

## **SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL EN SALTA CAPITAL**

**F. Rizzarello, M. Hongn y M. Gea**

INENCO – (UNSa – CONICET) - Avda. Bolivia 5150, A4400FVY Salta, Argentina  
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389  
Email: [fabio.rizzarello@gmail.com](mailto:fabio.rizzarello@gmail.com)

*Recibido: 05-08-18; Aceptado: 25-10-18*

**RESUMEN.-** El trabajo ofrece una visión detallada de los factores que afectan la vida útil de las viviendas en términos de demanda energética y confort térmico. A tal propósito se analiza una vivienda social tipo entregada por el Instituto Provincial de Vivienda en la ciudad de Salta y se detectan las problemáticas que afectan su comportamiento térmico con vistas a encontrar soluciones económicamente sostenibles para reducir el gasto energético. El análisis se realizó a través del software SIMEDIF, que analiza el comportamiento dinámico del edificio y de sus componentes permitiendo estimar el nivel de confort esperado. La aislación exterior resulta ser la estrategia más eficiente, aunque se destaque la importancia de otros factores como la tecnología constructiva, las infiltraciones, la orientación y el color.

**Palabras claves:** Vivienda social, ahorro energético, confort térmico, simulación computacional.

## **COMPUTACIONAL SIMULATION OF THERMAL BEHAVIOR OF SOCIAL HOUSING IN SALTA CAPITAL**

**ABSTRACT.-** The study offers a detailed view of the factors affecting the useful life of houses in terms of energy demand and thermal comfort. In this regard, the social housing model of the Instituto Provincial de Vivienda in Salta is analyzed by identifying thermal behavioral problems in order to find an economically and sustainable solution to reduce energy use. This was achieved through the software SIMEDIF, which analyses the dynamic behavior of the building and its components allowing to estimate the level of comfort expected. External insulation is shown as the most efficient strategy, although building technology, infiltrations, orientation and color are also significant.

**Key words:** Social housing, energy efficiency, thermal comfort, computational simulation.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El sector de la construcción, edificios residenciales y sector terciario, es el más grande consumidor de energía en Argentina, responsable alrededor del 35% del consumo de energía final (Ministerio de Energía y Minería, 2017). Ese sector tiene un importante potencial en la reducción del uso de energía y puede llevar a muchos beneficios: no solo reducir la demanda energética, disminuyendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y bajando los costos de importación, sino también promover la competitividad de la economía nacional y crear una mentalidad de respeto del medio ambiente.

Del potencial de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de las ventajas asociadas, tanto de carácter económico como ambiental, se habla hace décadas. Sin embargo, todavía falta una estrategia precisa y suficientemente respaldada por instrumentos financieros capaz de promover la difusión en gran medida de casos ejemplares y reproducibles en términos de eficiencia energética. Muchos son los textos presentes en

la bibliografía que tratan la reducción de energía relacionada al sector de la construcción: algunos ofrecen una interpretación de las normativas (ENEA, 2010), otros presentan una recolección descriptiva de casos ejemplares (Asdrubali et al., 2013). Muy pocos, por lo contrario, son los textos que tratan el tema de la simulación energética dinámica aplicada al entorno construido como pre-requisito esencial para el diseño de edificios a bajo consumo. La simulación computacional es una importante herramienta para comprender el comportamiento térmico de los edificios a lo largo de todo el año permitiendo la comparación de diferentes orientaciones, materiales y tecnologías constructivas a fin de encontrar la solución adecuada en cada contexto climático.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el comportamiento térmico de una vivienda social entregada por el IPV (Instituto Provincial de la Vivienda) mediante simulación computacional, analizando las estrategias más eficientes acordes al marco económico-constructivo en el que son construidas.

## 2. MARCO NORMATIVO

La norma IRAM 11603 propone una clasificación bioambiental de la República Argentina, diferenciando seis zonas climáticas. Propone asimismo una serie de recomendaciones generales sobre el diseño de los edificios analizando las características de cada contexto climático. La ciudad de Salta se encuentra en la zona climática IIIa, correspondiente a la zona templada cálida caracterizada por grandes amplitudes térmicas. En esa categoría, la norma aconseja el uso de elementos y recursos que tiendan al mejoramiento de la inercia térmica de la envolvente, y también que las aberturas tengan sistemas de protección a la radiación solar. En lo posible, desaconseja asimismo la orientación Oeste. Como veremos más adelante, la vivienda social entregada por el IPV objeto de este trabajo no respeta ninguna de esas recomendaciones. La norma IRAM 11604 establece valores de pérdidas volumétricas máximas admisibles para cada zona climática. Ésta, de aplicación obligatoria solamente en el caso de vivienda de interés social con financiación del Gobierno Nacional (es eso el caso del IPV), sugiere un nivel de aislamiento térmico relacionado con la demanda de combustible para calefacción. Para permitir el logro de esos valores, la norma IRAM 11605 establece valores de transmitancia térmica máxima admisible para paredes y techos. Establece asimismo tres niveles de calidad: A 'óptimo', B 'regular', y C 'mínimo'. Solamente el nivel C es obligatorio en vivienda de interés social, respondiendo al criterio de evitar condensación superficial en invierno. Sin embargo, el nivel C de aislamiento no asegura economía en el uso racional de energía para el acondicionamiento térmico de edificios (Evans, 2004).

Así como la conductividad térmica brinda información en términos de aislación térmica, la capacidad térmica volumétrica es otra importante propiedad que permite medir la capacidad de un material para acumular energía térmica, es decir su inercia térmica. Esta propiedad resulta fundamental porque permite retrasar el ingreso de energía térmica hacia el ambiente construido disminuyendo, además, la amplitud térmica adentro del edificio. Sería entonces necesario sugerir valores de transmitancia térmica periódica para paredes y techos (definida por la norma ISO 13786) relacionados a cada zona climática en función de las temperaturas y de la intensidad de radiación solar, a fin de mitigar la acción del clima y mejorar el nivel de confort interior. Sin embargo, estudios recientes (Di Perna et al., 2008) han demostrado que el solo análisis de la transmitancia térmica periódica, durante el periodo estival y en el caso de edificios con elevadas cargas térmicas, no es un parámetro suficiente para caracterizar adecuadamente el comportamiento de la envolvente opaca. Para obtener un buen rendimiento estival, en efecto, es necesario comprobar también la capacidad térmica interna, la cual no debería adoptar valores inferiores a  $90 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ .

El confort ambiental puede describirse como el estado físico y mental en el cual el hombre expresa satisfacción (bienestar) con el medio ambiente circundante. En términos de ambiente construido se puede referir precisamente al confort termohigrométrico, luminoso y acústico. La evaluación del confort hace generalmente referencia a estudios estadísticos que observan el grado de satisfacción para grupos de personas en ambientes con condiciones climáticas y grados de arropamiento diferentes. Uno de los métodos más conocidos fue realizado por Fanger (1982), que a partir del 1970 avanzó estudios donde la sensación de confort se relaciona con el porcentaje de personas insatisfechas. Este enfoque se conoce

como "static method", o sea método estático, y representa la base de la norma ISO 7730. La particularidad de esta norma es que, a diferencia de la certificación energética, no analiza sólo la temperatura de bulbo seco del aire interior sino la temperatura operativa, obtenida como la media aritmética entre la temperatura seca del aire y la temperatura radiante media de los cerramientos de cada local que compone el edificio. Mejor dicho, según la norma EN 12792, la temperatura operativa es la temperatura teórica uniforme de un recinto en el que un ocupante intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación y convección que en el recinto real no uniforme. El uso de este parámetro es fundamental porque permite detectar eventuales condiciones de discomfort causadas por ejemplo por una asimetría radiante en correspondencia de superficies acristaladas o de un techo radiante. Por estos motivos, el cálculo de la demanda de energía de un edificio no es suficiente para determinar la calidad global de la obra: los sistemas de certificación energética, además de informar sobre el consumo energético, deberían indicar también el nivel de confort exigido.

## 3. LA VIVIENDA SOCIAL TIPO

El IPV tiene como fin el construir viviendas (o mejorarlas) a través de terceros y/o financiarlas, con el fin de reducir en cada provincia argentina el déficit habitacional de la población con recursos insuficientes e intervenir en nuevos barrios o grupos de viviendas que lleven a cabo otras entidades atendiendo a un desarrollo urbano equilibrado. En Salta Capital son muchos los proyectos activos a lo largo de toda la ciudad: algunos barrios ya están terminados y habitados mientras otros todavía están en construcción. Dentro de estos, el presente trabajo analiza una vivienda social tipo entregada por el IPV en el barrio Ex Pereyra Rozas, en el norte de la ciudad. La urbanización del barrio prevé la edificación de 2320 viviendas, con el 44% a cargo del IPV. La tipología prevalente es el dúplex, con construcciones unifamiliar y bifamiliar. La tecnología constructiva resulta igual para todas las viviendas: piso y techo de losa de 25 cm, paredes externas compuestas por ladrillo hueco N18 revocadas ambos lados y particiones internas compuestas por ladrillo hueco N8 también revocadas ambos lados. La vivienda objeto del trabajo es un dúplex unifamiliar de  $47 \text{ m}^2$ , como muestra la figura 1. Se compone de dos pisos: en la planta baja se encuentra el comedor mientras en el primer piso las dos habitaciones y el baño, la figura 2 muestra la vista en planta del edificio. Se creó una zona térmica para cada local a fin de tener en cuenta las diferentes orientaciones.

### 3.1 Comprobación de las normativas.

Como se ha explicado anteriormente, en el caso de vivienda de interés social con financiación del Gobierno Nacional la norma IRAM 11604 establece valores de pérdidas volumétricas máximas admisibles en función del volumen calefaccionado y de los grados días de calefacción. El volumen del edificio en estudio es igual a  $126 \text{ m}^3$  por lo que la pérdida térmica volumétrica máxima debería estar comprendida entre  $1860$  y  $2213 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$ . No obstante, al determinar las pérdidas volumétricas efectivas del edificio, analizando la geometría y las propiedades de los elementos que lo constituyen, se encuentra un valor igual a  $4680 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$ , muy fuera del rango normativo. Sin embargo, el análisis de las pérdidas térmicas es una herramienta útil para entender cuáles son los factores que más afectan el consumo del edificio.



Fig. 1: La vivienda social estudiada en fase de construcción (a la izquierda) y su esquema en el software Revit® (a la derecha).

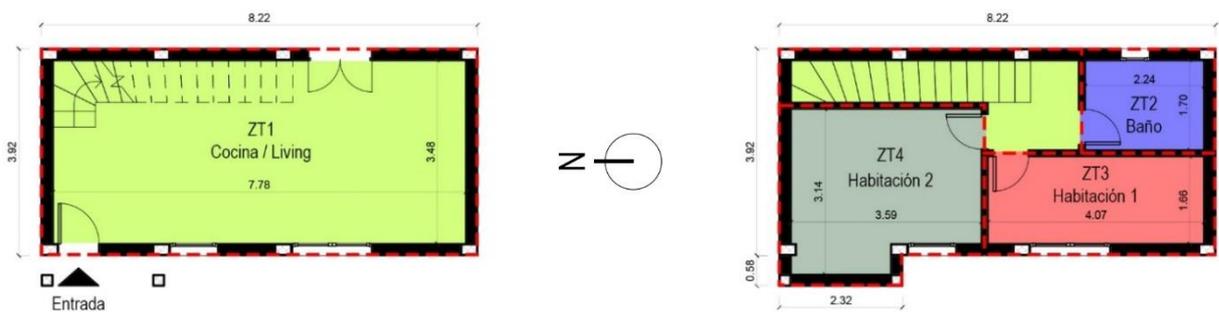


Fig. 2: Vista en planta de la vivienda e identificación de las zonas térmicas, planta baja (a la izquierda) y primer piso (a la derecha).

Como muestra la figura 3, las paredes exteriores y el techo constituyen casi el 80% de todas las pérdidas, mientras los otros factores presentan porcentajes mucho más bajos. Estos datos se explican fácilmente considerando la falta total de aislación tanto en los muros exteriores como en la cubierta.

En este sentido, la norma IRAM 11605 establece valores de transmitancia térmica máxima admisible para paredes y techos, en función de la temperatura exterior de diseño de la localidad en la que se encuentra emplazada la vivienda. De los tres niveles individuados, solamente el nivel C es obligatorio para viviendas de interés social. A continuación se muestran los tres niveles para la ciudad de Salta Capital, caracterizada por una temperatura de diseño mínima igual a  $-4,7^{\circ}\text{C}$ .

Tabla 1: Valores de transmitancia térmica máxima admisible  $K_{MAX,ADM}$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] para condición de invierno. (Tabla 1 – Norma IRAM 11605:1996)

Nivel A		Nivel B		Nivel C	
Muros	Techos	Muros	Techos	Muros	Techos
0.31	0.27	0.83	0.69	1.45	1.00

El análisis de las propiedades termofísicas de la envolvente permite comprobar los límites normativos y permite conocer también las propiedades termodinámicas, fundamentales en la relación edificio-ambiente.

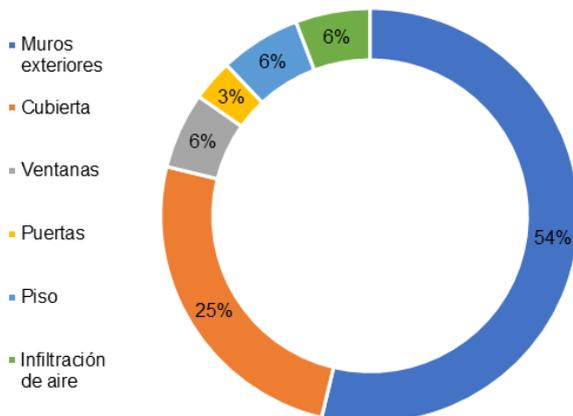


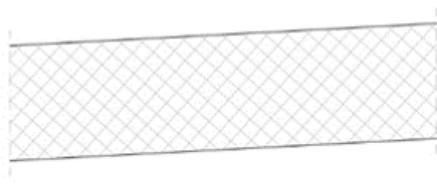
Fig. 3: Porcentaje de las pérdidas térmicas del edificio.

Tabla 2: Composición de las paredes exteriores y sus propiedades.

Capa	k [ $\text{W}/\text{mK}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	$C_p$ [ $\text{J}/\text{kgK}$ ]	Espesor [m]
Revoque	1.16	1009	800	0.025
Ladrillo hueco N18	0.47	636	1009	0.18
Revoque	0.93	1009	800	0.025

Transmitancia térmica (K) =  $1.663 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$   
 Transmitancia térmica periódica ( $Y_{ie}$ ) =  $1.252 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$   
 Capacidad térmica interna ( $C_i$ ) =  $51.6 \text{ kJ}/\text{m}^2\text{K}$

Tabla 3: Composición del techo y sus propiedades.



Transmitancia térmica (K) = **2.813 W/m<sup>2</sup>K**  
 Transmitancia térmica periódica (Y<sub>ie</sub>) = **1.344 W/m<sup>2</sup>K**  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = **92.9 kJ/m<sup>2</sup>K**

Capa	k [W/mK]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>p</sub> [J/kgK]	Espesor [m]
Hormigón	1.16	2000	837	0.25

Analizando la transmitancia térmica de la envolvente se observa que sus valores no alcanzan el nivel recomendando por la norma. En particular, las paredes superan los límites del 15% mientras que los valores del techo son casi tres veces más grandes. Así, resulta interesante introducir una capa de aislación, tanto a las paredes como al techo, y analizar cómo esta propuesta puede reducir el consumo energético y mejorar el nivel de confort.

### 3.2 El consumo energético.

Estudiar el consumo energético a lo largo de todo el año ayuda a entender en cuales meses, y entonces bajo qué condiciones climáticas, el edificio necesita energía para alcanzar temperaturas de confort. Para el presente trabajo se decidió establecer los siguientes periodos estacionales:

Tabla 4: Periodos estacionales de consumo.

Periodo de calefacción		Periodo de refrigeración	
Inicio	Fin	Inicio	Fin
15 de abril	8 de octubre	14 de noviembre	4 de marzo

En particular, la calefacción se considera activa durante la noche (entre las 20:00 y las 8:00) mientras la refrigeración durante el día (entre las 8:00 y las 20:00). Para tener en cuenta la presencia de los usuarios que afectan las ganancias internas de calor se consideran dos personas durmiendo en la habitación doble y una en la simple (para el periodo nocturno) y una persona realizando actividades domésticas durante el día en el living.

Utilizando el archivo climático (en formato TMY3 - *typical meteorological year*) como entrada en la simulación se puede graficar el consumo energético para cada mes del año y par cada zona térmica. Como se observa en la figura 4, la ZT2 (el baño) presenta el peor comportamiento en la época invernal, debido a una pequeña masa de acumulación. Por otro lado, en los meses cálidos la ZT4 (la habitación doble) resulta ser la zona menos eficiente por la ganancia solar del techo y de las paredes norte y oeste. Los consumos menores se observan en marzo y en octubre, en coherencia con los periodos de consumo definidos en tabla 4.

Es importante destacar que la demanda de energía en el periodo de calefacción pesa mucho más que la demanda del periodo de refrigeración. En particular, en invierno se

necesitan 169 kWh/m<sup>2</sup> contra los 50 de la época estival, llegando a un consumo anual igual a 219 kWh/m<sup>2</sup>. Se tomó como referencia una temperatura interna de 26 °C y 20 °C para verano e invierno, respectivamente.

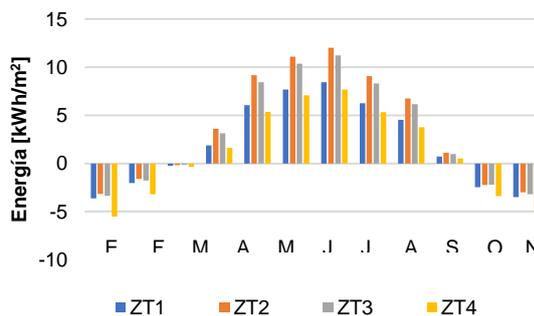


Fig. 4: Demanda energética mensual.

### 3.3 El comportamiento térmico.

Un tipo de análisis muy interesante, conocido como simulación en *free running*, prevé la observación del comportamiento térmico del edificio sin utilizar algún sistema de calefacción ni de refrigeración. De esta manera se puede apreciar la respuesta natural de la vivienda a las variaciones climáticas exteriores.

La figura 5 muestra las temperaturas promedio mensuales de las cuatro zonas térmicas a lo largo de todo el año. Si consideramos que las temperaturas de confort estén adentro de un rango de 20 a 26°C, se observa que esta condición ocurre solo en las estaciones intermedias.

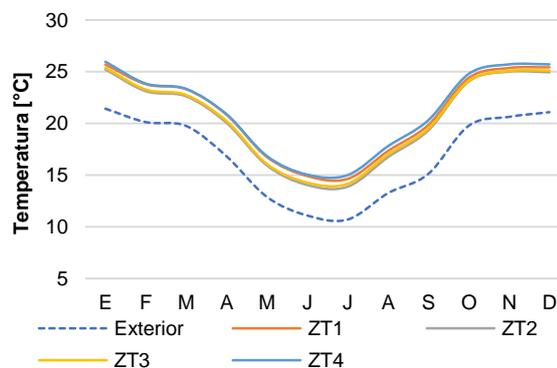


Fig. 5: Temperaturas promedio mensuales.

Sin embargo, el solo análisis de las temperaturas promedio no es suficiente para detectar las problemáticas relacionadas al comportamiento térmico del edificio. De hecho, resulta oportuno examinar las variaciones horarias a fin de observar la amplitud térmica diaria, la cual no debería exceder de los 5°C. En este sentido, se elige analizar el día más caliente (11 de noviembre) y el más frío (15 de julio), graficando los valores hora por hora.

La figura 6 muestra la variación diaria de las temperaturas para el día registrado como el “más caluroso”, correspondiente al 11 de noviembre. Puede observarse una amplitud térmica externa diaria alrededor de los 16°C. La temperatura máxima ocurre por la tarde hacia las 16:00, y en esta misma hora se alcanza la máxima temperatura para todas las zonas térmicas. En particular, la ZT3 y la ZT4 presentan las temperaturas más altas alrededor de los 35°C, debidas a la presencia de las ventanas orientadas al oeste y al efecto radiante del techo, dando lugar a una significativa amplitud

térmica interior alrededor de los 8°C. Contrariamente, las zonas térmicas ZT1 y ZT2 muestran un comportamiento más constante, con amplitudes térmicas que no superan los 6°C.

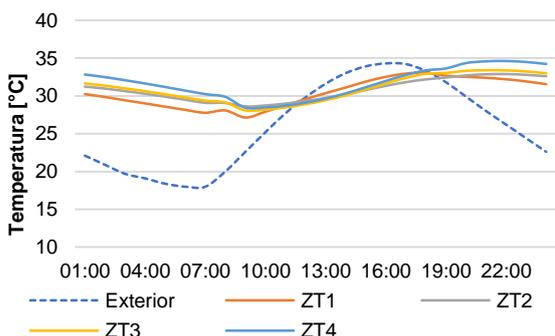


Fig. 6: Variación horaria de la temperatura en el día más caliente (11 de noviembre).

Un análisis similar vale para la condición invernal, ilustrada en la figura 7. La amplitud térmica exterior es más importante (alrededor de los 20°C), mientras las interiores presentan valores parecidos a la situación estival. La zona ZT1 presenta el mínimo valor de temperatura, cercano a 5°C. Esto se debe a la ausencia del techo y las pérdidas generadas por la gran superficie de paredes.

Es importante destacar que en ninguno de los dos casos, tanto en verano como en invierno, se alcanzan temperaturas interiores adentro del rango de confort (entre 20 y 26°C).

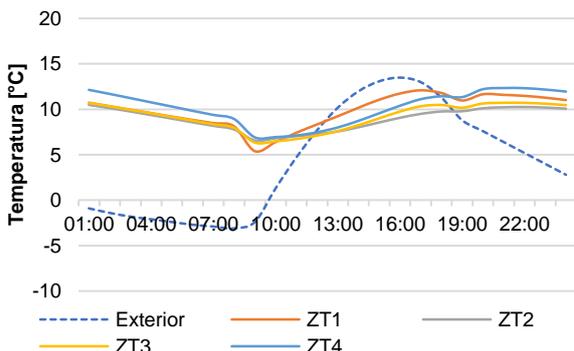


Fig. 7: Variación horaria de la temperatura en el día más frío (15 de julio).

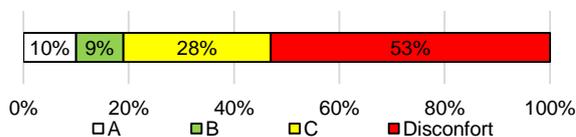
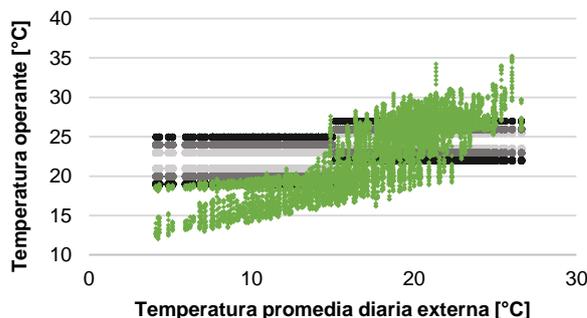


Fig. 8: Análisis del confort térmico para la ZT4.

Este análisis es complementado con el estudio de confort de la vivienda acorde a la metodología definida por la norma ISO 7730. Se elige analizar la ZT4, calculando los factores de vista de cada superficie radiante para una persona sentada a una altura de 0,6 m. Considerando una velocidad del aire igual a 0,1 m/s la temperatura operativa se obtiene con la siguiente fórmula:

$$t_o = 0,5 \cdot t_a + (1 - 0,5) \cdot t_{mr} \tag{1}$$

Se considera una actividad metabólica ligera (1 met) y un grado de arropamiento igual a 0,7 clo.

La norma individua tres categorías de confort térmico en función del índice PPD, el porcentaje estimado de insatisfechos.

Tabla 5: Definición de las categorías del confort térmico (Norma ISO 7730).

Cat.	PPD (%)	Descripción
A	< 6	Nivel elevado, recomendado para espacios ocupados por personas muy sensibles y delicadas, como enfermos, niños, mayores
B	< 10	Nivel normal; debería ser usado para edificios nuevos y reformas
C	< 15	Nivel aceptable, a usar para edificios existentes
-	> 15	Valores fuera de los criterios de bienestar, que se pueden emplear durante un período limitado de tiempo

La presente metodología permite no sólo determinar el porcentaje para cada categoría, sino también entender si la situación de disconfort está producida por una sensación de frío o de calor. Como muestra la figura 8, los valores se encuentran prevalentemente afuera de las tres categorías individuadas por la norma, con un porcentaje de disconfort muy alto. En particular, el 37% está producido por las bajas temperaturas mientras el 16% por problemas de sobrecalentamiento en verano. En este sentido, resulta necesario proponer estrategias para mejorar el confort térmico tanto en la temporada de calefacción como en la de refrigeración.

En esta dirección, los próximos apartados proponen variaciones en los elementos principales de la vivienda (techo, paredes y ventanas) para analizar el nuevo comportamiento térmico y la resultante demanda energética a fin de encontrar las estrategias más eficientes.

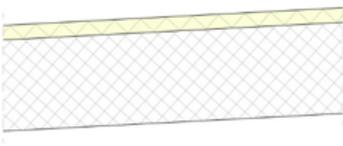
### 3.4 La influencia del techo.

La cubierta del edificio es un importante componente sobre todo en su relación con la radiación solar. En invierno la ganancia solar representa una herramienta muy útil para reducir la carga de calefacción, pero al mismo tiempo puede llevar a problemas de sobrecalentamiento en verano.

Como se señaló antes, el techo de la vivienda no presenta ningún tipo de aislación. Por esta razón, las pérdidas generadas por la cubierta representan el 25% de las pérdidas totales. Resulta entonces interesante analizar como varía el comportamiento térmico del edificio añadiendo un sistema de aislación. Se analizan dos casos: en el primero (caso A) el aislamiento se realiza en el exterior utilizando una capa de espuma de poliuretano; en el segundo (caso B) se introduce interiormente una capa de lana de vidrio y posteriormente una placa de yeso para cielorraso. Se elige dimensionar el aislante

de manera que los dos casos presenten casi la misma transmitancia térmica. De tal manera se puede apreciar cómo, a paridad de pérdidas por conducción, la capacidad térmica interna afecta las variaciones de temperatura interiores. Las tablas 6 y 7 ilustran las nuevas estratigrafías y sus propiedades.

Tabla 6: Caso A, techo aislado externamente: composición y propiedades.

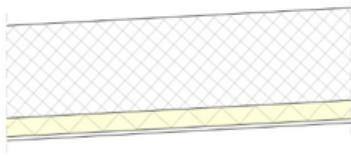


Capa	k [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	Espesor [m]
Espuma de poliuretano	0.027	40	1674	0.04
Hormigón	1.160	2000	837	0.25

Transmitancia térmica (K) = 0.557 W/m<sup>2</sup>K  
 Transmitancia térmica periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.139 W/m<sup>2</sup>K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 86.6 kJ/m<sup>2</sup>K

Como se puede observar, la capacidad térmica interna del caso A se mantiene a un valor alrededor de los 90 kJ/m<sup>2</sup>K mientras la del caso B cae a un valor muy pequeño. Por otro lado, el caso B presenta una transmitancia térmica periódica ligeramente superior a la del caso A.

Tabla 7: Caso B, techo aislado internamente: composición y propiedades.



Capa	k [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	Espesor [m]
Hormigón	1.160	2000	837	0.25
Lana de vidrio	0.032	30	1200	0.05
Placa de yeso	0.210	900	1090	0.01

Transmitancia térmica (K) = 0.520 W/m<sup>2</sup>K  
 Transmitancia térmica periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.187 W/m<sup>2</sup>K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 14.9 kJ/m<sup>2</sup>K

Introduciendo estas variaciones en SIMEDIF se puede analizar la medida en que estas propiedades afectan la demanda de energía, como descrito en la figura 9.

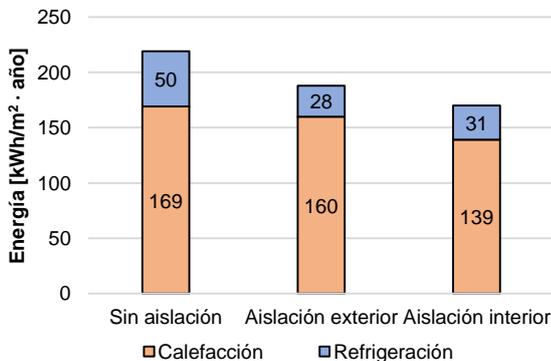


Fig. 9: Influencia de la aislación del techo en la demanda energética.

Respecto a la situación real sin aislación, la introducción del aislante resulta en una significativa reducción de la demanda de energía, con el caso B ligeramente más eficiente del caso A. En particular, la refrigeración resulta ser la componente más beneficiaria, con un ahorro de energía alrededor del 42%; sigue la calefacción con un ahorro hasta el 18%.

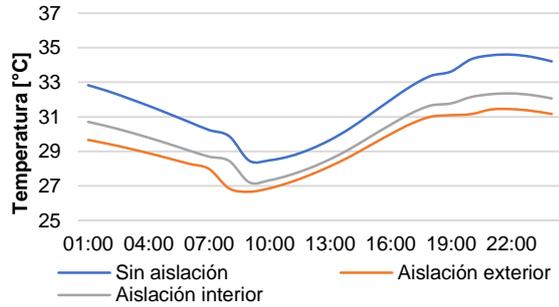


Fig. 10: Variación horaria de la temperatura en el día más caliente, para los diferentes tipos de techo.

Resulta entonces interesante analizar en free running la variación horaria de la temperatura interior a lo largo de un día para apreciar la influencia de la aislación introducida. Se elige analizar la ZT4 en el día más caliente y en el más frío.

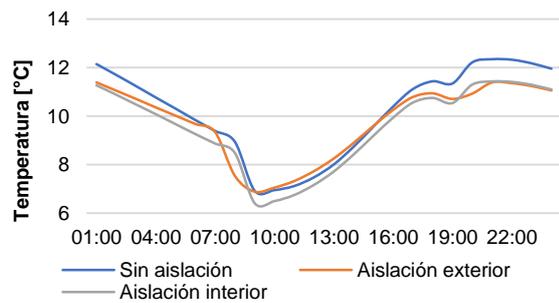


Fig. 11: Variación horaria de la temperatura en el día más frío, para las diferentes configuraciones de techo.

Como se observa en las figuras 10 y 11, la introducción de una capa de aislante permite en general un mejor comportamiento de la zona térmica. En invierno no se aprecian diferencias significativas, mientras en verano el efecto de la aislación es más evidente, con temperaturas de 2°C por debajo del caso base, a lo largo de todo el día. La aislación exterior muestra los mejores resultados, pero no se evidencian variaciones en términos de amplitud térmica diaria.

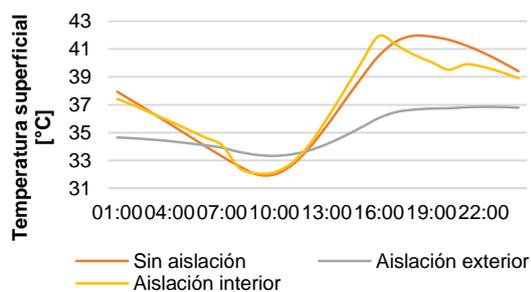


Fig. 12: Temperatura superficial (interna) del techo en el día más caliente.

Como mencionado anteriormente, la temperatura radiante es un factor importante a la hora de determinar el nivel de confort de una zona térmica. En este sentido, la posición de la aislación tiene una grande influencia en su variación diaria, como muestran las figuras 12 y 13.

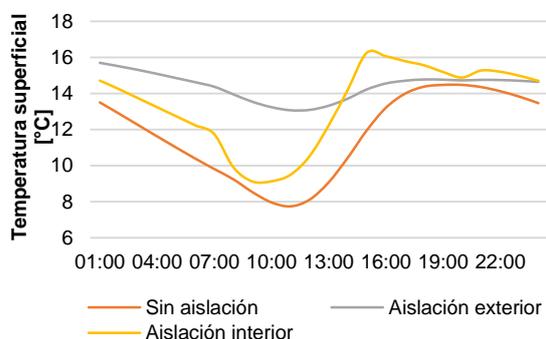


Fig. 13: Temperatura superficial (interna) del techo en el día más frío.

Como se puede apreciar, la aislación exterior presenta los mejores resultados. En efecto, tanto en verano como en invierno, permite reducir la amplitud térmica diaria a valores que nunca superan los 4°C. Además, la temperatura radiante promedio diaria es la que más se acerca al rango de confort. Por otro lado, la aislación interior produce valores parecidos al caso real sin aislación. Presenta resultados ligeramente mejores en términos de temperatura, pero la superficie conserva una amplitud térmica diaria muy grande, alrededor de los 7°C en invierno hasta los 10°C en verano. La razón de este comportamiento se encuentra en la diferente capacidad térmica interna de los dos casos: de hecho, a igualdad de transmitancia térmica estacionaria y periódica, una elevada capacidad térmica interna permite, sobre todo en verano, reducir las temperaturas superficiales internas atenuando, además, su amplitud térmica y por tanto la temperatura operativa.

Recordando que el ahorro energético para los dos casos es muy parecido, la propuesta con aislación puesta en el exterior del techo resulta ser la mejor en términos de confort térmico, ya que una pequeña amplitud térmica de la temperatura radiante del techo permite evitar situaciones de disconfort provocadas por asimetría radiante vertical y por diferencias verticales de la temperatura interior. En efecto, si analizamos el confort térmico de la ZT4 encontramos diferencias apreciables con respecto al caso real sin aislación, como se refleja en la figura 14.

Las categorías A y B no muestran variaciones, mientras el disconfort se reduce del 11% a favor de la categoría C. Es importante señalar que la introducción del aislante produce una mejoría solo en la temporada de refrigeración, mientras el disconfort en invierno se mantiene constante. Para su reducción se necesitan otras estrategias, como se mostrará más adelante.

Resulta ahora interesante determinar la factibilidad económica de la inversión. En este sentido, la tasa de inflación y el tipo de sistema utilizado para calefaccionar y refrigerar el edificio tienen mucha importancia en el cálculo del tiempo de amortización de la inversión (Yildiz et al., 2008). Para la temporada de calefacción se considera un sistema alimentando a gas natural con eficiencia del 80%, mientras para la refrigeración se supone un sistema a

electricidad con eficiencia del 90%. El ahorro energético será incrementado anualmente por una tasa de inflación del 50%, mientras para la tasa de descuento se considera una tasa de interés para plazos fijos igual al 25%. Se elige analizar el caso con aislación puesta en el exterior, ya que permite lograr los mejores resultados sobre todo en términos de confort térmico. Posteriormente a la realización de la aislación, se prevé la aplicación de una capa de pintura para prologar la vida útil de aislante hasta 7 años, con un costo de inversión estimado en 450 \$/m<sup>2</sup>. Calculando el ahorro energético anual se puede analizar el flujo de caja de la inversión. A través del cálculo del valor actual neto (VAN) es posible determinar el tiempo de amortización de la inversión, encontrando un valor igual a 5 años, ligeramente inferior a la vida útil del aislante. Sin embargo, la reducción de la demanda energética permite una disminución importante en las emisiones de gases a efecto invernadero (Dombayci, 2007). En este sentido, resultaría oportuno incentivar la utilización de la aislación facilitando su asequibilidad, a fin de mitigar la emisión de gases y mejorar asimismo el confort de los usuarios.

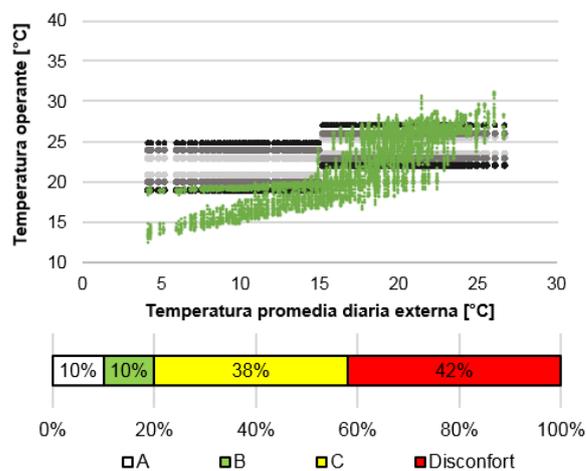


Fig. 14: Análisis del confort térmico con aislación exterior del techo.

Observada la influencia de la aislación, resulta ahora interesante entender las implicaciones, en términos de demanda energética y confort térmico, para otra tecnología constructiva. En esta dirección se consideran dos nuevas configuraciones para el techo, según lo indicado en tablas 8 y 9.

Tabla 8: Caso C, techo liviano sin material aislante: composición y propiedades.

Capa	k [W/mK]	ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>p</sub> [J/kgK]	Espesor [m]
Chapa C30	50	7800	460	0.0003
Espacio de aire	0.026	1.3	1000	0.025
Machimbre	0.12	2700	450	0.018

Transmitancia térmica (K) = 0.799 W/m<sup>2</sup>K  
 Transmitancia térmica periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.783 W/m<sup>2</sup>K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 18.5 kJ/m<sup>2</sup>K

Tabla 9: Caso D, techo liviano con material aislante: composición y propiedades.



Capa	k [W/mK]	ρ [kg/m³]	C <sub>p</sub> [J/kgK]	Espesor [m]
Chapa C30	50	7800	460	0.0003
Espacio de aire	0.026	1.3	1000	0.025
Poliestireno expandido	0.035	20	1420	0.04
Placa de yeso	0.21	900	1090	0.0125

Transmitancia térmica (K) = 0.434 W/m²K  
 Transmitancia térmica periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.431 W/m²K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 12.3 kJ/m²K

Pasando por alto la transmitancia térmica, las dos configuraciones livianas presentan valores muy bajos de capacidad térmica interna y valores altos de transmitancia térmica periódica. Esto se debe al hecho de que, respecto al caso real macizo, una tecnología constructiva liviana no dispone de una suficiente capacidad térmica y por eso se adaptará pronto a las variaciones de temperatura exterior.

Analizando la demanda energética anual se observa que la presencia de la aislación no reviste gran importancia. De hecho, para las dos configuraciones livianas se encuentran valores similares al caso A. Sin embargo, resulta muy interesante analizar las variaciones de temperatura interior en free running para la ZT4. La figura 15 muestra las temperaturas máximas y mínimas para las cuatro configuraciones. La tecnología liviana, a pesar de una resistencia térmica parecida al caso macizo, registra temperaturas interiores inferiores de 1,5°C. Por otro lado, la temperatura máxima difiere poco a lo observado en el caso A, con temperaturas inferiores hasta 3°C respecto al caso base sin aislación.

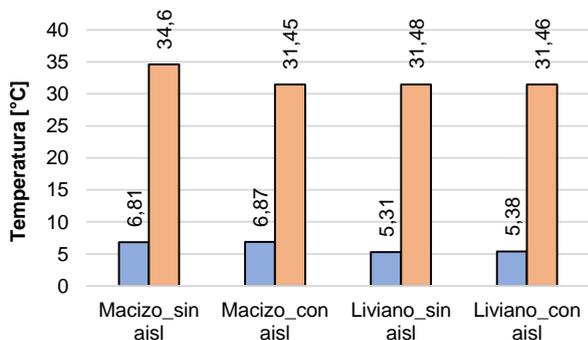


Fig. 15: Temperaturas máximas y mínimas para la ZT4.

Para entender la medida en que la tecnología constructiva afecta el comportamiento térmico del edificio se elige analizar la variación de temperatura interior para la ZT4 en el día más caliente y en el más frío, como muestran las figuras 16 y 17.

Conforme a lo previsto, en verano la tecnología liviana resulta ser la estrategia más eficaz por su capacidad de reflejar la radiación solar, con temperaturas inferiores hasta en 4°C con respecto al caso base. Las dos configuraciones livianas presentan perfiles de temperaturas similares al caso A. Sin embargo, durante la tarde se observa un aumento de la temperatura interna proporcional al incremento de la

temperatura exterior, 1°C superior con respecto al caso macizo aislado (caso A).

El techo liviano representa entonces una tecnología constructiva a tener en cuenta (además por su ligereza y durabilidad), sobre todo en verano. En invierno, la falta de masa para acumular calor da lugar a temperaturas interiores más bajas con respecto a los techos masivos.

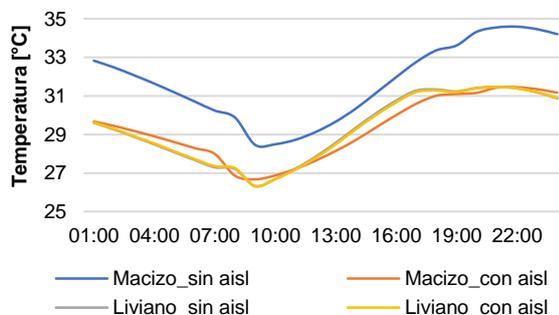


Fig. 16: Variación horaria de la temperatura en el día más caliente.

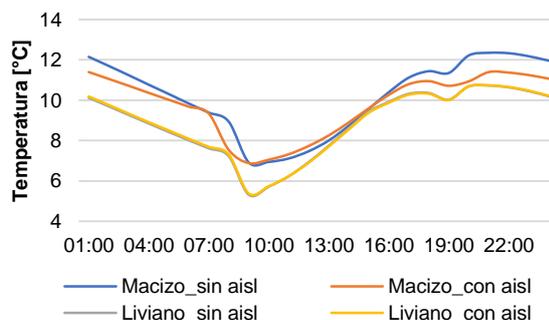
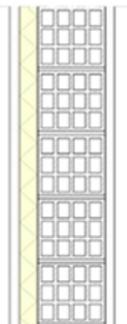


Fig. 17: Variación horaria de la temperatura en el día más frío.

### 3.5 La influencia de las paredes.

Las paredes son responsables del 54% del consumo total. De hecho, constituyen el 83% de toda la superficie expuesta al exterior. Resulta entonces interesante actuar sobre sus propiedades para determinar el potencial ahorro energético y observar el nuevo comportamiento térmico.

Tabla 10: Caso E: Composición de las paredes aisladas y sus propiedades.



Capa	k [W/mK]	ρ [kg/m³]	C <sub>p</sub> [J/kgK]	Espesor [m]
Revoque	1.16	1009	800	0.025
Poliestireno expandido	0.033	25	1420	0.05
Ladrillo hueco N18	0.47	636	1009	0.18
Revoque	0.93	1009	800	0.025

Transmitancia térmica (K) = 0.472 W/m²K  
 Transmitancia t. periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.198 W/m²K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 53.3 kJ/m²K

En primer lugar, se analiza la influencia de la orientación introduciendo una aislación exterior (por los motivos expuestos en el precedente parágrafo) realizada en

poliestireno expandido de 5 cm de espesor, como se detalla en la tabla 10.

Efectuando diferentes simulaciones se puede determinar el porcentaje de ahorro para cada orientación, a fin de encontrar la solución más conveniente en relación con el costo de cada propuesta (figura 18).

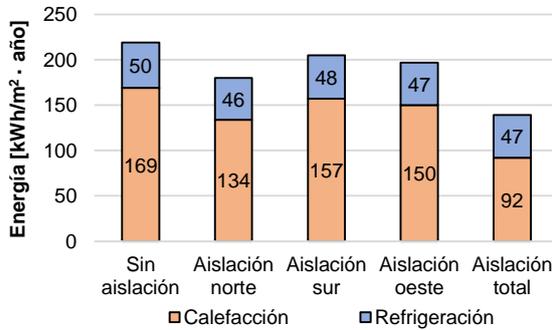


Fig. 18: Influencia de la orientación de la aislación en la demanda energética.

La introducción del aislante resulta en una reducción de la demanda de energía exclusivamente en la temporada de calefacción. Aislar todo el edificio permite reducir la demanda del 46%, mientras la pequeña disminución de la demanda para refrigeración es del orden del 6%.

Estos datos se pueden explicar observando la variación de la temperatura superficial para cada orientación, en el día más caliente y en el más frío. Se elige considerar las paredes de la ZT1, la única que presenta las cuatro orientaciones. En verano el comportamiento térmico es muy parecido para todas las orientaciones. La amplitud térmica en ausencia de aislación llega a 6°C mientras con la introducción del aislante se reduce a 3,5°C para todos los casos, figura 19. Por otro lado, en invierno la pared norte recibe la mayor cantidad de energía solar y presenta una amplitud térmica de 6,5°C, reducible a 3°C en presencia de aislación, figura 20.

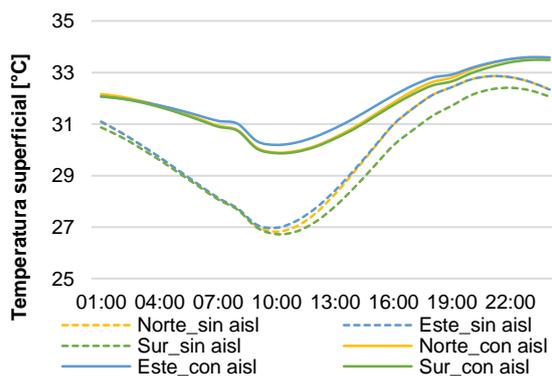


Fig. 19: Temperaturas superficiales de las paredes en el día más caliente.

Es importante señalar que la introducción de la aislación en las paredes no implica una disminución de la demanda energética para refrigeración. Esto se debe a la tipología constructiva de la vivienda, envoltorio de ladrillo hueco cerámico, no permite alcanzar valores altos de capacidad térmica interna. Utilizar otro material, como se presentará posteriormente, puede mejorar el comportamiento térmico estival.

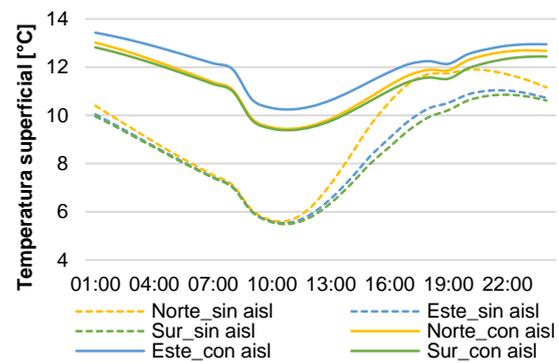


Fig. 20: Temperaturas superficiales de las paredes en el día más frío.

Por otro lado, la introducción de la aislación en las paredes tiene una fuerte influencia en términos de confort térmico. Se elige considerar el caso con aislación puesta en el norte, ya que es la que presenta mejores resultados en términos de confort, reduciendo la amplitud térmica interior. Al analizar la ZT4, se encuentran diferencias significativas con respecto al caso base sin aislación, como muestra la figura 21. El desconfort se reduce en un 17%, con un importante incremento en las categorías A y B. En particular, se reduce sensiblemente el desconfort causado por temperaturas frías, llevándolo al 23% respecto al 37% del caso real sin aislación. Sin embargo, no se observan mejoras importantes en el desconfort estival.

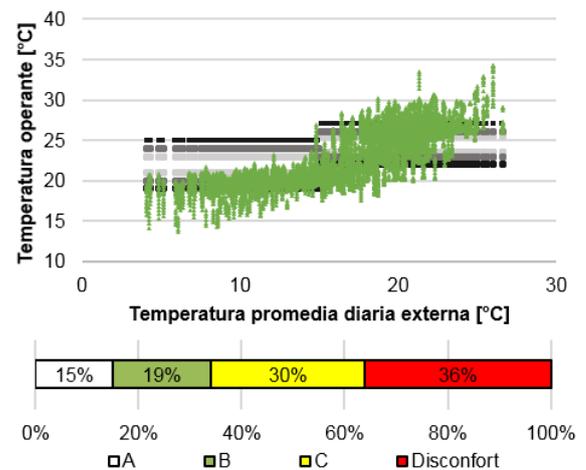


Fig. 21: Análisis del confort térmico con aislación de la pared norte.

En términos económicos, introducir un material aislante en una pared ya existente requiere una importante inversión, ya que al costo de la aislación hay que sumarle la demolición del revoque original y la realización de una nueva capa de revestimiento posteriormente a la implementación del aislante. En este sentido, el tiempo de amortización de la presente inversión no es conveniente considerando la vida útil del material aislante. Sin embargo, se recomienda su utilización en edificios nuevos, ya que la presencia de la aislación puede brindar significativas mejoras en la demanda energética y en el confort térmico de los usuarios.

Se quiere ahora analizar la influencia de otra tecnología constructiva. En particular, se elige utilizar el ladrillo macizo

en lugar del hueco en todas las paredes exteriores. En la primera configuración (caso F) no se prevé algún tipo de aislación mientras en la segunda (caso G) se añade 5 cm de poliestireno expandido en el exterior, ver tablas 11 y 12.

Tabla 11: Caso F: composición de la pared y sus propiedades.

Capa	k [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_p$ [J/kgK]	Espesor [m]
Revoque	1.16	1009	800	0.025
Ladrillo macizo	0.91	1800	840	0.20
Revoque	0.93	1009	800	0.025

Transmitancia térmica (K) = 2.282 W/m<sup>2</sup>K  
 Transmitancia t. periódica (Y<sub>ie</sub>) = 1.117 W/m<sup>2</sup>K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 71.2 kJ/m<sup>2</sup>K

El ladrillo macizo presenta una conductividad térmica mayor con respecto al ladrillo hueco, pero por otro lado está caracterizado por una mayor capacidad térmica debido a su mayor densidad. De hecho, sobre todo para el caso aislado, se observa un valor de transmitancia térmica periódica que es casi la mitad respecto al caso del ladrillo hueco aislado y una capacidad térmica interna mayor del 22%.

El análisis de la demanda energética confirma lo que se ha mencionado anteriormente, como se observa en la figura 22.

Capa	k [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$C_p$ [J/kgK]	Espesor [m]
Revoque	1.16	1009	800	0.025
Poliestireno expandido	0.033	25	1420	0.05
Ladrillo macizo	0.91	1800	840	0.20
Revoque	0.93	1009	800	0.025

Transmitancia térmica (K) = 0.512 W/m<sup>2</sup>K  
 Transmitancia t. periódica (Y<sub>ie</sub>) = 0.104 W/m<sup>2</sup>K  
 Capacidad térmica interna (C<sub>i</sub>) = 65.6 kJ/m<sup>2</sup>K

Tabla 12: Caso G: composición de la pared y sus propiedades.

Según la figura 22, La implementación de ladrillo macizo en lugar del hueco permite reducir la demanda para refrigeración hasta un 14% para el caso aislado (caso G), mientras la demanda para calefacción puede disminuir hasta un 48%, ligeramente más eficiente respecto al caso del ladrillo hueco aislado (caso E). Por otro lado, en ausencia de aislación el ladrillo macizo es responsable de un incremento de la demanda para calefacción del 6%, debido a su menor resistencia térmica.

Resulta entonces interesante analizar la variación de temperatura a lo largo del día más caliente para la ZT1, como muestra la figura 23. El ladrillo macizo con aislación exterior (caso G) presenta los mejores resultados, observándose una disminución de 1°C respecto al caso del ladrillo hueco aislado (caso E) y hasta 3°C con respecto al caso base (sin aislación). Además, la amplitud térmica diaria se reduce a 4 °C, respecto a los 6 °C del caso base.

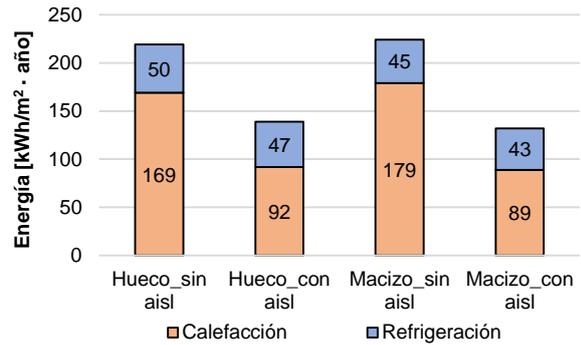


Fig. 22: Influencia de las paredes en la demanda energética.

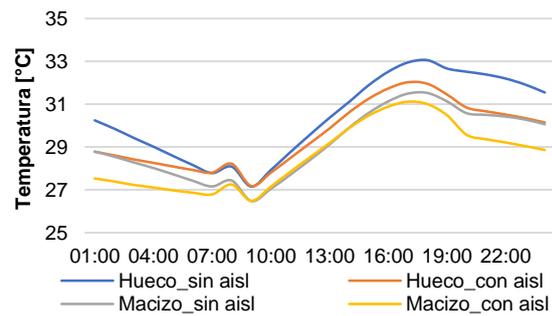


Fig. 23: Variación horaria de la temperatura en el día más caliente.

El ladrillo macizo permite mejorar significativamente también el nivel de confort esperado. Respecto al caso base, la estrategia G permite reducir el desconfort en un 19%, en particular en la época invernal. La categoría B registra el incremento mayor, con un aumento del 12%, según muestra la figura 24.

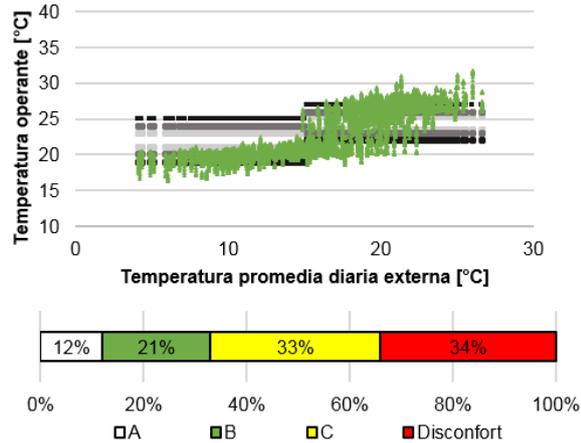


Fig. 24: Análisis del confort térmico para envoltente de ladrillo macizo aislado.

En términos económicos, utilizar ladrillo macizo en lugar del hueco requiere un gasto mayor sobre todo en relación con el costo de la mano de obra. Sin embargo, por las razones que acaban de exponerse, su implementación es altamente recomendable sobre todo en localidades con elevados niveles de radiación solar, ya que puede garantizar una reducción de la demanda energética y mejora sensiblemente el nivel de confort.

### 3.6 La influencia de las infiltraciones.

La norma IRAM 11604 tiene en cuenta, en el cálculo de las pérdidas volumétricas, la componente debida a las infiltraciones de aire a través de las juntas de contacto de la carpintería. En ausencia de un cálculo preciso, la norma sugiere de utilizar un número de renovaciones de aire promedio por hora igual a 2. Sin embargo, recientes estudios han demostrado que el valor sugerido por la norma resulta excesivo comparado con los valores estimados analíticamente (Volantino et al., 2012). Para su cálculo se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{\sum 0.0464 l_i q_i [0,516(c_i \cdot v_i)^2]^{0.67}}{V} \quad (2)$$

Se elige considerar un caudal  $q_i$  igual a  $15 \text{ m}^3(\text{h m})^{-1}$ , valor recomendado para carpintería de aluminio. De esta manera, los valores encontrados divergen con respecto al valor sugerido por la norma. Los resultados para las cuatro zonas térmicas se muestran en la tabla 13, donde se consideran también los requisitos mínimos de salubridad y confort en función del tipo de local.

Tabla 13: Definición de las renovaciones de aire (1/h).

	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Durante el día (de 8 a 20)	10.81	4.71	5.9	5.52
Durante la noche (de 20 a 8)	0.81	0.71	0.9	0.52

Para entender como las infiltraciones afectan la demanda de energía se propone la implementación de burletes sintéticos en la carpintería de puertas y ventanas. De esta manera se puede reducir sensiblemente el caudal  $q_i$ , llegando a valores de  $3,5 \text{ m}^3(\text{h m})^{-1}$ , utilizado como valor de referencia (Volantino y Cornejo, 2017). El resultado es una disminución en la cantidad de renovaciones de aire por hora, como muestra la tabla 14.

Tabla 14: Renovaciones de aire (1/h) con carpintería modificada.

	ZT1	ZT2	ZT3	ZT4
Durante el día (de 8 a 20)	10.19	4.17	5.21	5.12
Durante la noche (de 20 a 8)	0.19	0.17	0.21	0.12

Respecto al caso real, la reducción de las infiltraciones resulta en una sensible disminución de la demanda energética. Los mejores resultados se obtienen en la temporada de calefacción, con una reducción de la demanda energética del 22%. Por otro lado, en la temporada de refrigeración no se observan diferencias significativas.

Para entender como la reducción de las infiltraciones afecte el comportamiento térmico del edificio se elige analizar la variación de la temperatura interior de la ZT1, la que presenta la mayor superficie de carpintería. Como muestra la Figura 25, simplemente mejorando las infiltraciones por puertas y ventanas se obtiene un aumento de la temperatura promedio diaria alrededor de  $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . En particular, durante la noche, la temperatura interna del local supera en  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  al caso base debido a la reducción en las pérdidas térmicas por infiltraciones de aire.

Los resultados son interesantes también en términos de confort térmico, figura 26. Mejorar la carpintería del edificio repercute positivamente en la sensación de confort (mayor porcentaje en las clases A y B), mientras el porcentaje de disconfort se reduce un 13%.

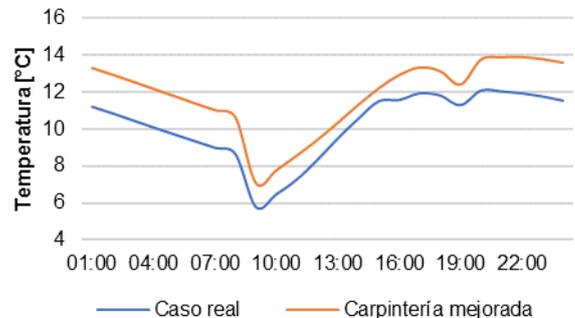


Fig. 25: Variación horaria de la temperatura en el día más frío.

Desde una perspectiva económica, reducir las infiltraciones por puertas y ventanas puede considerarse a todos los efectos una buena inversión. Su bajo presupuesto frente al significativo ahorro energético debería incentivar la utilización de carpintería con un reducido caudal de aire por metro de junta, tanto para edificios nuevos como para edificios ya existentes. Sin embargo, sus beneficios se observan sobre todo en invierno, mientras en días cálidos puede empeorar ligeramente el comportamiento térmico y la demanda energética.

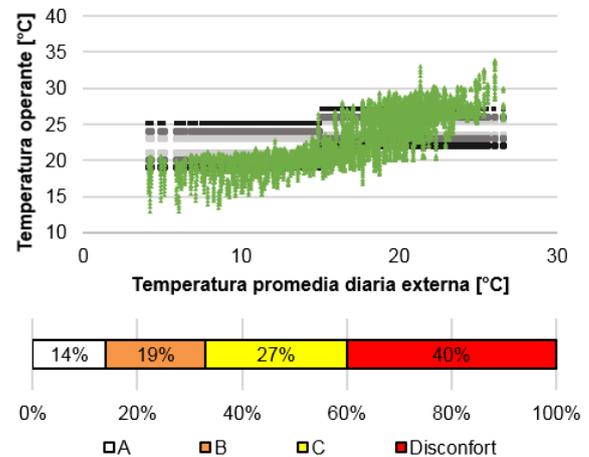


Fig. 26: Análisis del confort térmico con carpintería mejorada.

### 3.7 La influencia de la orientación.

Como se indicó anteriormente, la orientación desempeña un papel fundamental en relación con la demanda energética de un edificio. Resulta entonces oportuno analizar su influencia antes de empezar la obra, ya que una modificación de la orientación es una operación claramente impracticable. Sin embargo, para los fines de este trabajo, resulta interesante observar como un cambio en la orientación de la vivienda pueda brindar resultados significativos.

Se supone girar el edificio de 90° en sentido horario, a fin de colocar la mayoría de las ventanas al norte. En términos energéticos, como muestra la figura 27, los resultados son muy interesantes.

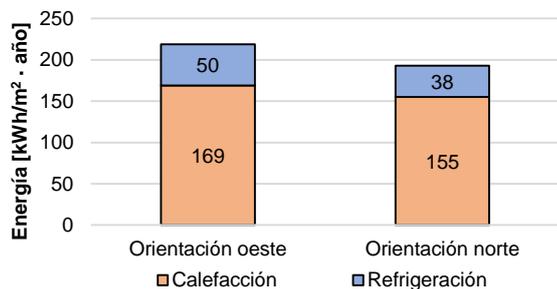


Fig. 27: Influencia de la orientación en la demanda energética.

La demanda energética para calefacción presenta una ligera reducción, mientras la carga de refrigeración recibe los mejores beneficios, con un ahorro energético del 24%. Este último dato se explica observando que en la nueva configuración el techo presenta una orientación al este, contra la orientación al norte del caso real. Por esta razón, la cantidad de radiación solar absorbida es menor sobre todo en la época estival, lo que permite reducir sensiblemente la demanda energética.

La nueva configuración trae beneficios también a nivel de confort térmico. El porcentaje de disconfort se reduce un 4%, mientras que las tres categorías A, B y C incrementan moderadamente.

La orientación es influyente, por lo tanto, en el comportamiento térmico de un edificio y la demanda energética. En este sentido sería recomendable, a la hora de empezar un proyecto, tener en cuenta su influencia, con mayor razón en proyectos a gran escala como la urbanización de un nuevo barrio.

### 3.8 La influencia del color.

El color de las superficies exteriores de un edificio es importante no sólo desde el punto de vista estético sino también desde el punto de vista energético.

La vivienda original prevé colores claros, por lo cual en todas las simulaciones precedentes se utilizaron valores de absorptancia solar igual a 0,3. Resulta interesante determinar el efecto del color de la envolvente sobre el comportamiento térmico del edificio y la consiguiente demanda energética. En este sentido, se parametriza la absorptancia solar de la envolvente con valores de 0,3; 0,5 y 0,7.

El análisis de la demanda energética permite comprender la magnitud de este factor. La simple modificación del color exterior incrementa sensiblemente la demanda energética para refrigeración. Con una absorptancia de 0,5 el aumento es alrededor del 36% mientras que alcanza el 66% en el caso de absorptancia solar igual a 0,7. De hecho, al comparar las temperaturas interiores de la ZT1 para los tres casos, la influencia del color resulta aún más evidente. Como lo indica la figura 28, mayores valores de absorptancia solar dan lugar a un incremento de hasta 3 °C en la temperatura interior cuando se analiza el día 11 de noviembre, con consecuentes problemas también en términos de confort térmico.

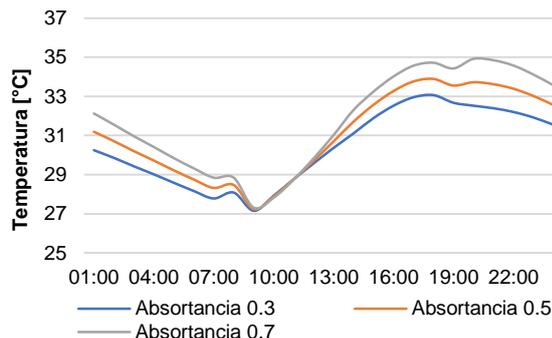


Fig. 28: Variación horaria de la temperatura en el día más caliente.

Por estas razones, es necesario que la selección de los colores no responda sólo a aspectos estéticos sino también que sea avalada por un cuidadoso análisis térmico del edificio.

## 4. CONCLUSIONES

La simulación computacional representa una herramienta indispensable para cualquier proyecto que pretende reducir la demanda energética. De hecho, no sólo permite analizar el comportamiento térmico de un edificio existente y de sus posibles mejoras, sino también puede y debe guiar al arquitecto durante la fase preliminar de diseño. Además, resulta ser el método más eficaz para el cálculo de la temperatura operativa de las distintas zonas térmicas, fundamentales para estimar los niveles de confort esperados. El análisis de la sola demanda energética sin prestar atención a las consecuencias en términos de confort puede llevar a condiciones de disconfort causadas por asimetrías radiantes de las superficies que constituyen la zona térmica.

Para la ciudad de Salta se señala la importancia de la aislación exterior como estrategia para reducir sensiblemente la demanda energética y mejorar el nivel de confort esperado, acercándolo a los valores recomendados por las normativas. Se destaca asimismo la importancia de mejorar la carpintería de puertas y ventanas, cuyas infiltraciones de aire tienen un potencial de ahorro alrededor del 20%. Siguen la orientación y la elección del color, cuyas consecuencias se deben siempre tener en cuenta, sobre todo en grandes proyectos de urbanización.

## NOMENCLATURA

to	temperatura operativa [°C]
ta	temperatura del aire interior [°C]
t <sub>mr</sub>	temperatura media radiante [°C]
n	renovaciones de aire [1/h]
li	largo de las juntas de contacto de cada tipo de carpintería [m]
qi	caudal de infiltración de aire por unidad de longitud de la junta [m <sup>3</sup> /h.m]
ci	coeficiente de corrección (tabla B.1, IRAM 11604)
vi	velocidad del viento en la localidad considerada (IRAM 11603) [m/s]
V	volumen de la zona térmica [m <sup>3</sup> ]

## REFERENCIAS

- Asdrubali F., Baldassarri C., Fthenakis V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Building*, **64**, 73–89.
- Di Perna C., Stazi F., Ursini Casalena A., Stazi A. (2008). Massa e comfort: necessità di un'adeguata capacità termica areica interna periódica, *Industria dei laterizi*.
- Dombayci Ö. A. (2007). The environmental impact of optimum insulation thickness for external walls of buildings. *Building Environment*, **42** (11), 3855–3859.
- ENEA (2010). Monitoring of EU and National Energy Efficiency Targets, Progetto Odysee-Mure.
- Evans J. M. (2004). Zonificación bioambiental en Latinoamérica para una arquitectura sustentable. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **8**, 163-168.
- Fanger P. O. (1982). Thermal comfort, Robert E. Krieger. Publishing Company, Malabar, FL, USA.
- Ministerio de Energía y Minería (2017). Balance Energético Nacional de la República Argentina, año 2016.
- Norma Argentina IRAM 11603 (2011). Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina.
- Norma Argentina IRAM 11604 (2001). Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones hidrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites.
- Norma Argentina IRAM 11605 (1996). Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad de edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos.
- Norma ISO 13786 (2017). Thermal performance of building components. Dynamic thermal characteristics. Calculation methods.
- Norma ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
- Norma EN 12792 (2003). Ventilation for buildings. Symbols, terminology and graphical symbols.
- Volantino V. L., Cornejo E. J. (2017). Ahorro energético inherente a infiltraciones de aire por correcciones en el diseño de carpinterías utilizadas en viviendas en interés social. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **11**, 08.51-08.57.
- Volantino V. L., Cornejo J. E., Pizzorno D. H., Bernacchia J. T. (2012). La ganancia solar y las infiltraciones de aire indeseadas en el comportamiento energético de viviendas de interés social. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 08.113-08.120.
- Yildiz A., Gürlek G., Erkek M., Özbalta N. (2008). Economical and environmental analyses of thermal insulation thickness in buildings. *Journal of Thermal Science and Technology*, **28** (2), 25–34.