climatic Cooling Potential (CCP) un indicador, basado en los grados hora, del potencial de enfriamiento de un clima dado. Este indicador representa la suma de las diferencias de temperatura interior-exterior para una franja horaria dada.

$$CCP = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{h=h_i}^{h_f} \lambda (T_{bld,n,h} - T_{e,n,h}) \quad (5)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0, & T_{bld} - T_{ext} < \Delta T_{crit} \\ 1, & T_{bld} - T_{ext} \geq \Delta T_{crit} \end{cases}$$

donde:

N : el número de noches.

h_i : la hora de inicio de la ventilación nocturna (1-24h).

h_f : la hora final de la ventilación nocturna (1-24h).

$T_{bld,n,h}$: la temperatura interior del edificio a la hora 'h' de la noche 'n' (°C).

$T_{e,n,h}$: la temperatura exterior a la hora 'h' de la noche 'n' (°C).

ΔT_{crit} : es un umbral de salto térmico. Entre 1-3 K.

Estos mismos autores proporcionan un ejemplo que permite entender el significado práctico del CCP. Para ello asumen las siguientes hipótesis:

- El edificio posee suficiente capacidad para almacenar energía.
- La energía que absorbe el edificio es la misma que libera durante la noche a través de la ventilación.

Esto permite llegar a la siguiente expresión (6):

$$(q_{charge}) = (q_{release}) = \frac{\dot{m}_{ref} \cdot c_p \cdot CCP}{A} \approx 0,83 \cdot ACH \cdot CCP \quad (6)$$

donde:

q_{charge} : la energía ganada durante el día (Wh/m²).

$q_{release}$: la energía liberada durante la noche (Wh/m²).

ACH : renovaciones hora de aire (h⁻¹).

m_{ref} : el gasto másico de ventilación (kg/s).

c_p : calor específico del aire (J/kg-K).

Conocidos ACH y q_{charge} es posible conocer cuántos Kh/noche (Kelvin-horas por noche) son necesarios para disipar q_{charge} cantidad de energía a una tasa de ACH .

Posteriormente Campaniço et al. [29] redefinieron el concepto de CCP a un indicador más genérico teniendo en cuenta, además de las temperaturas interiores y exteriores: la temperatura y el caudal de ventilación que es capaz de proporcionar el sistema de enfriamiento gratuito. Esto permite estudiar el potencial climático de diversos sistemas que emplean la ventilación como medio de enfriamiento.

De hecho, estos autores plantean una discusión interesante respecto al caudal de ventilación y es que los edificios deben ser ventilados por ende solo existe potencial de enfriamiento si, además de que el aire esté a menor temperatura,

se aumenta el caudal de ventilación. Este CCP redefinido se calcula mediante la expresión (7):

$$CCP = \dot{m} \cdot c_p(T_{set} - T_{vent}) - \dot{m}_{ref} \cdot c_p(T_{set} - T_{ext}) \quad (7)$$

$$\dot{m} = \begin{cases} m_{vent}, & T_{vent} < T_{bld} \\ m_{ref}, & T_{vent} \geq T_{bld} \end{cases}$$

donde:

T_{set} : la temperatura de consigna interior (°C).

T_{ext} : la temperatura exterior (°C).

T_{vent} : la temperatura del sistema de ventilación (°C).

\dot{m}_{ref} : el gasto másico de ventilación por defecto, sin el aprovechamiento de la ventilación.

\dot{m}_{vent} : el gasto másico del sistema de enfriamiento gratuito.

Esta definición permite evaluar el potencial de enfriamiento de distintos sistemas que proporcionen \dot{m}_{vent} a T_{vent} . Además, introducen un nuevo término, el potencial de enfriamiento útil (UCP por sus siglas en inglés), el cual permite comparar el CCP con la demanda de refrigeración del edificio en ausencia de enfriamiento, separando así un indicador climático (CCP) del potencial útil (UCP).

1.3.1.5 Beneficios energéticos del enfriamiento nocturno

Diversos estudios en la bibliografía han demostrado los beneficios del enfriamiento nocturno aplicado en edificios. Estos resultados suelen ir expresados como ahorros en la demanda y/o consumo de energía en refrigeración. Blondeau et al. [11] estimaron reducciones en el consumo de energía entre 12-54% para temperaturas de consigna entre 22-26°C, indicando que enfriar mecánicamente una vivienda reduce el potencial de enfriamiento de la ventilación nocturna. Santamouris et al. [30] estiman que la ventilación nocturna puede reducir la demanda de refrigeración en esta 40 kWh/m²-año con una media de 12 kWh/m²-año para edificios con cargas térmicas entre 50-60 kWh/m²-año. Asumiendo un rendimiento estacional constante, estos valores supondrían una reducción de entre 20-24% en el consumo de energía. Darmanis et al. [31] señalaron que la ventilación nocturna permite reducir en un 15-27% el

consumo de energía en refrigeración. Por último, otros autores [32] obtuvieron reducciones en $0.31 \text{ kWh/m}^2\text{-día}$ en la demanda de refrigeración lo que al año sumaría un total de 24 kWh/m^2 para el periodo de refrigeración.

1.4 Calidad del aire interior (CAI)

Idealmente, se ventilaría solo si el aire exterior se encuentra más fresco, caso contrario la ventilación tendrá un impacto negativo. Sin embargo, esto deterioraría la CAI. En España, los edificios deben estar provistos de sistemas de ventilación que aseguren la CAI según los requisitos del Documento Básico de Salubridad del Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HS/3) [33]. Este documento fija el requisito en base a la concentración de CO_2 , pero da por válida toda solución que asegure un caudal mínimo por zonas definido según el mismo documento.

En este contexto, los sistemas de ventilación mecánica con recuperación de calor (VMRC) son cada vez más atractivos en vistas de asegurar CAI y cumplir con los requisitos de bajo consumo energético en los edificios, siendo incluso necesario en algunas regiones de Europa [34]. Una ventaja adicional de estos sistemas es la posibilidad de baipasear el recuperador de calor en función de las condiciones exteriores y las necesidades interiores, lo que los posiciona como una solución viable para aprovechar la refrigeración gratuita y mantener la CAI en reformas y edificios de nueva construcción.

1.5 Objetivos de este trabajo

Las estrategias de enfriamiento nocturno mediante el sistema de ventilación, aplicadas a edificios de viviendas, es una alternativa de alto interés tanto para la descarbonización de edificios como para hacer frente a la incapacidad que presentan algunas viviendas de España para vencer la necesidades de refrigeración.

Dada la necesidad de asegurar la CAI en los edificios, la instalación de al menos un sistema que garantice una tasa mínima de ventilación se ha vuelto obligatoria en los edificios de nueva construcción. La normativa española sigue permitiendo el uso de sistemas de ventilación naturales siempre y cuando se garantice la

CAI. Los sistemas mecánicos, a pesar de presentar un consumo energético adicional, también permiten aprovechar la ventilación para la refrigeración.

Una solución más completa consiste en un sistema de ventilación con recuperador de calor que, además de ofrecer un importantes ahorros energéticos en invierno, permite aprovechar el potencial de enfriamiento nocturno durante los meses de verano mediante sistemas de baipás. Luego, durante el día, se ahorra energía pre-enfriando el aire entrante. Esta solución, que inicialmente se considera óptima durante todo el año, requiere de un análisis más detallado para las noches de verano o si, por el contrario, la ventilación natural nocturna ofrece mayores beneficios.

Este trabajo tiene como objetivo responder a la cuestión anterior. Para ello, se llevaron a cabo estudios de casos en La Casa de la Tierra, una vivienda unifamiliar aislada en Los Valientes (Molina del Segura). Esta vivienda presenta un sistema de ventilación natural y un sistema de ventilación mecánico con recuperador de calor sensible, lo que permitió realizar un estudio de diferentes casos. Previo a ello, y en vistas a extrapolar los resultados obtenidos en La Casa de la Tierra a un contexto más amplio, se caracterizó una vivienda tipo del parque edificado español en base a estudios existentes en la bibliografía, y también se extendió los requisitos de ventilación a diversas regiones de Europa.

2 METODOLOGÍA

El estudio de casos se realizó mediante simulaciones energéticas en una vivienda unifamiliar aislada. Previo a introducir aspectos relacionados al propio edificio y su modelado (sección 2.2), se caracterizó una vivienda unifamiliar tipo del parque edificado para poder generalizar los resultados a contextos más amplios.

2.1 Caracterización de la vivienda unifamiliar tipo en España

Como referencia se tomó el informe de la Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España (ERESEE) [35]. Este último presenta un estudio completo sobre las características del parque edificado nacional agrupando por periodos y tipologías de edificios.

Este trabajo se centra en las viviendas de tipo unifamiliar por su mayor consumo energético en comparación con las viviendas en bloque de pisos, llegando casi a duplicarlo [36]. Las viviendas unifamiliares se clasifican entre aisladas y adosadas o pareadas, correspondiendo a un 13,9% y a un 17,9% del parque edificado actual respectivamente [35].

El proyecto SECH-SPAHOUSEC [36] indica que una vivienda unifamiliar a nivel nacional presenta una superficie media de 140,2 m². Específicamente, para la zona climática del mediterráneo esta media se sitúa en 136,8 m².

El trabajo de apoyo Segmentación en clústeres tipológicos y caracterización geométrica del parque residencial de viviendas en España [35] proporciona valores característicos para clústeres de viviendas unifamiliares (y multifamiliares) agrupados por periodos históricos. Ponderado por clúster, la superficie media de una vivienda unifamiliar estaría en torno a 120 m². Si tomamos una altura de 2,5 m tendríamos un volumen de 300 m³. De acuerdo con [35] la vivienda unifamiliar tipo presentaría una superficie total de intercambio de calor entre 200-275 m², cuya media ponderada es de 241 m².

La ocupación suele ser superior a 2 personas por vivienda [35], [36], [37] y según [36] el número de estancias totales asciende a 8.

2.1.1 Necesidades de ventilación

Según [21] la tipología de vivienda más común presenta 3 habitaciones además de baños, salón y cocina, lo que permite asumir como vivienda tipo la que presenta 3 habitaciones, 1 salón, 1 cocina y 2 baños.

Una vivienda de esas características de acuerdo con el CTE DB-HS/3 debería presentar un sistema de ventilación que proporcionase al menos 33 L/s. Es decir, podríamos estimar en torno a 0,4 renovaciones de aire por hora (ren/h) como caudal de ventilación de una vivienda unifamiliar tipo en España.

2.2 Edificio de referencia

El edificio de referencia es La Casa de la Tierra [38], una vivienda unifamiliar aislada construida entre 2011 y 2012. Está concebida como vivienda bioclimática y presenta una serie de estrategias pasivas orientadas a reducir la demanda.



Fig. 3. La Casa de la Tierra.

Su estructura principal está compuesta por muros de carga de arcilla aligerada aislados por el exterior, esta composición presenta un mejor comportamiento térmico frente a otras soluciones estándar [39]. La cubierta presenta la misma filosofía, mediante dos composiciones: cubierta vegetal sobre losa de hormigón y grava sobre forjado de madera. Por último, la fachada sur se encuentra parcialmente enterrada. Esta vivienda fue objeto de estudio de investigaciones anteriores [40], [41]. En la Tabla 3 se presenta información adicional sobre las transmitancias térmicas y superficies de los elementos constructivos.

Tabla 3. Transmitancias térmicas y superficies de los elementos constructivos de La Casa de la Tierra.

Cerramiento	U (W/m ² K)	Área (m ²)
Muros en contacto con el aire exterior	0,55	128,4
Suelo	0,84	150,7
Cubierta de grava	0,23	120,8
Cubierta vegetal	0,47	22,4
Ventanas		62,9
Marco	2,20	
Acrilamiento 1 (5+5/12/6)	2,80	
Acrilamiento 2 (5+5/12/Planitherm XN 6)	1,60	

Esta vivienda es de gran interés para este estudio debido a que presenta un sistema de ventilación natural compuesto por cuatro chimeneas solares y una torre de viento. Las chimeneas solares presentan una lámina de acero que actúa como absorbedor de calor (Fig. 4). Su funcionamiento normal consiste en extracción de aire por flotabilidad durante las horas de sol y el aire fresco entra a la vivienda a través de la torre de viento y ventanas abiertas.

La torre de viento presenta una altura libre de 8 m y no es una torre convencional con captador de viento en la cumbre que permita aprovechar el viento de todas las direcciones si no que únicamente presenta entradas de aire orientadas al norte, estas entradas son ventanas de tipo abatible (Fig. 5).



Fig. 4. Fotografía de la chimenea solar.



Fig. 5. Fotografía interior de la torre de viento.

En paralelo a ese sistema, recientemente se instaló un equipo de ventilación mecánica con recuperador de calor sensible de la marca Sabiana. El modelo es el ENY-SP-180 en disposición vertical y en la Tabla 4 se muestran algunos parámetros relevantes de su hoja de datos.

Tabla 4. Hoja de datos del equipo de ventilación mecánico

Modelo	ENY-SP-180
Caudal máximo de ventilación	180 m ³ /h
Caudal de referencia	130 m ³ /h
Eficiencia sensible	91%
Consumo de energía a caudal de referencia	23 W
Consumo específico de energía (SFP)	0,174 W/(m ³ /h)
Diámetro de tuberías	DN125

2.2.1 Requisitos de ventilación

En total son 150 m² de espacio interior distribuidos en: salón, cocina, despacho, tres dormitorios, dos baños y la torre de viento, lo que da como resultado un volumen habitable de 421 m³.

Según los requisitos del CTE DB-HS/3, que se determinan únicamente por el número de dormitorios y tipo de estancias (seco o húmedo), esta vivienda requiere una tasa de ventilación de al menos 130 m³/h o 0,31 ren/h. Extendiendo esta configuración a nivel europeo, según el trabajo de Zukowska D. et al. [34], si La Casa de la Tierra existiera en cualquiera de los países estudiados, la tasa de ventilación sería similar a la requerida en España (entre 0,19-0,36 ren/h) (Tabla 3).

Tabla 5. Tasas de ventilación de La Casa de la Tierra en otras regiones y normativas europeas.

Región	Austria	Dinamarca	Estonia	Francia	Noruega	Reino Unido	UNE EN 16798-1
ACH	0,33	0,19	0,32	0,25	0,36	0,19	0,27

2.2.2 Modelo energético

El modelo energético de La Casa de la Tierra fue desarrollado por Soto et al. [40] en TRNSYS [42], un software que permite simular diversos sistemas a través de librerías dinámicas o *types*. En TRNSYS, la librería más completa para simulaciones energéticas en edificios es el *type56 Detailed Multizone Building* el cual permite modelar edificios por zonas térmicas (multizona) atendiendo a su geometría mediante un plugin, *TRNSYS3D*, desarrollado para *SketchUP* y

posteriormente se exporta ese modelo geométrico a *TRNBuild* donde se le asignan materiales, propiedades, equipos, etc.

2.2.3 Modelo de ventilación natural

Se trata de un modelo de bucle de presiones (AFN, por sus siglas en inglés). Un modelo AFN consiste en un conjunto de volúmenes de control, idealizados a nodos, unidos entre sí mediante enlaces discretos. Cada nodo contiene las propiedades higrotérmicas del aire y para cada elemento de enlace, se asume que el flujo está gobernado por la ecuación de Bernoulli (ec. (8)).

$$\Delta P = \left(P_1 + \frac{\rho V_1^2}{2} \right) - \left(P_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} \right) + \rho g(z_1 - z_2) \quad (8)$$

donde:

ΔP : la caída de presión total entre los puntos 1 y 2.

P_1 y P_2 : la presión estática en la entrada y en salida.

V_1 y V_2 : la velocidad en entrada y en salida.

ρ : densidad del aire.

g : la aceleración de la gravedad.

z_1 y z_2 : cota de entrada y de salida.

Luego, el caudal a través de cada elemento se modela mediante flujo potencial o flujo cuadrático. En la vivienda, estos se modelaron los flujos como potenciales (ec. (9)).

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (9)$$

donde:

C_d : el coeficiente de descarga.

A : área del orificio.

En total se modelaron seis nodos:

Nodo {1}: El conjunto de espacios de uso normal (salón, cocina, dormitorios...).

Nodo {2}: La torre de viento.

Nodos {3-6}: Las chimeneas solares.

En la Fig. 4 se presenta un esquema idealizado del bucle de presiones propuesto. En este sentido, durante el día y con el tiro generado por las chimeneas un bucle esperado sería 0-2-1 de entrada en paralelo con las salidas 3-0, 4-0, 5-0, 6-0 y 1-0.

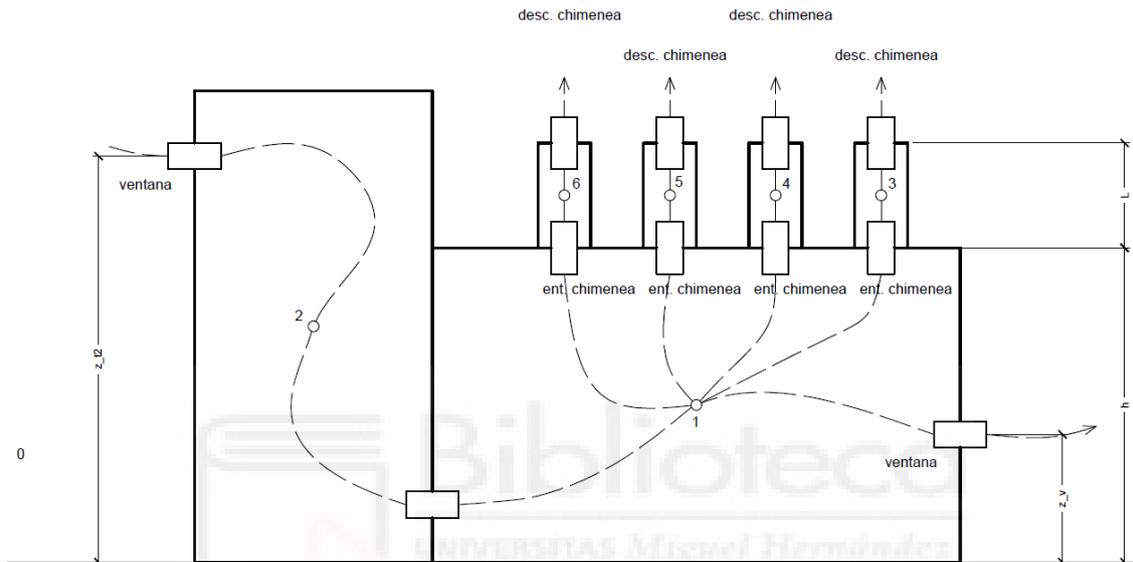


Fig. 6. Esquema bucle de presiones de La Casa de la Tierra.

2.2.3.1 Acoplamiento a TRNSYS

El resultado de cálculo de un modelo de bucle de presiones son los caudales que aire que fluyen a través de los elementos de enlace. Estos caudales posteriormente son llevados al modelo térmico de la vivienda en TRNSYS.

TRNSYS permite acoplar este tipo de sistemas mediante interacción directa con otro software que permita la modelización. Existen tres *types* que permiten realizar tal tarea:

Type155 Calling Matlab

Type66 Calling EES

Type97 Calling CONTAM

La manera de interactuar con el motor de cálculo de TRNSYS es la misma para los tres *types*, para cada *timestep* se obtiene un resultado cuando ambos modelos convergen a la misma solución, es decir, las temperaturas resultantes

de los mecanismos de transferencia de calor son las que provocan los caudales de ventilación natural y esos caudales a su vez son compatibles con las temperaturas resultantes. En la bibliografía a esta interacción se conoce como *onions*.

Los *types* anteriores están ordenados de mayor a menor dificultad de uso. El *type155* permite emplear un código escrito ad hoc en Matlab que permita resolver el sistema de ecuaciones propuesto, es muy robusto, pero requiere de previo conocimiento en empleo de métodos numéricos que permitan encontrar las soluciones de sistemas de ecuaciones no lineales.

El *type66* emplea EES [43], un programa que permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales sin necesidad de programar un algoritmo destinado a tal efecto, no obstante, debido a que el modo de conexión entre EES y TRNSYS es a través del portapapeles del sistema, requiere de un mayor tiempo de cálculo. El modelo original de ventilación natural desarrollado por Soto et al. [40] fue escrito en EES, en este trabajo para agilizar los cálculos se programó este modelo con el *type97*, es esto es, CONTAM [44].

CONTAM, es un programa destinado exclusivamente al análisis de la calidad del aire interior multizona. Por su parte está limitado a trabajar exclusivamente con aire seco, no obstante, no necesita de conexión directa a CONTAM como tal puesto que el propio motor de cálculo (CONTAMW) se encuentra presente en el propio *type97*, lo que permite realizar simulaciones de manera mucho rápida. Además, al contrario que con los anteriores programas, CONTAM permite escribir las ecuaciones que modelan el bucle de presiones de manera gráfica. Los modelos en CONTAM se construyen sobre lo que el propio programa denomina pseudo-geometría. A pesar de dibujar cada nodo y darle unas dimensiones, estas son visuales siendo las propiedades más importantes (área y volumen) asignadas de manera manual. En la Fig. 5 se muestra el esquema generado en CONTAM.

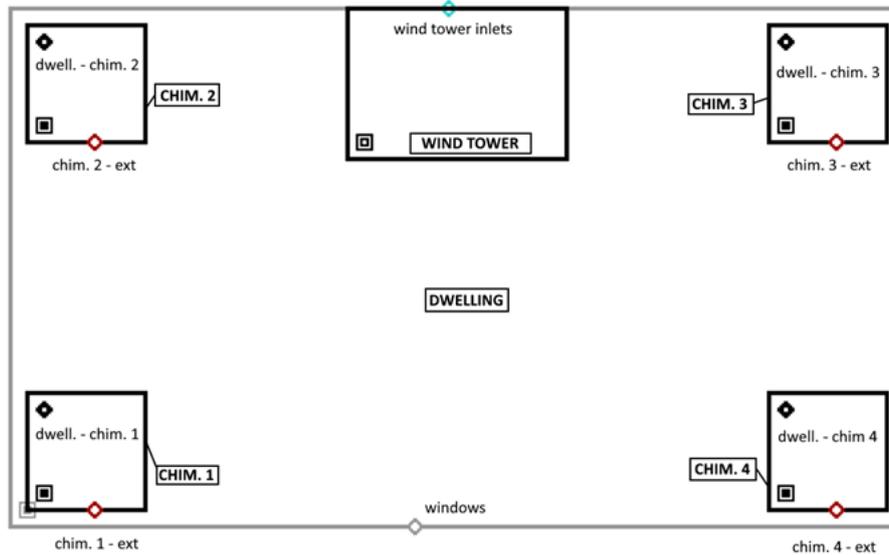


Fig. 7. Esquema generado en CONTAM.

Los enlaces entre zonas (o zona y exterior) se modelizan mediante *airflow elements* los cuales se representan como elementos tipo con forma de rombo. Es necesario definir, para cada *airflow element* los parámetros de coeficiente de descarga (C_d) y área de orificio (A). En la Tabla 6 se presentan los parámetros empleados.

Tabla 6. Parámetros de los elementos 'airflow path' modelados en CONTAM.

Airflow element	Elevation (m)	C_d (-)	A (m ²)
Exterior a torre	4,65	0,40	0,95
Vivienda a chimenea 1	2,50	1,00	0,01
Vivienda a chimenea 2	2,50	0,80	0,02
Vivienda a chimenea 3	2,50	1,00	0,01
Vivienda a chimenea 4	2,50	1,00	0,01
Chimenea 1 a exterior	4,50	0,60	0,32
Chimenea 2 a exterior	4,50	0,60	0,06
Chimenea 3 a exterior	4,50	0,60	0,30
Chimenea 4 a exterior	4,50	0,60	0,22
Vivienda a exterior	1,00	1,00	5,80

2.2.4 Sistema de ventilación mecánico

En el *type56*, para introducir un caudal de ventilación, directamente se crea un *Ventilation Type* para una o varias zonas. Para simular correctamente la capacidad del equipo de ventilación mecánica de aumentar o disminuir el caudal y baipasear el recuperador, el caudal, la temperatura y el contenido en humedad específica del aire se configuraron con input al *type* de ventilación.

Luego, para las funciones de recuperar calor o baipás se emplearon los siguientes *types*:

- *Type91*: Intercambiador de calor sensible, hace la función propia de recuperador de calor con las corrientes de aire exterior e interior de la vivienda.
- *Type11c*: Válvula de mezcla, este *type* permite mezclar dos corrientes de aire a y b a una proporción deseada. Su uso simula la capacidad de baipás, únicamente se emplean las proporciones 1 o 0 (todo a o todo b). El valor de la proporción es proporcionado en función del salto térmico y de la necesidad de refrigeración.
- *Type165*: Control diferencial ON/OFF, este controlador se emplea para evaluar la diferencia de temperatura interior-exterior. Esta diferencia de temperaturas es comparada con una consigna.
- *Type166*: Termostato, se emplea para evaluar cuando se necesita o no de refrigeración, es decir, cuando la temperatura interior se encuentra por encima de las condiciones de confort.
- *Type147*: Ventilador de caudal variable, este *type* permitirá modificar el caudal de aire de ventilación entre un valor mínimo y un valor máximo a partir de una señal lógica de 1 o 0.

De esta manera, el baipás se consigue cuando el controlador lea una diferencia de temperatura interior-exterior mayor o igual a 1 K (ajustado mediante datos experimentales) y el termostato muestre un 1 lógico en necesidad de refrigeración. Si se dan las dos condiciones anteriores, la válvula de mezcla que dejaría pasar el aire exterior sin pasar por el recuperador de calor. Además, esa

misma señal se emplea para aumentar el caudal de ventilación a su valor máximo. El caudal de referencia o mínimo, esto es, el que exige el CTE DB-HS/3 para La Casa de la Tierra es de 130 m³/h, el equipo instalado permite tasas de ventilación de hasta 180 m³/h.

Finalmente, en la Fig. 6 se muestra el esquema generado en TRNSYS.

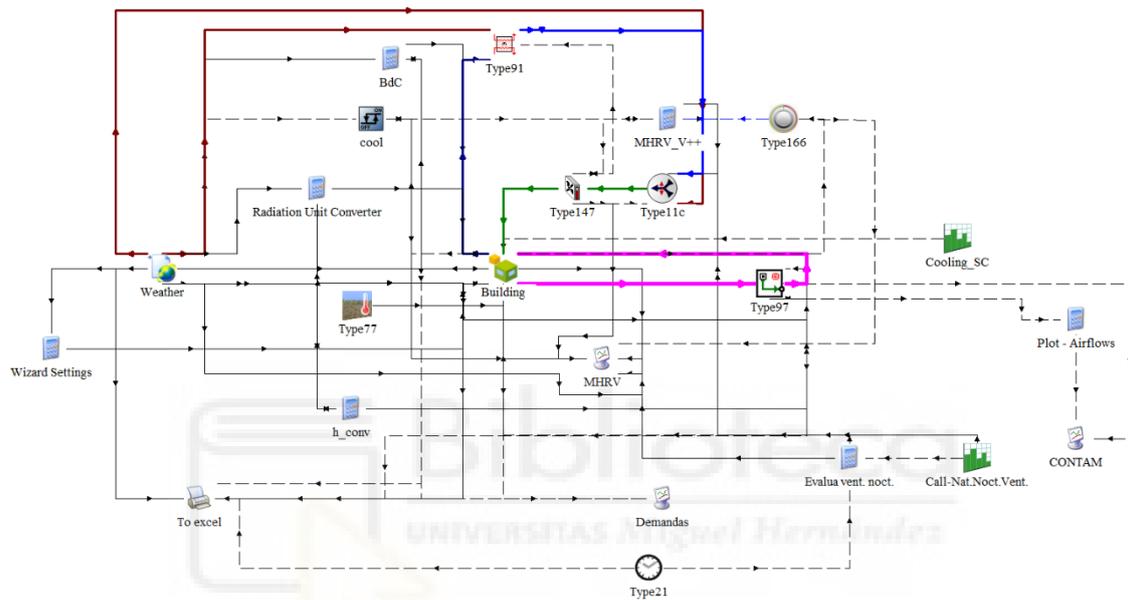


Fig. 8. Esquema generado en TRNSYS.

2.3 Resumen de características

En la Tabla 7 se muestra un resumen de las características de la vivienda unifamiliar tipo en España y La Casa de la Tierra.

Tabla 7. Características de la vivienda unifamiliar tipo en España.

Parámetro	Vivienda unifamiliar tipo	La Casa de la Tierra
Superficie en planta (m ²)	120	150
Volumen (m ³)	300	421
Superficie de intercambio de calor con el aire exterior (m ²)	241	530
Compacidad de acuerdo con el CTE	1,25	0,79
Ocupación	2,5	4
Caudal de ventilación (ren/h)	0,40	0,31

Ambos edificios presentan dimensiones similares, pero con La Casa de la Tierra algo mayor, menos compacta y con más ocupación respecto a la vivienda unifamiliar tipo. La diferencia en los requisitos de ventilación está en torno a los 10,5 m³/h.

2.4 Ciudades de estudio

Todos los datos climáticos fueron obtenidos a partir de un año meteorológico tipo (TMY, por sus siglas en inglés). Esta información fue obtenida en extensión *EnergyPlusWeather* (.epw) del proyecto Climate One Building [45]. El periodo de interés es el estival, el cual comprende los días de junio hasta septiembre, un total de 122 días al año.

2.4.1 Análisis climático

La vivienda se ubica en Los Valientes (Molina del Segura), en el sureste de España y próximo a la costa mediterránea. Los Valientes pertenece a la región de Murcia región donde en 2023 se reportaron viviendas con incapacidad de mantener una temperatura suficientemente fresca durante el verano, no obstante, también se realizó el estudio en Madrid y Sevilla, obteniendo así resultados para un contexto más amplio. En la Fig. 7 se presenta un diagrama psicrométrico con los puntos correspondientes a verano para estas tres ciudades.

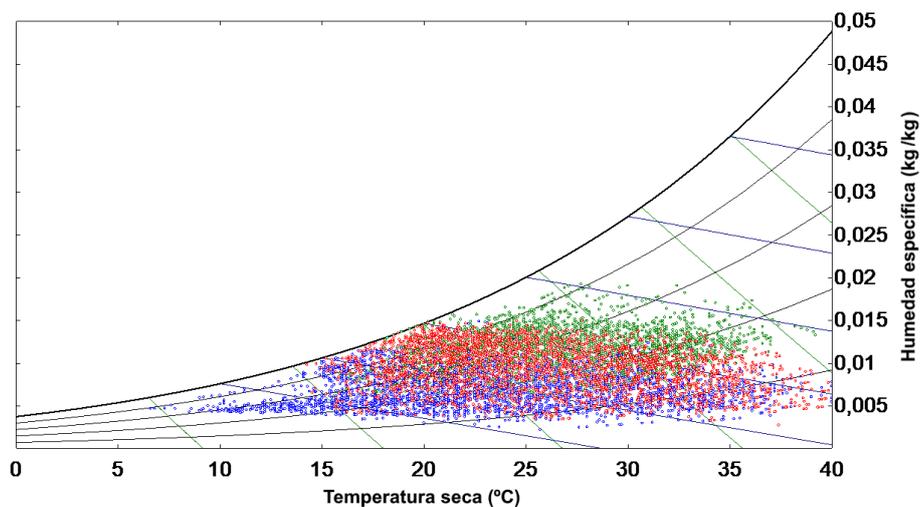


Fig. 9. Diagrama psicrométrico con los puntos de verano para Los Valientes (verde), Madrid (azul) y Sevilla (rojo).

Asumiendo que las temperaturas más bajas (parte izquierda del diagrama) se dan por la noche y que las temperaturas más altas (parte derecha del diagrama) se dan durante el día, se pueden extraer interesantes conclusiones de estas regiones.

Madrid, un clima continental seco y alejado de las costas, presenta una mayor amplitud diaria, esto es, mayor diferencia entre las temperaturas máximas del día y las mínimas de la noche. Esto último indica que Madrid es una ciudad que, en comparación con las otras dos, presenta mayor potencial.

Por otra parte, Los Valientes y Sevilla, mucho más cercanas a las costas del mar mediterráneo, presentan una mayor influencia del mar siendo ambos climas más húmedos y como menor amplitud diaria, dándose temperaturas nocturnas algo mayores respecto a las observadas en Madrid.

2.5 Campaña experimental

Se llevo a cabo una campaña experimental de duración de una semana la cual se centró en validar en la vivienda bajo un escenario de ventilación mecánico. Para ello, se midió en intervalos de 15 min:

- Temperatura y humedad del aire exterior.
- Temperatura y humedad del aire interior.
- Temperatura en tres tomas del equipo de ventilación mecánica.

En la Fig. 8 se muestra una fotografía de la parte experimental y en la Tabla 8 se muestra información de los sensores.



Fig. 10. Fotografía de la toma de datos en el equipo mecánico de ventilación.

Tabla 8. Información de los sensores.

Testo 440	Tipo	Rango	Precisión	Descripción
Temperatura seca	NTC	-20 – 70°C	± 0,5°C	Sonda montada en el centro de los tubos de ventilación
PCE-FWS 20 N	Tipo	Rango	Precisión	Descripción
Temperatura seca exterior	NTC	-40 – 60°C	± 1°C	Estación meteorológica montada en cubierta de la vivienda
Humedad exterior	Capacitivo	1 – 99%	± 4% de 20 a 80%	
Temperatura seca interior	NTC	0 – 50°C	-	Montado en el interior de la vivienda.
Humedad interior	Capacitivo	1 – 99%	-	

2.6 Métricas evaluadas

Se evaluaron un total de tres métricas o *Key Performance Indicators* (KPI): energía sensible de ventilación, intensidad de calor interior y el consumo de energía.

2.6.1 Energía sensible de ventilación

La carga térmica de ventilación se define como el producto del gasto másico de aire (caudal volumétrico por densidad) por el calor específico y por el sato térmico. En función de la diferencia de temperaturas, la carga térmica necesitará ser vencida ($Q_{vent} > 0$) o aportará enfriamiento ($Q_{vent} < 0$). Luego, según mayor o menor sea el gasto másico, mayor o menor será la carga térmica.

Se define entonces el energía de enfriamiento, aportada por la ventilación, como la suma de la carga de ventilación para cada instante de tiempo, evaluando así la energía ganada o liberada a través de la ventilación (ec. (10)).

$$E_{sens} = \frac{1}{3600} \sum \dot{v} \cdot \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot (T_{vent} - T) \quad (10)$$

Donde:

- E_{sens} : Es la energía sensible de ventilación (kWh)
- \dot{v} : Caudal volumétrico de ventilación (m^3/s).
- $\rho(T)$: Densidad del aire (kg/m^3).
- $c_p(T)$: Calor específico del aire (kJ/kg-K).
- T_{vent} : Temperatura del aire de ventilación, según el sistema será: aire exterior o aire a la temperatura de la salida del recuperador de calor ($^{\circ}C$).
- T : Temperatura del recinto ventilado ($^{\circ}C$).

2.6.2 Intensidad de calor

Una forma sencilla de evaluar durante cuanto tiempo un recinto permanece a temperatura distinta a la de un rango de confort es mediante las horas fuera de consigna (UH, por sus siglas en inglés). De este modo, si se establece una temperatura máxima y una temperatura mínima, cualquier hora fuera de ese rango representa una UH.

Sin embargo, esta métrica no permite distinguir por cuantos grados ha estado el recinto fuera del límite establecido. Por esto último, se evaluó la intensidad de calor (OI, por sus siglas en inglés), es decir, el producto de esa diferencia respecto a los límites superiores e inferiores por el número de horas. De forma

simplificada y puesto que el estudio se realiza durante el verano, únicamente es de interés el límite superior (ec. (11)).

$$OI = \sum (T - T_{max}) \cdot \gamma \quad (11)$$

Donde:

- T : Es la temperatura del recinto ($^{\circ}\text{C}$).
- T_{max} : Es la temperatura límite según el modelo de confort elegido, 26°C para el modelo pasivo y $\theta_c + 3^{\circ}\text{C}$ (ec. (2)) correspondiente a un PPD < 10%.
- γ : Es un indicador lógico que vale 1 si $T > T_{max}$ y 0 caso contrario.

2.6.3 Consumo de energía

En función de la estrategia de ventilación escogida y si existe o no presencia de equipo de refrigeración, el consumo de energía final (CEF) será la suma de ambos componentes o uno de ellos por separado. El consumo de energía del equipo mecánico se definió en base al SFP (ec. (12)).

$$CEF_{vent} = \sum \dot{v}_m \cdot SFP \quad (12)$$

Donde:

- CEF_{vent} : Consumo de energía final asociado a la ventilación (W).
- \dot{v}_m : Es el caudal de ventilación mecánico (m^3/h).
- SFP : Consumo instantáneo de energía por volumen de aire ventilado ($\text{W}/(\text{m}^3/\text{h})$).

Luego, el consumo de energía asociado a refrigeración (CEF_{ref}) se estimó en base a la demanda de refrigeración y mediante un sistema con rendimiento estacional (SEER) constante. Para ello se asumió un hipotético equipo convencional de compresión de vapor de Toshiba modelo RAS-35 de 3,5 kW de potencia nominal con un SEER de 6,8.

$$CEF_{ref} = \frac{D_{ref}}{SEER} \quad (13)$$

Donde:

- CEF_{ref} : Consumo de energía final asociado a la ventilación (Wh).
- D_{ref} : La demanda de energía para refrigeración (Wh).

2.7 Casos de estudio

El estudio se realizó para los meses de verano, es decir, de junio a septiembre. Puesto que la vivienda tiene la capacidad de ventilar mediante dos sistemas independientes, se propusieron distintos escenarios de ventilación. Por un lado, durante los días, debido a las altas temperaturas, lo ideal es ventilar con una intensidad mínima requerida por CAI, mediante sistema mecánico con recuperación de calor. De este modo, se evita introducir aire exterior caliente al interior de la vivienda. Por otro lado, durante las noches existen tres posibles escenarios:

- VMRC: Ventilación mecánica con recuperador de calor, esto es, ventilar de manera mecánica con la misma intensidad que durante el día. Si el aire exterior está más fresco, se baipasea el recuperador de calor.
- VMRC+VN: Ventilación mecánica con recuperador de calor con tasa de ventilación incrementada. Por las noches se incrementa la tasa de ventilación, lo que, en simultaneidad con aire más fresco, permite aprovechar un mayor potencial de enfriamiento nocturno, con la contrapartida de incrementar el consumo de energía en ventilación. El caudal máximo de ventilación que permite el sistema mecánico es de 180 m³/h o 0,43 ren/h.
- VMRC+VNN: Ventilación natural, esto es, apagar el sistema mecánico y pasar a ventilación natural. Para facilitar el empleo de este modo por parte de los usuarios de la vivienda, se propusieron franjas horarias en las cuales se apaga el sistema mecánico y se pasa a modo natural. En la Tabla 9 se muestran estas franjas horarias para las tres ciudades.

Tabla 9. Franjas horarias de ventilación natural para el escenario VMRC+VNN.

Mes	Los Valientes	Sevilla	Madrid
Junio	22:00-11:00	21:00-10:00	19:00-13:00
Julio	24:00-10:00	23:00-10:00	22:00-11:00
Agosto	01:00-10:00	23:00-10:00	21:00-11:00
Septiembre	20:00-13:00	20:00-13:00	18:00-15:00

Los escenarios anteriores fueron evaluados bajo dos condiciones de temperatura interior: *freerunning* y condiciones controladas.



3 RESULTADOS

El modelo desarrollado en TRNSYS-CONTAM se validó en dos etapas, en función del sistema de ventilación (natural o mecánico). En ambas etapas, el comportamiento de la temperatura interior fue *freerunning*, es decir, sin control.

3.1 Validación del modelo, ventilación natural

La vivienda flotando bajo sistema de ventilación natural fue validado con los datos experimentales de Soto et al. [40]. En las Fig. 11a, 11b, 11c y 11d, se muestra una comparativa de los caudales de las chimeneas estimados por el modelo y el experimental. Por último, en la Fig. 12 se muestra una comparativa entre temperaturas.

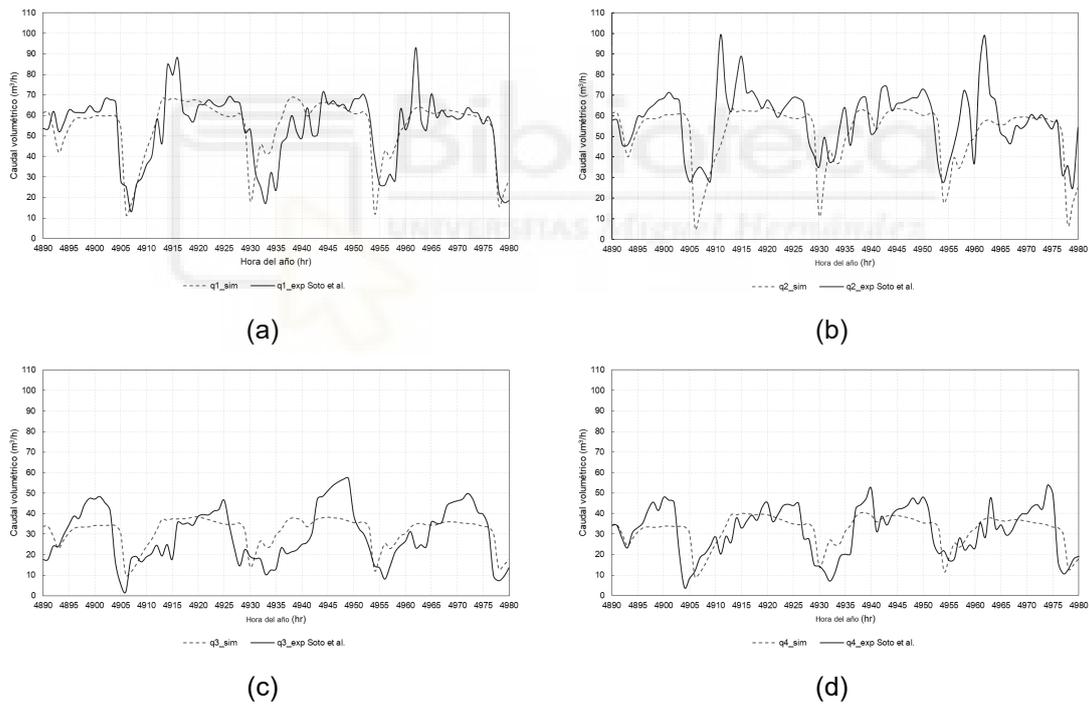


Fig. 11. Comparativa entre caudales medidos por Soto et al. [40] y los estimados por el modelo. (a) chimenea 1, (b) chimenea 2, (c) chimenea 3 y (d) chimenea 4.

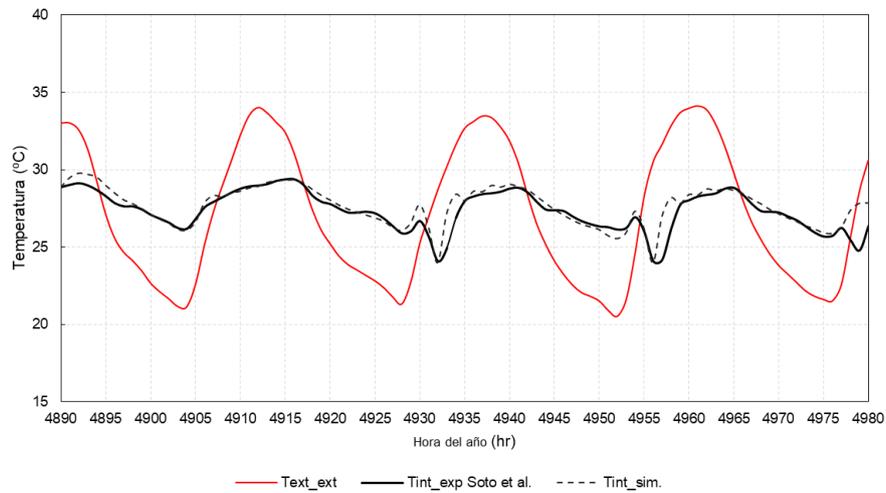


Fig. 12. Comparativa entre temperaturas experimentales y las estimadas por el modelo.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) para las chimeneas fue de 11,1 m³/h para la chimenea 1, 14,5 m³/h para la chimenea 2, 10,6 m³/h para la chimenea 3 y 9,2 m³/h para la chimenea 4. Para la temperatura interior, el RMSE fue de 0,7 °C.

3.2 Validación del modelo, ventilación mecánica

Se midió durante algo más de 7 días, en total unas 182 h en intervalos cuatrorarios. Durante este periodo, la vivienda estuvo ventilada únicamente por el sistema mecánico, las chimeneas solares fueron tapadas y se pidió a los ocupantes que mantuviesen, cuando fuera posible, las ventanas cerradas evitando así la entrada de aire no controlado. En la Fig. 13 se muestra una comparativa de la temperatura interior y humedad relativa medidas experimentalmente y las estimadas por el modelo.

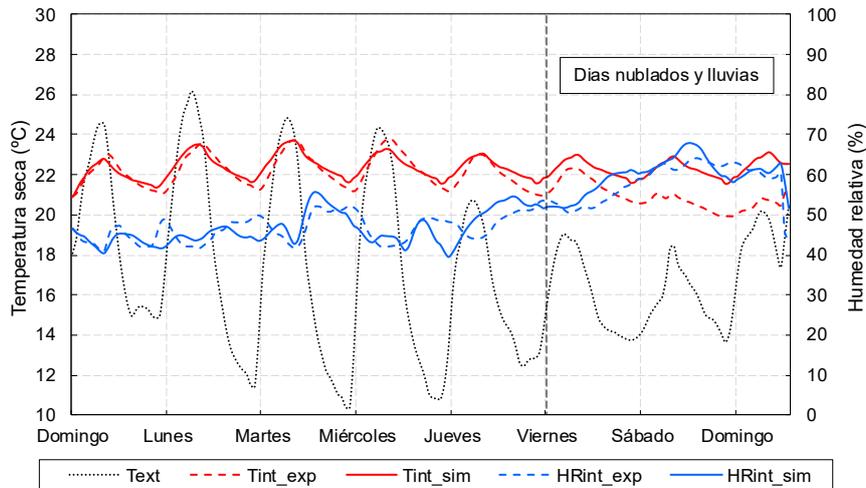


Fig. 13. Comparativa de temperatura y humedad relativa medido experimentalmente y estimado por el modelo.

Como no se midió radiación solar, a nivel de modelo se emplearon los datos de un año tipo meteorológico (TMY). El modelo respondió bien, salvo durante los últimos días, en los cuales se dieron días nublados y algo de lluvias, lo que provocó cierta discrepancia entre lo que se midió y el modelo. No obstante, tomando los días anteriores como válidos, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para la temperatura interior y humedad fue de $0,4^{\circ}\text{C}$ y $3,1\%$ respectivamente.

Respecto al equipo de ventilación mecánica, se ventiló durante el día a una tasa de $130\text{ m}^3/\text{h}$ y durante las noches al máximo que el equipo fuera capaz. Dadas las condiciones climáticas de la semana de medida (no fueron días calurosos), el equipo no ventiló durante las noches con temperatura exterior, si no que, recuperaba calor evitando enfriar en exceso la vivienda.

Esto se limita mediante la lógica del propio sistema, la cual fija un límite inferior a 20°C . Se puede extender ese límite hasta 10°C (situación deseada en verano), pero durante esta campaña se dejó el límite inferior de 20°C evitando introducir un aire muy frío provocando falta de confort a los usuarios. Durante los días, si la temperatura exterior subía por encima de los 26°C el equipo recuperaba calor pre-enfriando el aire de impulsión. En resumen, este sistema de ventilación

intentó mantener la temperatura interior entre 20 y 26°C. En la Fig. 14 se muestran las temperaturas en las tomas del equipo.

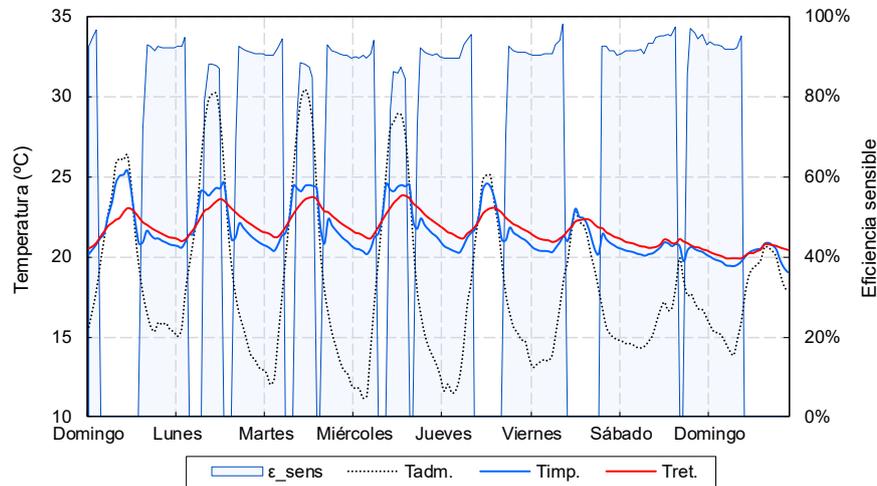


Fig. 14. Medidas experimentales de temperatura y en las tomas del equipo mecánico de ventilación.

Por último, la eficiencia sensible media medida para los 7 días fue del 90%. Con el modelo validado bajo ambos escenarios de ventilación, se procedió al estudio de estrategias de ventilación en las tres ciudades: Los Valientes, Madrid y Sevilla y bajo dos escenarios de temperatura interior: *freerunning* y condiciones controladas.

3.3 Edificio *freerunning*

Se simuló la vivienda sin ningún sistema de refrigeración que mantuviese la temperatura interior dentro de un rango de confort. De este modo, únicamente la ventilación fue el sistema con capacidad para mantener o proveer algo de confort.

3.3.1 Potencial climático de enfriamiento

La primera métrica evaluada fue la energía sensible de enfriamiento, esto es, la suma horaria de carga térmica de ventilación. En las Fig. 15a, 15b y 15c se muestran estos resultados.

En las tres ciudades, el cómputo anual fue negativo, esto es, la energía sensible asociada a la ventilación fue principalmente enfriamiento. Aumentar la ventilación

durante las noches (VMRC+VN) y pasar a ventilación natural durante las noches (VMRC+VNN) aportaron 1,5 y 5,4 veces más de enfriamiento respectivamente.

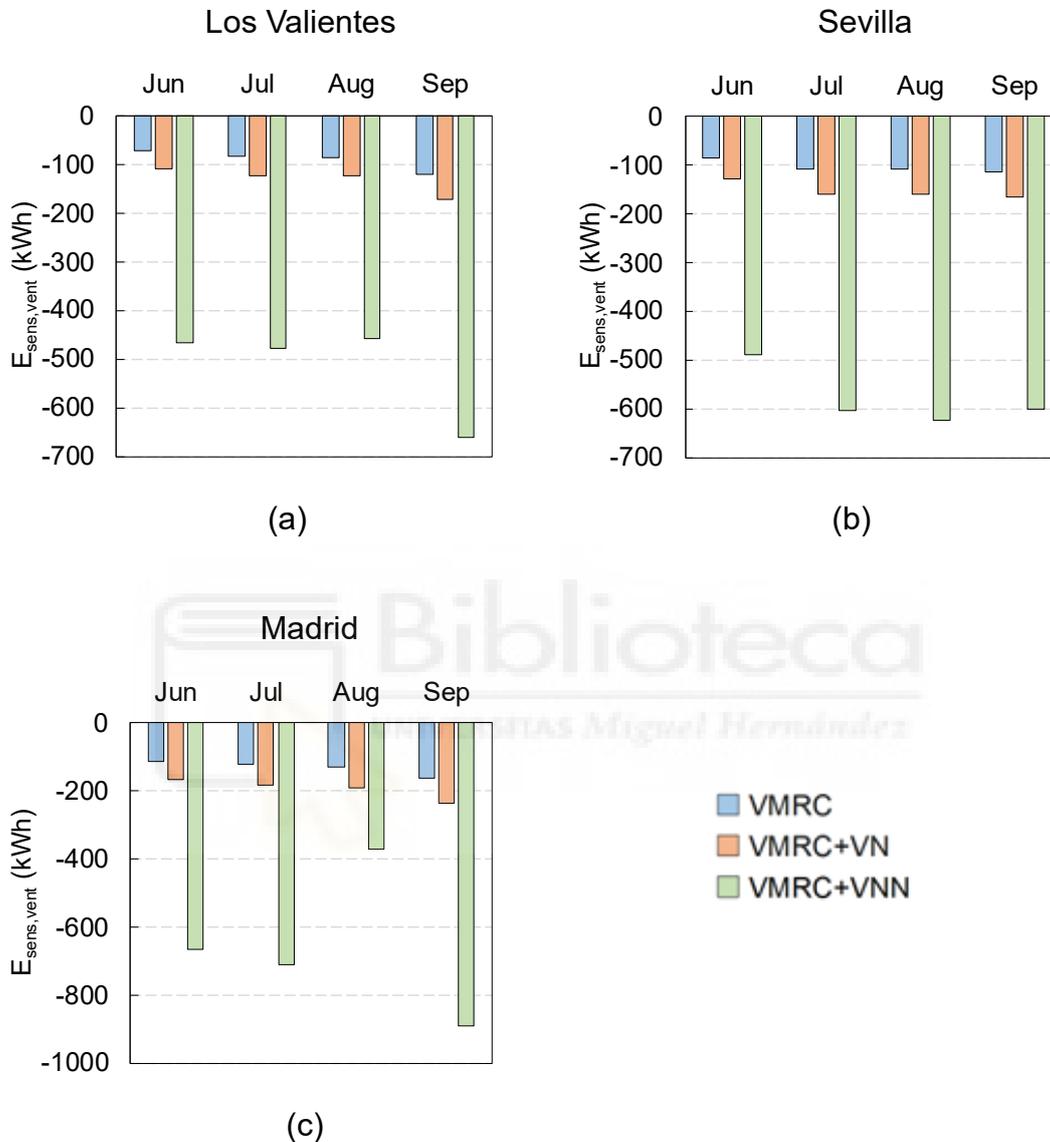


Fig. 15. Energía sensible de ventilación. (a) Los Valientes, (b) Sevilla y (c) Madrid.

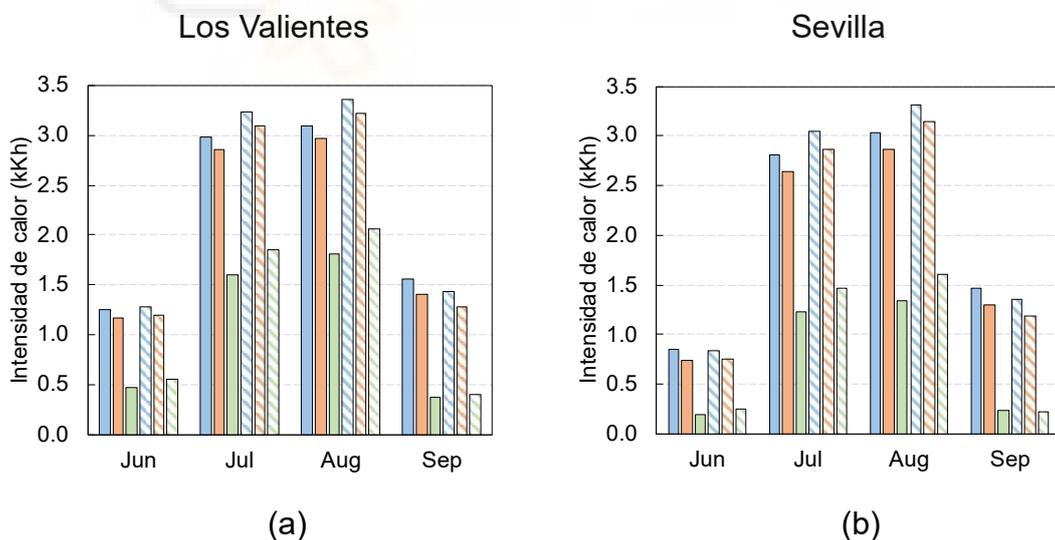
La ciudad que mayor potencial presentó fue Madrid, seguido de Sevilla y Los Valientes. Como estos resultados fueron evaluados en condiciones *freefloating*, no fueron representativos en términos de confort, y por ello se evaluó la métrica de intensidad de calentamiento (OI), resultado que se presenta en 3.3.2.

3.3.2 Intensidad de calentamiento interior

En las Fig. 16a, 16b y 16c se muestra la intensidad de calentamiento interior, para cada uno de los tres escenarios de ventilación y modelos de confort, para Los Valientes, Sevilla y Madrid respectivamente.

De las mejoras propuestas: aumentar el caudal de ventilación mecánica durante las noches y pasar a ventilación natural durante las noches, ambas permitieron reducir la falta de confort estimada por ambos modelos (fijo y adaptativo). Sin embargo, a pesar de incrementar la tasa de ventilación mecánica, ventilar por medios naturales durante las noches redujo considerablemente la intensidad de calentamiento.

En Los Valientes aumentar el caudal de ventilación durante las noches supone una disminución de la intensidad de calentamiento entre 5-6% para Los Valientes, 7-8% para Sevilla y 10-11% para Madrid. Por otro lado, si la estrategia escogida es ventilar por medios naturales durante las noches, su implementación supone una reducción de entre 48-52%, 59-63% 54-59% respectivamente.



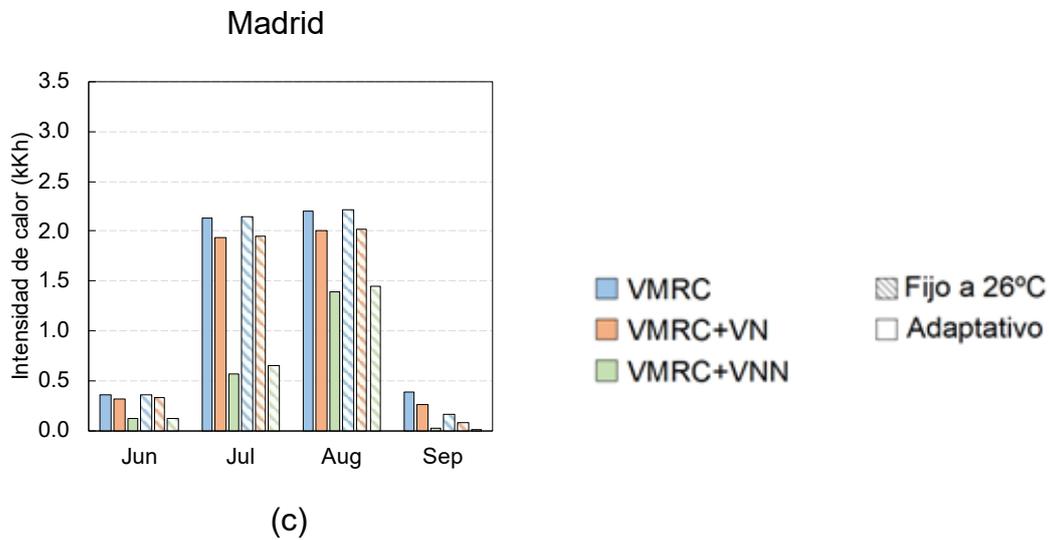


Fig. 16. Intensidad de calor. (a) Los Valientes, (b) Sevilla y (c) Madrid.

3.3.3 Tasas de ventilación nocturna

Para las tres ciudades, el sistema de ventilación mecánico proporcionó una tasa de ventilación en torno a $130 \text{ m}^3/\text{h}$ o $0,31 \text{ ren/h}$ para el escenario VMRC, el mínimo exigido por el CTE DB-HS/3, llegando hasta $180 \text{ m}^3/\text{h}$ o $0,43 \text{ ren/h}$ para el escenario VMRC+VN.

Empleando ventilación natural, estas tasas fueron superiores. En la Fig. 17 se muestran las renovaciones horas percibidas en las tres ciudades. A pesar de las diferencias climáticas, las tasas de ventilación estuvieron en torno a 3 ren/h .

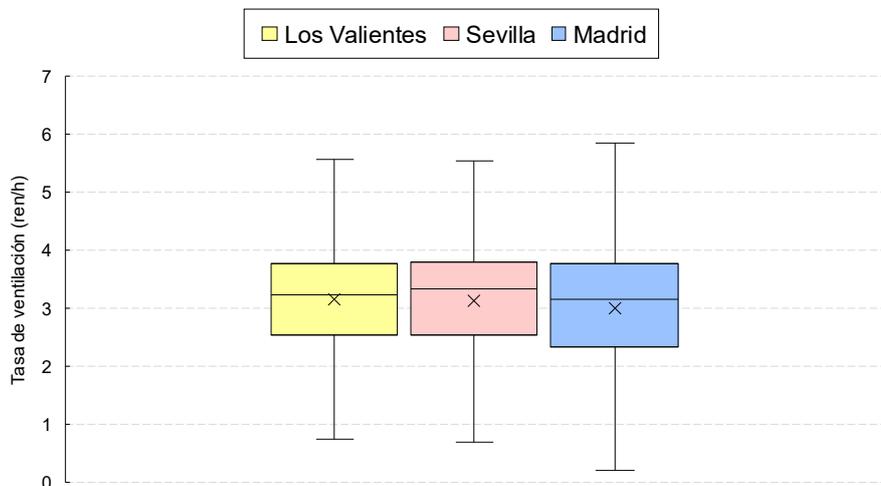


Fig. 17. Tasas de ventilación.

3.3.4 Consumo de energía

El consumo de energía también fue distinto puesto que, según la estrategia, se reduce o se aumenta el caudal de ventilación por medios mecánicos. En las Fig. 18a, 18b y 18c se muestran estos resultados.

Entre ciudades, las diferencias fueron menores, el caso base, esto es, ventilación mecánica a una tasa constante, supuso un consumo de energía asociado a ventilación en torno a 64 kWh. Adoptar la estrategia de aumentar el caudal de ventilación durante la noche implicó un aumento en torno al 40%, por el contrario, pasar a ventilación natural durante las noches permitió ahorrar un 38% en el consumo de energía de ventilación.

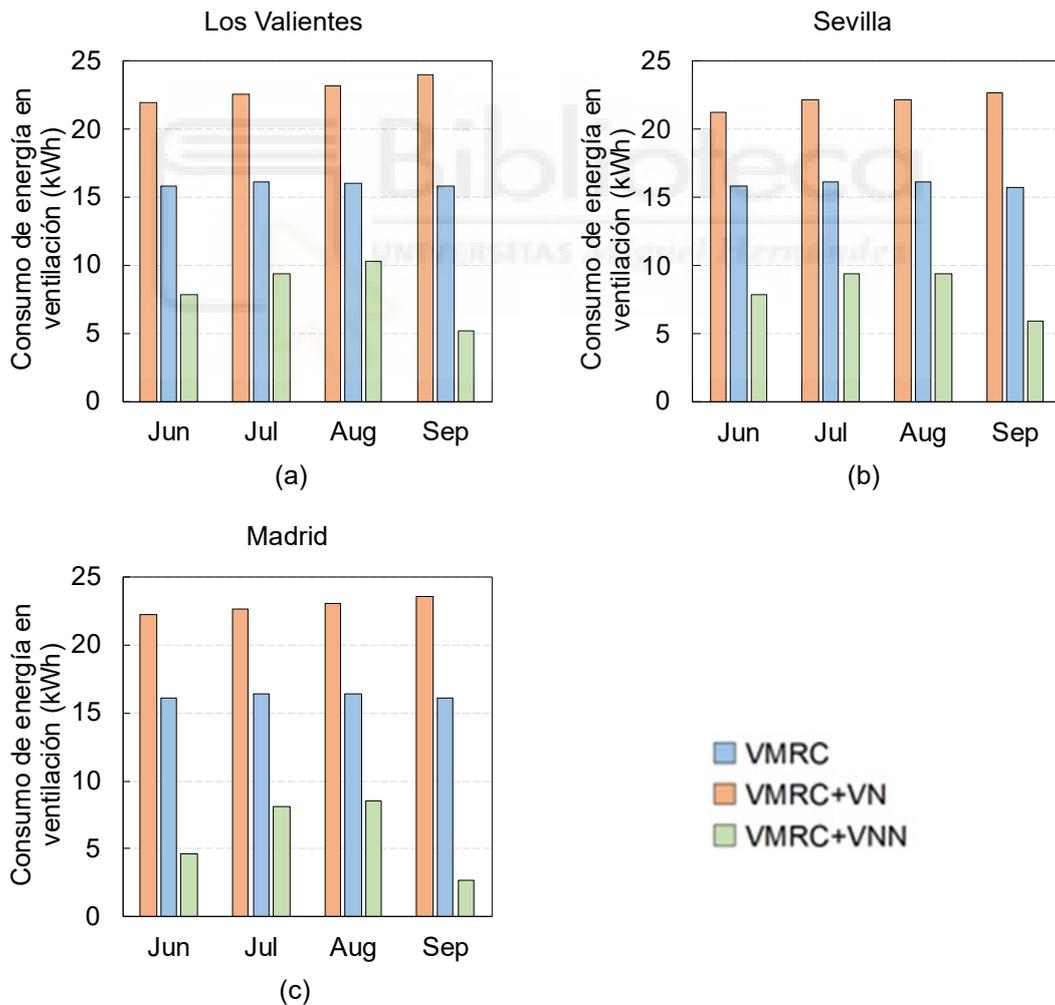


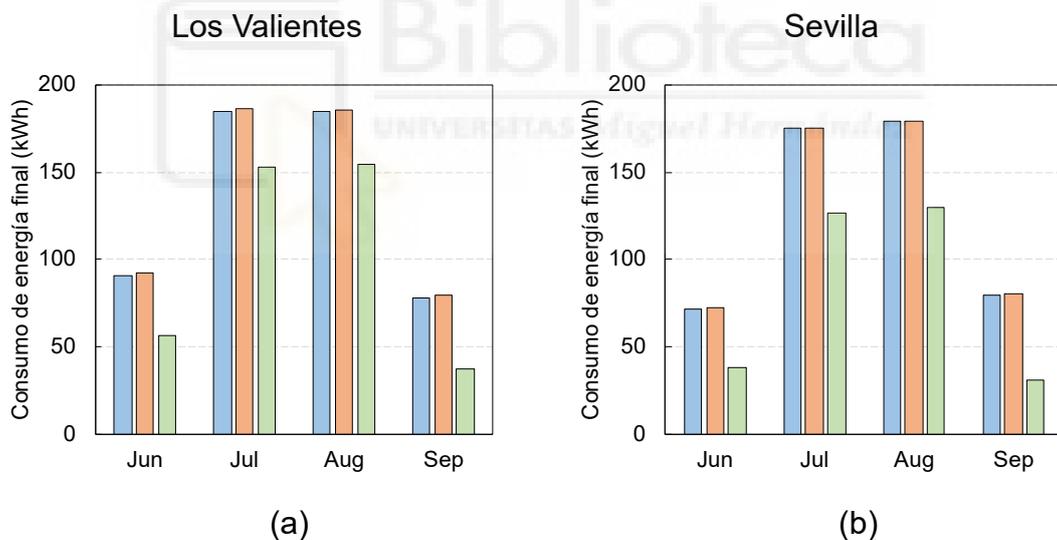
Fig. 18. Consumo de energía asociado a ventilación. (a) Los Valientes, (b) Sevilla y (c) Madrid.

3.4 Condiciones controladas

Bajo condiciones *freerunning* la ventilación nocturna por medios naturales fue favorable en términos de confort y consumo de energía, sin embargo, no se aseguró una temperatura agradable el 100% de las horas, provocando que, en caso de estar disponible, los usuarios empleasen un sistema de refrigeración.

3.4.1 Consumo de energía

En esta sección se explora, en términos de consumo de energía, que sistema de ventilación durante las noches (mecánico o natural) fue favorable bajo condiciones controladas, esto es, en presencia de un sistema de refrigeración que asegurase el 100% de las horas de confort. Las condiciones de confort fueron fijadas en 26°C de temperatura seca interior. En las Fig. 19a, 19b y 19c se muestran estos resultados para las tres ciudades.



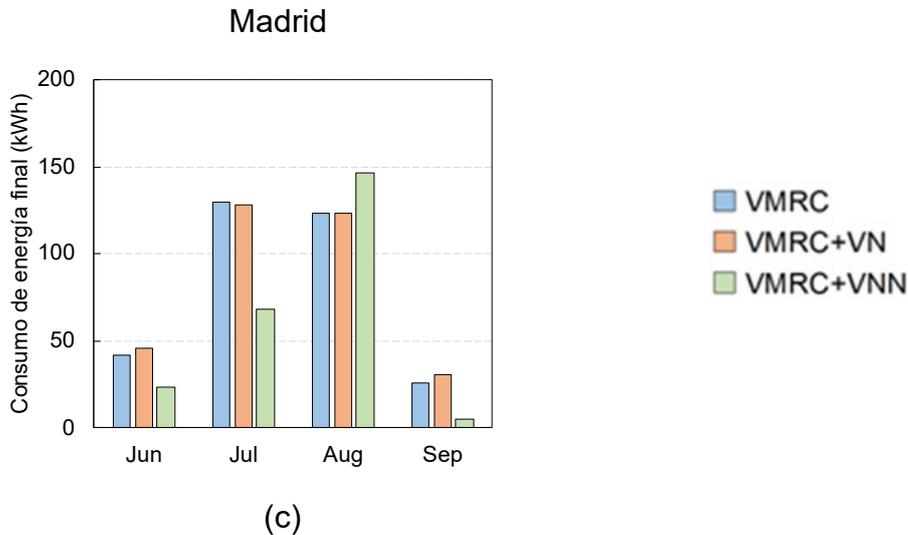


Fig. 19. Consumo de energía final. (a) Los Valientes, (b) Sevilla y (c) Madrid.

En esta situación, con equipo de refrigeración, la única estrategia que presenta ahorros de en el consumo de energía respecto al escenario base (VMRC) es ventilar de manera natural por las noches (VMRC+VNN) lo que ofrece tanto ahorro en el consumo de energía en refrigeración como en el consumo de energía de ventiladores. La estrategia de ventilar durante las noches mediante sistema mecánico, pero aumentando los caudales de ventilación (VMRC+VN), a pesar de presentar ahorros en la demanda de refrigeración, no compensan el aumento en el consumo de energía asociado a la ventilación.

En el cómputo anual, al pasar de VMRC a VMRC+VNN, en condiciones controladas de temperatura interior, presentó en Sevilla un 36% a menos de consumo en energía final, seguido de Los Valientes con un 26% y Madrid con un 24%.

4 DISCUSIÓN

Los resultados, a pesar de estar obtenidos para un vivienda con características y sistemas singulares en comparación con una vivienda tipo del parque edificado español, pueden ser extrapolados a un amplio contexto. En España, las necesidades de ventilación de una vivienda unifamiliar se encuentran en torno a 0,4 ren/h, valores cercanos a los de La Casa de la Tierra (0,31 ren/h). En un contexto más global, ese ratio es coherente con el esperado en diversas regiones de Europa (0,19-0,36 ren/h) [34]. Tanto esas regiones al norte de Europa, como al norte de España, presentan mayores potenciales de enfriamiento nocturno [28], [46].

Además, una vivienda presenta un nivel de carga interna bajo siendo la demanda de climatización fuertemente ligada al clima en donde se encuentra. Esto último, junto a que los edificios de nueva construcción son cada vez más estancos y están mejor aislados, provoca que la ventilación presente una intensidad mayor en la demanda de energía en climatización. De este modo, a pesar de haber realizado el estudio en una vivienda específica, los resultados obtenidos aportan conclusiones relevantes para viviendas unifamiliares en España y Europa.

Un sistema mecánico de ventilación ya presenta cierto aprovechamiento de la ventilación nocturna, puesto que siempre está en funcionamiento y por ende durante las noches va a ventilar con un aire más fresco.

Para aprovechar un mayor potencial de enfriamiento en regiones donde se reportan incapacidad de mantener el confort en verano (esto es, Murcia, Sevilla y Madrid), se exploraron dos estrategias adicionales:

- a) Aumentar el caudal de ventilación mecánica durante las noches (VMRC+VN).
- b) Pasar a ventilación natural durante las noches (VMRC+VNN).

Estas estrategias fueron exploradas bajo dos condiciones de temperatura interior: *freerunning* y condiciones controladas.

4.1 Edificios *freerunning*

Un edificio *freerunning* representa al grupo de viviendas que no disponen de sistema de refrigeración, o al menos no lo emplean.

En las tres ciudades, la mejor estrategia de ventilación, en bajo condiciones *freerunning* fue pasar de ventilación mecánica a ventilación natural durante las noches (VMRC+VNN), lo que permitió aprovechar en torno a 5,4 veces más de enfriamiento. Esto a su vez permitió reducir la intensidad de calor interior entre 48-52%, 59-63% y 54-59%, según el modelo de confort empleado, para Los Valientes, Sevilla y Madrid respectivamente.

La superioridad de la ventilación nocturna natural frente a la ventilación mecánica se debió fundamentalmente a la mayor tasa de ventilación, la cual se presentó en torno a 3 ren/h para las tres ciudades. En La Casa de la Tierra, estos ratios elevados fueron debidos a la presencia de elementos como: la torre de viento, gran superficie de ventanas y las chimeneas solares que, a pesar de no ofrecer todo su potencial en ausencia de sol, son una conexión más vivienda-exterior (*airflow path*).

Un ratio de ventilación natural similar en viviendas unifamiliares, en ausencia de elementos extras, es viable mediante la ventilación cruzada, esto es, ventanas abiertas en dos o más fachadas opuestas [23]. No existen cifras oficiales sobre la cantidad de viviendas que permiten adoptar esta estrategia, sin embargo, del 31,8% de las viviendas unifamiliares, un 44% de estas viviendas son aisladas [35], lo que en principio dispondrían de fachadas opuestas con posibilidad de ventilación.

En viviendas unifamiliares sin posibilidad de realizar ventilación cruzada (entorno al 56% restantes del parque edificado de viviendas unifamiliares), aumentar el caudal de ventilación durante las noches, permitió aprovechar en torno a 1,5 veces más de potencial climático de enfriamiento y redujo, en menor medida, la intensidad de calentamiento interior entre 10-11% en Madrid, 7-8% en Sevilla y 5-6% en Los Valientes empleando la estrategia VMRC+VN.

En términos de confort, ambos modelos, esto es, el modelo de temperatura fija a 26°C y el modelo de confort adaptativo, arrojaron resultados similares en términos de intensidad de calentamiento para todas las estrategias, siendo el modelo de confort adaptativo más laxo presentando menor intensidad de calentamiento interior. Aun así, no se aseguraron el 100% de las horas en confort.

4.2 Edificios con condiciones controladas de temperatura interior

Este grupo de edificios representa a aquellas viviendas que sí disponen y emplean equipos de refrigeración.

En esta situación, el confort fue asegurado, estando la decisión de que estrategia de ventilación se postulaba como óptima en función del consumo de energía final debido a la refrigeración y a la ventilación.

Para las tres ciudades, la ventilación nocturna por medios naturales también fue la mejor estrategia, reduciendo el consumo de energía en un 36% para Sevilla, 26% para Los Valientes y en un 24% para Madrid, resultados coherentes con los presentados en la bibliografía [11], [30], [31].

Por el contrario, la estrategia de aumentar el caudal de ventilación mecánico durante la noche no ofreció ahorros en el consumo de energía final, al verse aumentando el consumo de energía asociado a la ventilación. Con lo cual, del 56% de parque edificado de viviendas que en principio no podrían emplear ventilación cruzada, aquellas que se encuentren en regiones muy calurosas y necesiten emplear equipos de refrigeración, no obtendrían beneficios, en términos de ahorro de energía, aumentando los caudales de ventilación nocturna por medios mecánicos, debido al bajo potencial de enfriamiento climático. Esto refuerza el hecho de que el consumo de energía es el principal obstáculo a la hora de aprovechar el potencial de enfriamiento nocturno mediante sistemas de ventilación mecánico.

4.3 Limitaciones del estudio

En este trabajo no se tuvo en cuenta la entrada de aire no controlado, esto es, las infiltraciones de aire. En edificios pocos estancos, o sin previa actuación en la permeabilidad de la envolvente, la entrada de aire no controlado tendría efectos adversos. Durante las noches, las infiltraciones de aire aportarían algo más de enfriamiento, sin embargo, durante el día, las infiltraciones de aire estarían a la temperatura exterior, siendo entonces negativo su impacto.

J. Feijó-Muñoz et al. [47] en su trabajo caracterizaron el nivel de estanqueidad en viviendas en base a la cantidad de renovaciones hora de aire a una presión de 50 Pa (n_{50}). Estos autores fijan como valor medio para viviendas unifamiliares de clima mediterráneo 7,3 ren/h. Este valor puede ser convertido a condiciones normales, mediante una conocida '*rule of thumb*' dividiendo la tasa entre 20 [48], lo que aplicado a una vivienda tipo del parque edificado, representa en torno a 110 m³/h, es decir, prácticamente la tasa de ventilación mínima requerida por el CTE DB-HS/3 estaría entrando sin pasar por el recuperador de calor.

5 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos del estudio de estrategias de ventilación nocturna, realizados en La Casa de la Tierra contribuyen significativamente al conocimiento de la materia.

En el contexto actual de descarbonización de edificios, los sistemas de ventilación mecánicos con recuperación de calor, además de asegurar la CAI, aportan importantes ahorros durante el invierno. En verano, estos sistemas son útiles durante las horas del día, evitando así ventilar con aire a una temperatura elevada. Luego, durante las noches, según el tipo de edificio es más favorable un escenario de ventilación natural o mecánica.

De todo el parque edificado español, las viviendas unifamiliares aisladas son las que permitirían emplear ventilación cruzada, lo que permite tasas elevadas de ventilación natural asegurando CAI y aprovechando el potencial de enfriamiento nocturno (en torno a 5,4 veces más). Esto aporta confort en ausencia de un sistema de refrigeración (entre 48-63% a más) y ahorros energéticos con un sistema de refrigeración (entre 24-36%).

El resto de las viviendas unifamiliares que no puedan ventilar con suficiente intensidad mediante medios naturales, deberán mantener la ventilación mediante medios mecánicos para mantener la CAI. Siendo posible emplear técnicas de enfriamiento nocturno únicamente aumentando los caudales de ventilación. Esto, en ausencia de equipos de refrigeración, permite mejorar el confort térmico entre un 5-11% pero con el consecuente incremento del consumo de energía en refrigeración, entorno a un 40%. Esta estrategia en combinación con un equipo convencional de refrigeración no aporta ahorros en el consumo de energía final.

5.1 Futuras líneas de trabajo

En este trabajo se demostró la ventaja de emplear ventilación híbrida, esto es, mecánica y natural para mantener CAI y obtener ahorros energéticos. Para ello se partió como base la ya existencia de un sistema de ventilación mecánico, el cual, de hecho, es necesario en viviendas de nueva construcción.

Futuros trabajos y líneas de investigación podrían ir orientados hacia factores económicos, tanto de inversión inicial, esto es, el coste de instalar un sistema de ventilación mecánico en una vivienda ya existente y su correspondiente periodo de retorno, así como explorar otras vías como tarifas eléctricas nocturnas más asequibles. Autores como Bakhtiari H. et al [49], señalan que la aplicación de sistemas de ventilación nocturna por medios mecánicos se justifica económicamente con precios nocturnos y diurnos diferentes.



6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eurostat, «Statistics Explained». Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php>
- [2] The Spanish Government's Institute for the Diversification and Saving of Energy (IDAE), «Consumo por usos del sector residencial». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://informesweb.idae.es/consumo-usos-residencial/informe.php>
- [3] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, «National strategy against energy poverty», Estrategia de Pobreza Energética. Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/estrategia-pobreza-energetica.html>
- [4] Instituto Nacional de Estadística (INE), «Encuesta de Condiciones de Vida (ECV). Módulo sobre condiciones de la vivienda y eficiencia energética. Año 2023.», *Notas de prensa*, 2023. Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.es/dynngs/Prensa/m1ECV2023.htm>
- [5] A. Arriazu-Ramos, M. Bes-Rastrollo, A. Sánchez-Ostiz Gutiérrez, y A. Monge-Barrio, «Building parameters that influence overheating of apartment buildings in a temperate climate in Southern Europe», *Build Environ*, vol. 228, p. 109899, ene. 2023, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109899.
- [6] C. Sánchez-Guevara Sánchez, A. Mavrogianni, y F. J. Neila González, «On the minimal thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty», *Build Environ*, vol. 114, pp. 344-356, mar. 2017, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2016.12.029.
- [7] C. Sánchez-Guevara Sánchez, F. J. Neila González, y A. Hernández Aja, «Energy poverty methodology based on minimal thermal habitability

- conditions for low income housing in Spain», *Energy Build*, vol. 169, pp. 127-140, jun. 2018, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2018.03.038.
- [8] R. J. De Dear y G. S. Brager, «Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55», *Energy Build*, vol. 34, n.º 6, pp. 549-561, jul. 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00005-1.
- [9] D. Bienvenido-Huertas, D. Sánchez-García, y C. Rubio-Bellido, «Adaptive setpoint temperatures to reduce the risk of energy poverty? A local case study in Seville», *Energy Build*, vol. 231, p. 110571, ene. 2021, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2020.110571.
- [10] A. Tejero-González, M. Andrés-Chicote, P. García-Ibáñez, E. Velasco-Gómez, y F. J. Rey-Martínez, «Assessing the applicability of passive cooling and heating techniques through climate factors: An overview», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 727-742, nov. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.06.077.
- [11] P. Blondeau, M. Spérandio, y F. Allard, «Night ventilation for building cooling in summer», *Solar Energy*, vol. 61, n.º 5, pp. 327-335, nov. 1997, doi: 10.1016/S0038-092X(97)00076-5.
- [12] R. Guo, Y. Hu, M. Liu, y P. Heiselberg, «Influence of design parameters on the night ventilation performance in office buildings based on sensitivity analysis», *Sustain Cities Soc*, vol. 50, p. 101661, oct. 2019, doi: 10.1016/J.SCS.2019.101661.
- [13] E. Solgi, Z. Hamedani, R. Fernando, H. Skates, y N. E. Orji, «A literature review of night ventilation strategies in buildings», *Energy Build*, vol. 173, pp. 337-352, ago. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.05.052.
- [14] E. Shaviv, A. Yezioro, y I. G. Capeluto, «Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy», *Renew Energy*, vol. 24, n.º 3-4, pp. 445-452, nov. 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(01)00027-1.

- [15] A. Gagliano, F. Patania, F. Nocera, y C. Signorello, «Assessment of the dynamic thermal performance of massive buildings», *Energy Build*, vol. 72, pp. 361-370, abr. 2014, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.12.060.
- [16] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR) y Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), *Guía técnica: Procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-procedimientos-y-aspectos-de-la-simulacion-de-instalaciones-termicas-en>
- [17] K. A. Antonopoulos y E. Koronaki, «Apparent and effective thermal capacitance of buildings», *Energy*, vol. 23, n.º 3, pp. 183-192, mar. 1998, doi: 10.1016/S0360-5442(97)00088-1.
- [18] K. A. Antonopoulos y E. P. Koronaki, «Thermal parameter components of building envelope», *Appl Therm Eng*, vol. 20, n.º 13, pp. 1193-1211, sep. 2000, doi: 10.1016/S1359-4311(99)00090-3.
- [19] K. A. Antonopoulos, F. Gioti, y C. Tzivanidis, «A transient model for the energy analysis of indoor spaces», *Appl Energy*, vol. 87, n.º 10, pp. 3084-3091, oct. 2010, doi: 10.1016/J.APENERGY.2010.04.002.
- [20] M. Li *et al.*, «Cooling demand reduction with nighttime natural ventilation to cool internal thermal mass under harmonic design-day weather conditions», *Appl Energy*, vol. 379, p. 124947, feb. 2025, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.124947.
- [21] S. García-Ortega y P. Linares-Alemparte, «Calidad del aire interior en viviendas ventiladas de forma natural en España», *Informes de la Construcción*, vol. 75, n.º 572, pp. e519-e519, oct. 2023, doi: 10.3989/IC.6447.
- [22] H. K. Abdullah y H. Z. Alibaba, «Window Design of Naturally Ventilated Offices in the Mediterranean Climate in Terms of CO₂ and Thermal Comfort

- Performance», *Sustainability*, vol. 12, n.º 2, p. 473, ene. 2020, doi: 10.3390/su12020473.
- [23] T. Ahmed, P. Kumar, y L. Mottet, «Natural ventilation in warm climates: The challenges of thermal comfort, heatwave resilience and indoor air quality», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, p. 110669, mar. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110669.
- [24] C. Schreck, S. Rouchier, A. Fouquier, F. Machefert, y E. Wurtz, «In situ air change rate estimation from metabolic CO₂ measurement. Summer experimental campaign in a single-family test house», *Build Environ*, vol. 259, p. 111646, jul. 2024, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2024.111646.
- [25] G. A. Faggianelli, A. Brun, E. Wurtz, y M. Muselli, «Natural cross ventilation in buildings on Mediterranean coastal zones», *Energy Build*, vol. 77, pp. 206-218, jul. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.042.
- [26] J. Hou *et al.*, «Air change rates at night in northeast Chinese homes», *Build Environ*, vol. 132, pp. 273-281, mar. 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.030.
- [27] Giacomo Chiesa, Maria Kolokotroni, y Per Heiselberg, *Innovations in Ventilative Cooling*, 1.^a ed. en PoliTO Springer Series. Cham: Springer Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-72385-9.
- [28] N. Artmann, H. Manz, y P. Heiselberg, «Climatic potential for passive cooling of buildings by night-time ventilation in Europe», *Appl Energy*, vol. 84, n.º 2, pp. 187-201, feb. 2007, doi: 10.1016/J.APENERGY.2006.05.004.
- [29] H. Campaniço, P. Hollmuller, y P. M. M. Soares, «Assessing energy savings in cooling demand of buildings using passive cooling systems based on ventilation», *Appl Energy*, vol. 134, pp. 426-438, dic. 2014, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.08.053.
- [30] M. Santamouris, A. Sfakianaki, y K. Pavlou, «On the efficiency of night ventilation techniques applied to residential buildings», *Energy Build*, vol. 42, n.º 8, pp. 1309-1313, ago. 2010, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2010.02.024.

- [31] M. Darmanis, M. Çakan, K. P. Moustiris, K. A. Kavadias, y K. S. P. Nikas, «Utilisation of Mass and Night Ventilation in Decreasing Cooling Load Demand», *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 7826, vol. 12, n.º 18, p. 7826, sep. 2020, doi: 10.3390/SU12187826.
- [32] H. Xiang y J. Li, «Impact of Night Ventilation on Indoor Thermal Environment of Residential Buildings under the Dual Carbon Target: A Case Study of Xi'an», *Buildings* 2024, Vol. 14, Page 2459, vol. 14, n.º 8, p. 2459, ago. 2024, doi: 10.3390/BUILDINGS14082459.
- [33] Boletín Oficial del Estado (BOE), «Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo», Spain, RD 314/2006, dic. 2019. Accedido: 5 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/12/20/732>
- [34] D. Zukowska *et al.*, «Ventilation in low energy residences – a survey on code requirements, implementation barriers and operational challenges from seven European countries», *International Journal of Ventilation*, vol. 20, n.º 2, pp. 83-102, abr. 2021, doi: 10.1080/14733315.2020.1732056.
- [35] Ministerio de transportes y movilidad sostenible, «Actualización 2020 de la ERESEE», LA ESTRATEGIA A LARGO PLAZO PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA EN EL SECTOR DE LA EDIFICACIÓN EN ESPAÑA. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.transportes.gob.es/el-ministerio/planes-estrategicos/estrategia-a-largo-plazo-para-la-rehabilitacion-energetica-en-el-sector-de-la-edificacion-en-espana/eresse2020>
- [36] The Spanish Government's Institute for the Diversification and Saving of Energy (IDAE), «Análisis del consumo energético del sector residencial en España», n.º PROYECTO SECH-SPAHOUSEC, jul. 2011.
- [37] Instituto Nacional de Estadística (INE), «Censos de Población y Viviendas 2021. Resultados sobre Hogares y Viviendas», *Notas de prensa*, n.º

- Censos de Población y Viviendas, jun. 2023, Accedido: 5 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ine.es/>
- [38] Antonio Abellán, «La Casa de la Tierra», Antonio Abellán Arquitectura. Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.antonioabellanarquitectura.com/portfolio/casa-de-la-tierra/>
- [39] Consorcio Termoarcilla, «La Termoarcilla». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.termoarcilla.com/>
- [40] A. Soto, P. J. Martínez B., P. Martínez M., y J. A. Tudela, «Simulation and experimental study of residential building with north side wind tower assisted by solar chimneys», *Journal of Building Engineering*, vol. 43, p. 102562, nov. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102562.
- [41] A. Soto, P. Martínez M., V. M. Soto F., y P. J. Martínez B., «Analysis of the Performance of a Passive Draught Evaporative Cooling System Driven by Solar Chimneys in a Residential Building by Using an Experimentally Validated TRNSYS Model», *Energies 2021, Vol. 14, Page 3486*, vol. 14, n.º 12, p. 3486, jun. 2021, doi: 10.3390/EN14123486.
- [42] S. A. Klein y Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, «TRNSYS: A Transient System Simulation Program, Version 18». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [43] S. A. Klein, «EES - Engineering Equation Solver, Version V10.561-3D, 2018», F-Chart Software. Accedido: 29 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://fchartsoftware.com>
- [44] W. S. Dols y B. J. Polidoro, «CONTAM User Guide and Program Documentation Version 3.4», Gaithersburg, MD, ago. 2020. doi: 10.6028/NIST.TN.1887r1.
- [45] L. K. Lawrie y C. Drury B, «Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)». [En línea]. Disponible en: <https://climate.onebuilding.org/>

- [46] H. Campaniço, P. M. M. Soares, P. Holmuller, y R. M. Cardoso, «Climatic cooling potential and building cooling demand savings: High resolution spatiotemporal analysis of direct ventilation and evaporative cooling for the Iberian Peninsula», *Renew Energy*, vol. 85, pp. 766-776, ene. 2016, doi: 10.1016/J.RENENE.2015.07.038.
- [47] J. Feijó-Muñoz *et al.*, «Energy impact of the air infiltration in residential buildings in the Mediterranean area of Spain and the Canary islands», *Energy Build*, pp. 226-238, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.023.
- [48] B. Jones, A. Persily, y M. Sherman, «The Origin and Application of Leakage-Infiltration Ratios», en *ASHRAE AIVC IAQ 2016. Defining Indoor Air Quality: Policy, Standards and Best Practices*, 2016. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308333882_The_Origin_and_Application_of_Leakage-Infiltration_Ratios
- [49] H. Bakhtiari, S. Sayadi, J. Akander, A. Hayati, y M. Cehlin, «A framework for assessing the current and future capability of mechanical night ventilation in the context of climate change», *Energy Reports*, vol. 12, pp. 4909-4925, dic. 2024, doi: 10.1016/J.EGYR.2024.10.028.