



**PROYECTO DE MONITORIZACIÓN PARA ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TÉRMICA DE LA
NAVE LOGÍSTICA DE MARCHAMALO 2B**

Abril 2026



Índice

1. Introducción

- 1.1. Motivación
- 1.2. Objetivo general del estudio
- 1.3. Metodología utilizada

2. Monitorización de la nave

- 2.1. Equipos instalados
- 2.2. Parámetros monitorizados
- 2.3. Instalación y localización de los sensores

3. Análisis de los datos experimentales

- 3.1. Análisis térmico en condiciones de verano
- 3.2. Análisis térmico en condiciones de invierno
- 3.3. Análisis térmico en condiciones intermedias
- 3.4. Evolución anual de las temperaturas medias de la nave
- 3.5. Análisis de la calidad del aire interior
- 3.6. Conclusiones del análisis de datos experimentales

4. Creación del modelo digital de la nave

- 4.1. Herramienta de simulación empleada
- 4.2. Modelo virtual realizado
- 4.3. Validación del modelo digital
- 4.4. Resultados del proceso de validación
- 4.5. Conclusiones de la validación del modelo virtual de la nave

5. Optimización del diseño de la nave

- 5.1. Objetivos del estudio de optimización
- 5.2. Listado de casos a simular
- 5.3. Caso crítico verano
 - 5.3.1. Incremento del aislamiento térmico en fachada y cubierta
 - 5.3.2. Reducción del aislamiento térmico en fachada y cubierta
 - 5.3.3. Reducción de la superficie translúcida en la envolvente
 - 5.3.4. Aumento de la superficie translúcida en la envolvente (lucernarios + banda perimetral)
- 5.4. Caso crítico invierno
 - 5.4.1. Incremento del aislamiento térmico en fachada y cubierta
 - 5.4.2. Reducción del aislamiento térmico en fachada y cubierta
 - 5.4.3. Reducción de la superficie translúcida en la envolvente
 - 5.4.4. Aumento de la superficie translúcida en la envolvente (lucernarios + banda perimetral)

6. Conclusiones generales y recomendaciones

1. Introducción

1.1. Motivación

Las naves industriales, que acostumbran a tener grandes dimensiones cuanto a extensión y altura pueden enfrentarse a retos vinculados al mantenimiento de unas condiciones adecuadas de confort térmico interior. Es común que muchas naves industriales no cuenten con espacios climatizados, más allá de las zonas de oficinas, puesto que la normativa española actualmente no obliga a la implantación específica de sistemas de climatización. Esto puede suponer que, especialmente en condiciones críticas de verano e invierno, se alcancen en las zonas interiores temperaturas fuera de los rangos que se consideran de confort térmico para ocupantes o incluso para el propio almacenamiento de productos.

Por ello, surge la necesidad de plantear cómo diseñar estos edificios industriales de manera que se mantengan unas condiciones mínimas de confort interior, pero sin incrementar excesivamente sus costes de construcción y operación, y sin incrementar tampoco en exceso la demanda energética vinculada a su operativa.

1.2. Objetivo general del estudio

En base a las necesidades arriba indicadas, surgen los objetivos del presente estudio, centrado en la modelización, simulación y monitorización térmica de la nave logística de Marchamalo 2B (Guadalajara), propiedad de Montepino.

El proyecto constituye una continuación y ampliación de las tareas desarrolladas en los proyectos previos fruto de los contratos firmados entre la UPC y Montepino.

No obstante, en este caso, se profundiza en el análisis del confort térmico actual con los cerramientos actualmente utilizados y se estudia una modificación de los mismos para evaluar la mejoría o empeoramiento de las condiciones térmicas interiores de la nave en cada caso. Estos análisis de soluciones alternativas se encuentran en el apartado 5 del presente informe.

1.3. Metodología utilizada

La metodología empleada para llevar a cabo los objetivos del estudio es doble:

- Por una parte, se ha procedido a **una investigación experimental** midiendo varios parámetros (temperatura, humedad o nivel de CO₂, entre otros) en distintos puntos de la nave durante todo un año. Para ello se instalaron varios sensores inalámbricos que medían on-line y mandaban las mediciones a un repositorio en la nube para un análisis posterior.
- Por otra parte, se utiliza la simulación numérica de la nave mediante **CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)** para la creación de **un gemelo virtual** de la nave logística. Los resultados del modelo digital se comparan con los datos experimentales para su validación

Una vez validado, se realizan una serie de simulaciones con distintos parámetros de diseño de la nave (espesores, etc.) para determinar cómo afectan a las condiciones interiores. Ello permite determinar la influencia de dichos parámetros, con el objetivo de establecer unas guías de diseño de la nave para la optimización del combo consumo energético/comfort usuario.

2. Monitorización de la nave

Para la monitorización de la nave se instaló un sistema que adquiriría las señales de distintos parámetros medidos en distintos puntos distribuidos dentro de la nave. Los equipos instalados (**Figura 1**) y los parámetros monitorización se describen a continuación.

2.1. Equipos instalados

- 6 unidades Multisensor Plus: medición de: Temperatura; Humedad; Concentración de CO₂; Concentración de COVs; Intensidad de ruido; Intensidad de luz; Detección de movimiento.
- 9 unidades MultiSensor: medición de: Temperatura; Humedad; Concentración de CO₂; Intensidad de luz; Detección de movimiento
- 1 unidad RadiationSensor: medición de radiación solar total
- 1 unidad SmartHub: Concentrador de señales de largo alcance, con conectividad propia de internet móvil 4G multioperador.



Figura 1. Equipos instalados (Multisensor Plus, MultiSensor, SmartHub)

2.2. Parámetros monitorizados

Las mediciones realizadas se indican a continuación:

Interior de la nave:

- Temperaturas interiores en diferentes puntos y alturas.
- CO₂ y COVs en diferentes puntos del interior, para verificar la calidad del aire interior y la posible afectación de las emisiones generadas por los neumáticos y otro material almacenado en la nave.
- Otros parámetros de posible interés, como humedad, nivel de iluminación e intensidad de ruido.

Exterior de la nave:

- Temperaturas exteriores, medidas mediante una estación meteorológica existente.
- Radiación solar en la cubierta del edificio.

2.3. Instalación y localización de los sensores

Los sensores se distribuyen de la siguiente manera:

- Siguiendo los dos ejes principales de la nave, longitudinal y transversal.
- Los sensores con medición de COVs (Multisensor Plus) se sitúan en la zona ocupada por los neumáticos, para verificar la presencia de estos compuestos debido a la presencia del material acumulado.
- La zona de empaquetado, donde se acumula la mayor parte de la ocupación de la nave, se cubre con un número más elevado de sensores que el resto, debido a la importancia de asegurar el confort térmico en dicha zona.
- Los puntos de medida se colocan a altura de trabajo (a 1,8 metros de altura aproximadamente), excepto en 3 puntos, en los que se hace una doble medición (a 1,8 y un segundo punto a mayor altura), para verificar la existencia de estratificación térmica en altura.

La disposición de los equipos de medida se muestra en la siguiente imagen (**Figura 2**):



Figura 2. Multisensores instalados en los pilares a distintas alturas (1,8m y 7,5m)

En la **Figura 3**, se indica la distribución de los sensores por el interior de la nave.

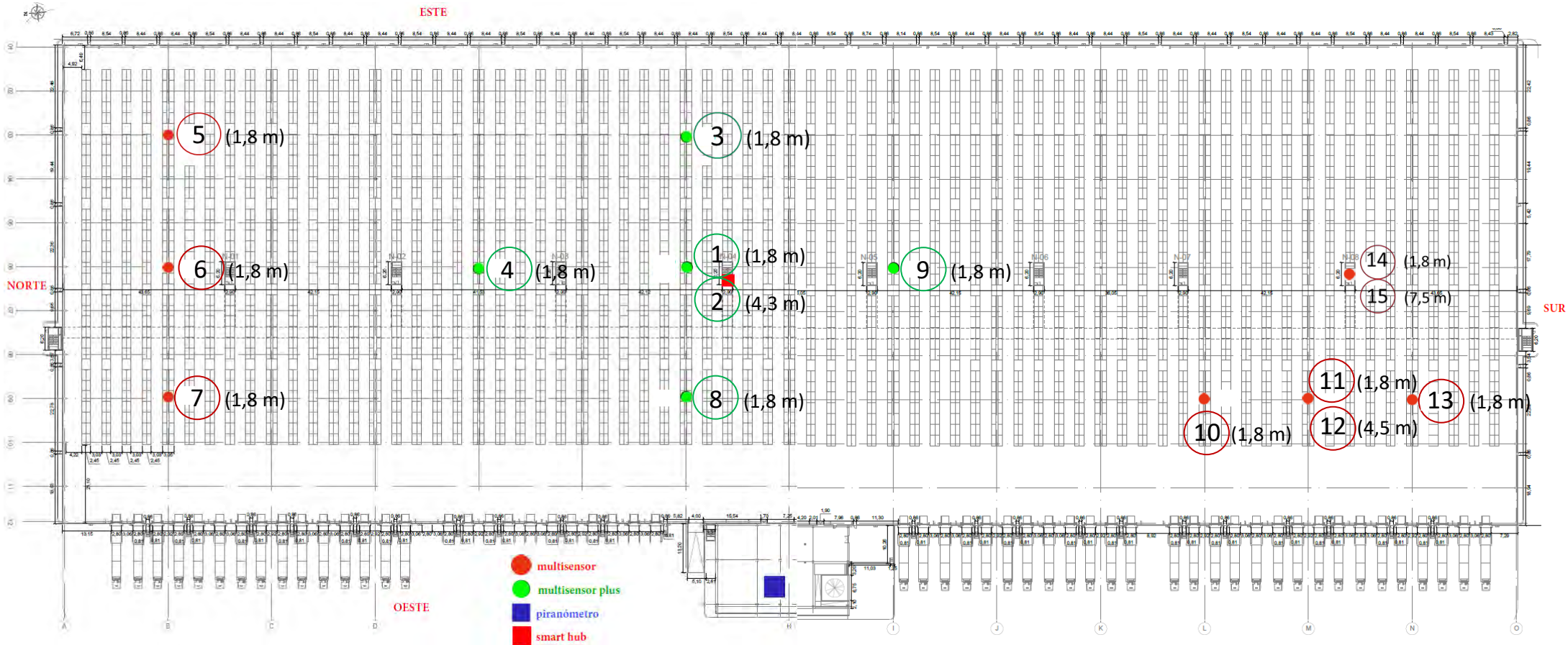


Figura 3. Vista en planta de la nave Marchamalo 2B, con la localización de los equipos de medida instalados

Los sensores instalados transmiten las señales medidas hasta el concentrador de señales (SmartHub). Desde aquí se mandan a una plataforma propia de almacenamiento en la nube, donde se pueden analizar y visualizar todas las mediciones realizadas (plataforma Orpheus).

3. Análisis de los datos experimentales

Para hacer un primer análisis del comportamiento térmico de la nave, se ha procedido a comparar, para cada uno de los 15 puntos de medida interiores, la variación de temperatura interior respecto a la temperatura exterior. Esta comparativa se ha llevado a cabo para 3 periodos distintos de 5 días consecutivos (periodo frío o condiciones de invierno, cálido o condiciones de verano e intermedio). Las temperaturas consideradas son las medias horarias para cada uno de los 5 días.

Con este análisis se pretenden verificar los siguientes aspectos:

- La distribución de temperaturas en el interior, para verificar si hay alguna zona crítica (poniendo especial interés a la zona que concentra la mayor parte de la ocupación), o si, por el contrario, las temperaturas son muy uniformes en la nave. En caso que las temperaturas sean muy uniformes, esto nos puede indicar que, para monitorizar otras instalaciones, podría reducirse el número de sensores.
- Las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas.
- La inercia de la respuesta, para ver cuál es la amortiguación y retraso entre los cambios de temperatura interiores respecto a los exteriores.

3.1. Análisis térmico en condiciones de verano

En este caso se han considerado los días 23 al 27 de julio de 2024, que se corresponden con unas temperaturas exteriores entre 19°C y 40°C. En este periodo, la temperatura media exterior se iba incrementando.

- *Distribución de temperaturas en el interior*

En la **Figura 4**, se muestra la evolución de las temperaturas interiores para los 15 puntos de medida durante cinco días consecutivos.

Puede observarse que las diferencias de temperatura entre los puntos interiores situados a la misma altura (1,8m) son muy pequeñas (aproximadamente 0,5 °C). Para el caso del sensor situado a 7,5 m de altura (punto 14) las variaciones diarias son mucho mayores.

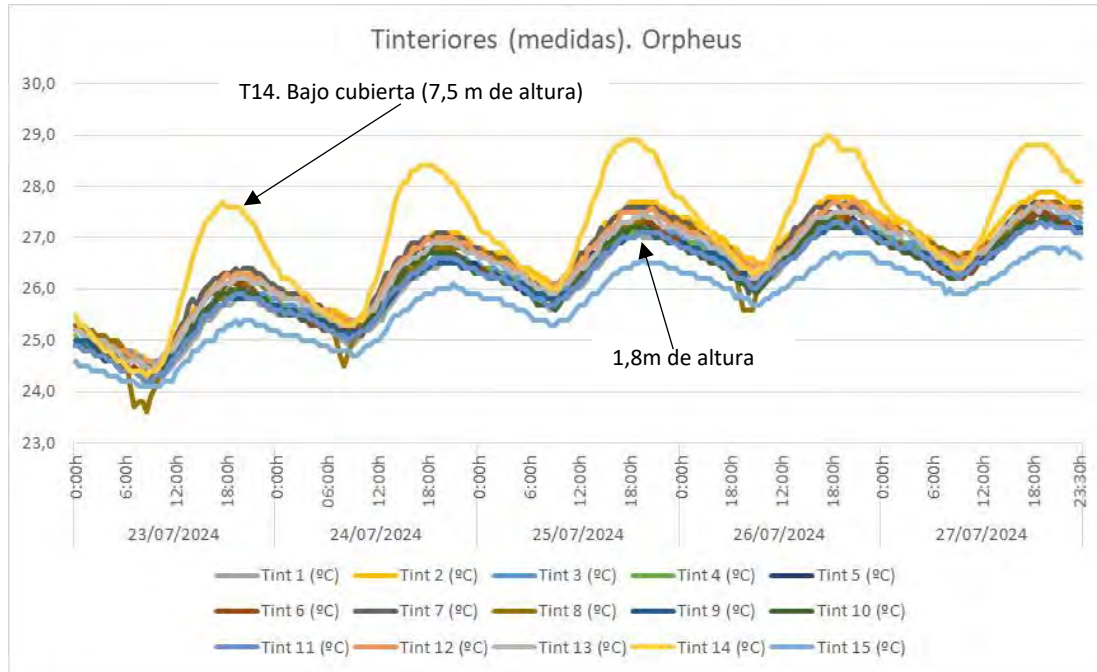


Figura 4. Evolución temperaturas interiores medidas en la nave para condiciones de verano

Por ello, para hacer los análisis en detalle en todos los estudios que se presentarán en este informe, se ha decidido tomar como puntos representativos de interés los siguientes (ver Figura 3):

- 6: zona interior, 1,8 m (fachada norte)
- 14: interior, 7,5 m sur
- 15: interior, 1,8 m sur
- 11, 12: zona *packing*, 1,8–4,5 m
- 13: perimetral, 1,8 m sur

Centrándonos en estos puntos, en la **Figura 5** puede observarse de nuevo que el punto con mayor temperatura es el 14, debido a su proximidad con la cubierta. Del resto de puntos de interés, el que presenta una temperatura inferior (1°C por debajo según el caso) es el 15, correspondiente a la zona interior de estanterías, que está aislada de las zonas de paso, alejada de la fachada y en la que no hay prácticamente cargas térmicas.

Las temperaturas interiores son bastante estables, aunque se presenta un ligero incremento de unos 3 °C en los 5 días medidos debido a un incremento de la temperatura exterior. Por tanto, el volumen de aire se va calentando progresivamente, alcanzando una temperatura máxima de unos 27,5 °C, muy por debajo de los valores máximos de la temperatura exterior. En el punto 14, más próximo a cubierta, las temperaturas suben hasta los 29°C. La nave presenta elevada inercia térmica, pocas cargas interiores y una baja incidencia de radiación solar (debido a la poca superficie no opaca), y el aislamiento cumple correctamente su función.

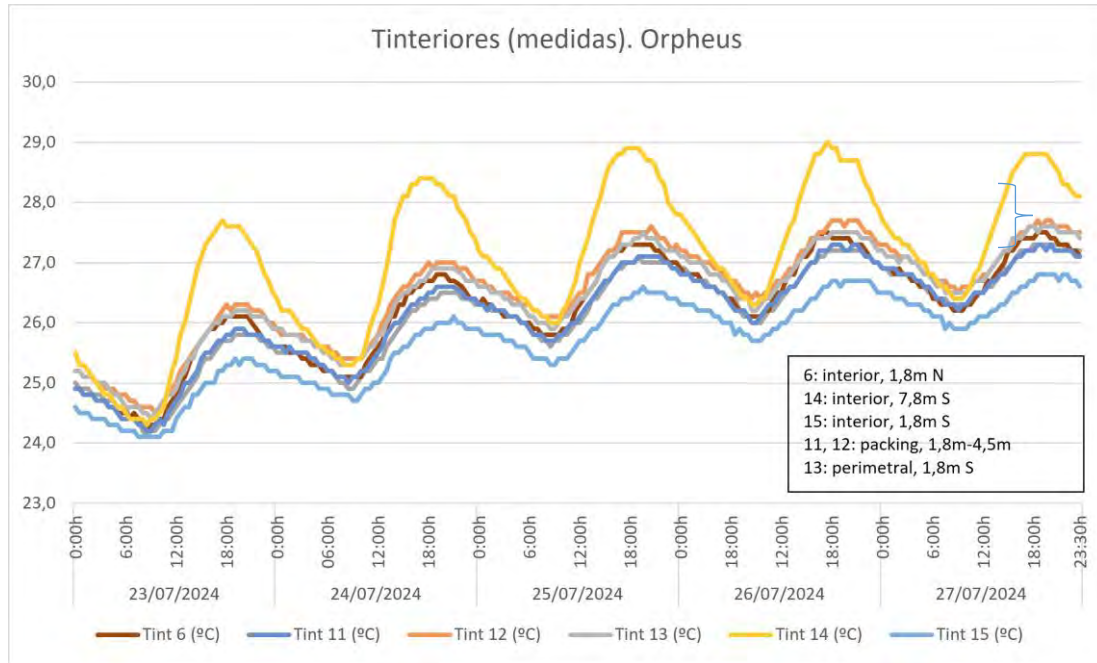


Figura 5. Evolución temperaturas interiores en la nave para condiciones de verano. Puntos de interés

Las oscilaciones de temperatura en los puntos interiores a 1,8m de altura durante un día son de unos 1,5 grados. En los puntos próximos a la cubierta las oscilaciones son mayores alcanzando los 2,5 grados, comportamiento totalmente lógico y que refuerza la validez de los datos.

- **Comparación con las temperaturas exteriores**

Respecto la comparativa con las temperaturas exteriores, en las **Figuras 6 y 7** se muestran las evoluciones para los 5 días de estudio de los puntos 11 y 14.

Las temperaturas exteriores varían entre los 19 °C y los 40 °C, con una oscilación entre la noche y el mediodía de 21 grados. Las temperaturas interiores en un punto a 1,8m de altura (punto 11), al ser las oscilaciones diarias muy bajas, se mantienen estables en la zona baja del rango de oscilación de la temperatura exterior.

Las tendencias son iguales en un punto próximo a la cubierta (punto 14), aunque la oscilación interior como se ha indicado anteriormente es mayor.

En ambos casos se puede observar la inercia de la nave; incluso en la última parte del periodo analizado, la temperatura exterior desciende ligeramente mientras que la temperatura interior continúa creciendo. El aire contenido en el interior de la nave, junto con el aislamiento de la envolvente y también la inercia de la solera aportan una estabilidad muy sostenida de la temperatura interior.

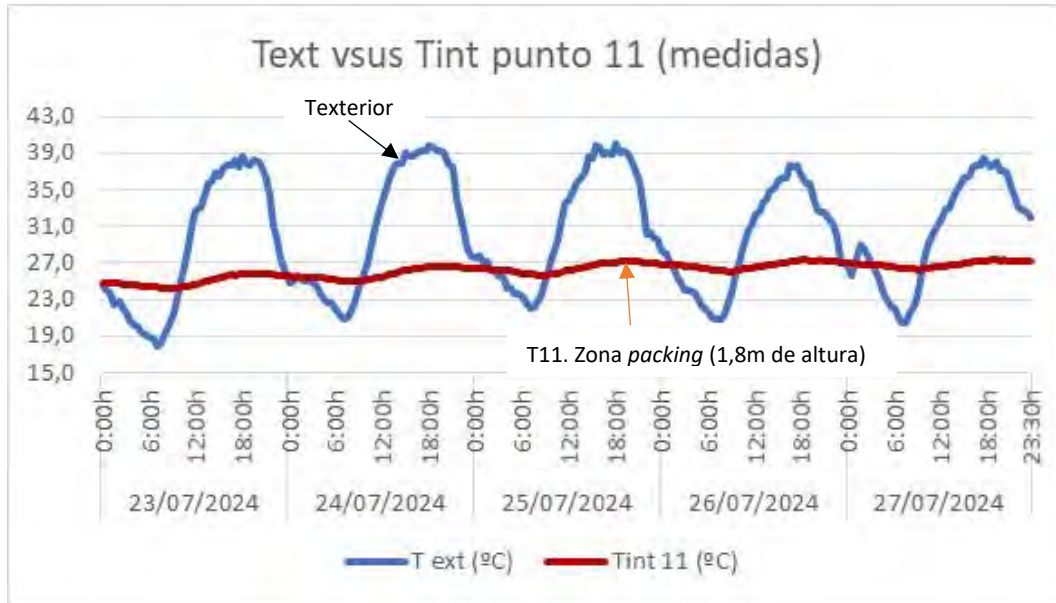


Figura 6. Evolución temperatura punto 11 respecto a temperatura exterior. Condiciones de verano

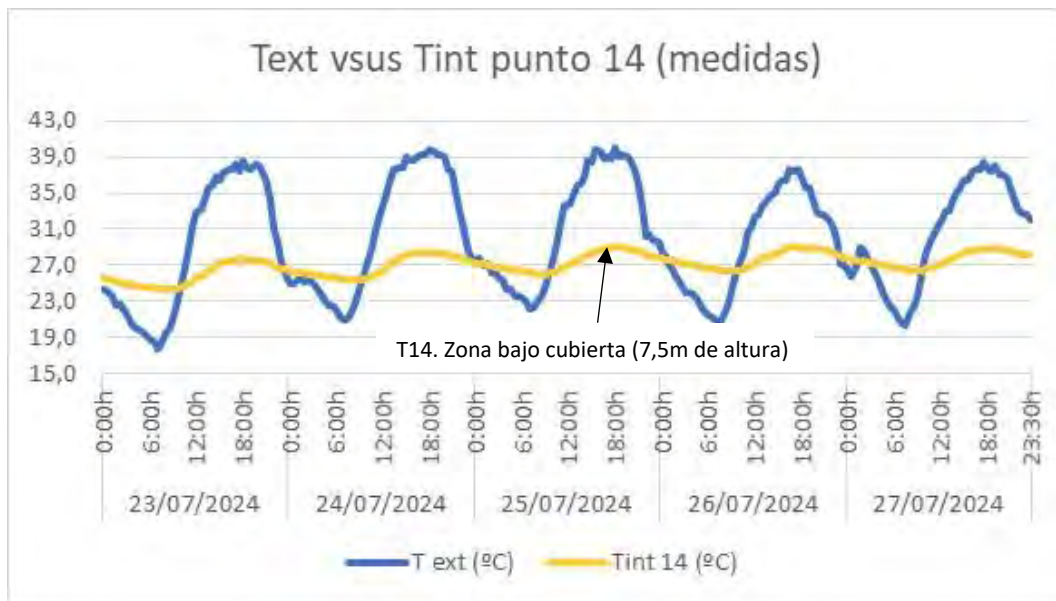


Figura 7. Evolución temperatura punto 14 respecto a temperatura exterior. Condiciones de verano

3.2. Análisis térmico en condiciones de invierno

En este caso se han considerado los días 15 al 19 de enero de 2025, que se corresponden con unas temperaturas exteriores entre -6°C y 13°C.

- **Distribución de temperaturas en el interior**

En la **Figura 8** se muestra la evolución de las temperaturas interiores para los 15 puntos de medida.

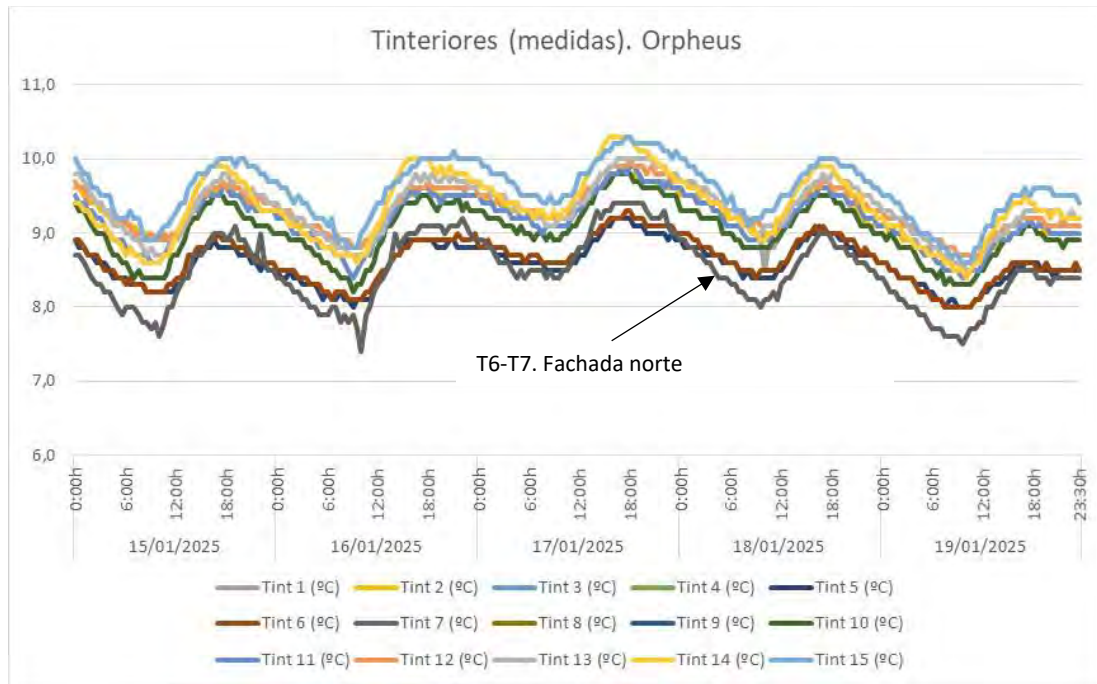


Figura 8. Evolución temperaturas interiores medidas en la nave para condiciones de invierno

Puede observarse que los puntos 6 y 7, que se corresponden con la zona central cercana a la fachada norte, tienen temperaturas aproximadamente 1°C por debajo del resto de puntos. No obstante, se mantiene el patrón de estabilidad observado en el caso de verano, de manera que se mantiene la selección de los mismos 6 puntos de interés para hacer el resto de análisis.

Centrándonos en dichos puntos, en la **Figura 9** puede observarse la evolución para los 5 días analizados. Prácticamente no se observa un descenso significativo de la temperatura interior, únicamente un ligero enfriamiento de unos 0,5 °C en los 5 días medidos, que podría considerarse despreciable o directamente asociado a la sensibilidad de los sensores de temperatura. El volumen de aire se mantiene entre 9 °C y 10 °C en la mayoría de los puntos durante todo el periodo analizado. El único punto que tiene temperaturas menores (1°C por debajo aproximadamente) es, como ya se ha indicado, el 6, asociado a la fachada norte de la nave.

Para estas condiciones de invierno no hay diferencias entre los puntos situados a 1,8m y el punto bajo cubierta situado a 7,5m.

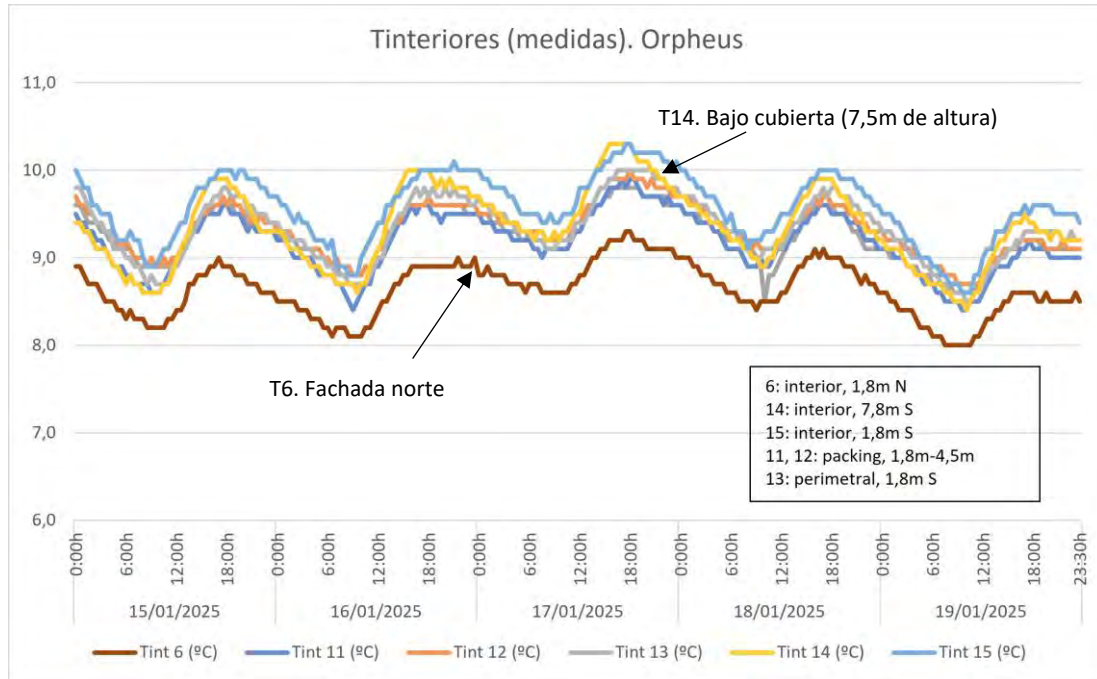


Figura 9. Evolución temperaturas interiores en la nave para condiciones de invierno. Puntos de interés

- **Comparación con la temperatura exterior**

Respecto la comparativa con las temperaturas exteriores, en las **Figuras 10 y 11** se muestran las evoluciones para los 5 días de estudio de los puntos 11 y 14. Se mantiene el comportamiento observado en condiciones de verano: las temperaturas interiores tienen oscilaciones diarias mínimas, y en este caso se mantienen estables en la zona alta del rango de oscilación de la temperatura exterior.

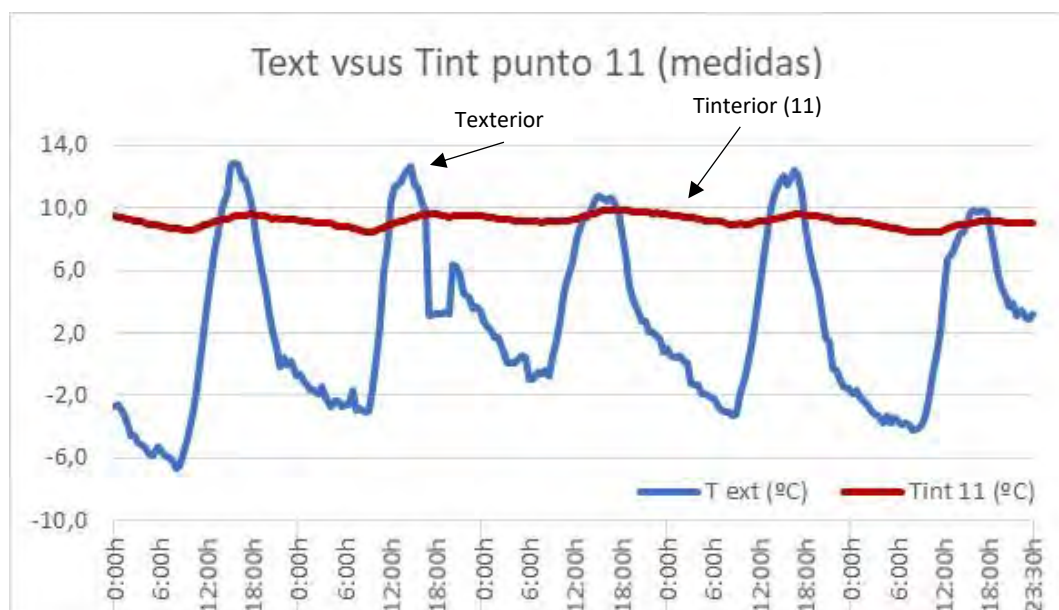


Figura 10. Evolución temperatura punto 11 respecto a temperatura exterior. Condiciones de invierno

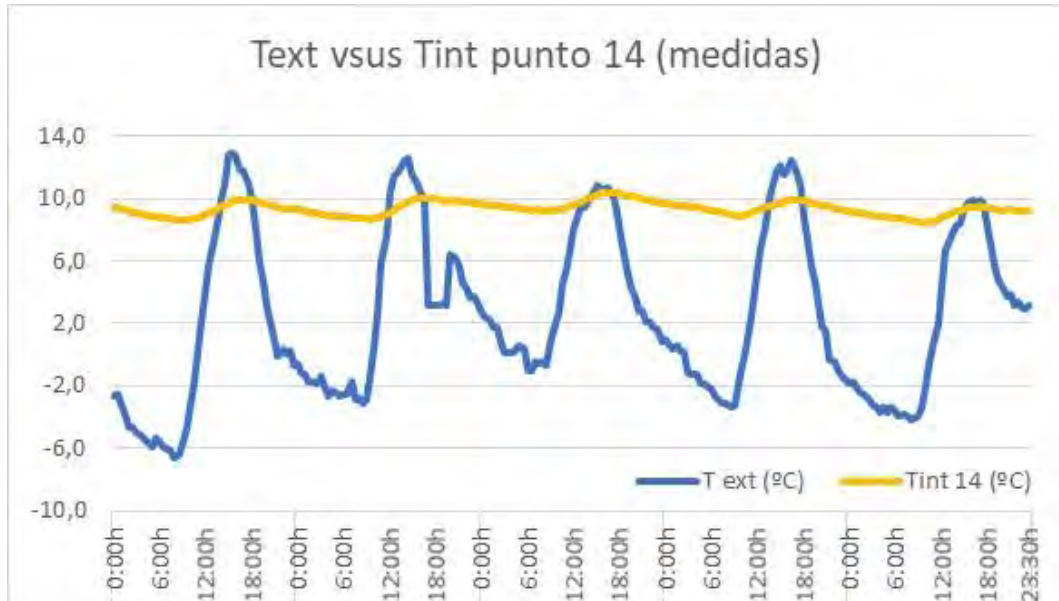


Figura 11. Evolución temperatura punto 14 respecto a temperatura exterior. Condiciones de invierno

3.3. Análisis térmico en condiciones intermedias

Por último, se ha considerado el caso de unas condiciones climáticas intermedias, correspondientes a los días 21 al 25 de abril de 2024. En este caso, las temperaturas exteriores se mueven entre los 0°C y los 18°C. En la **Figura 12**, se muestra la evolución de las temperaturas interiores para los puntos de interés de la nave.

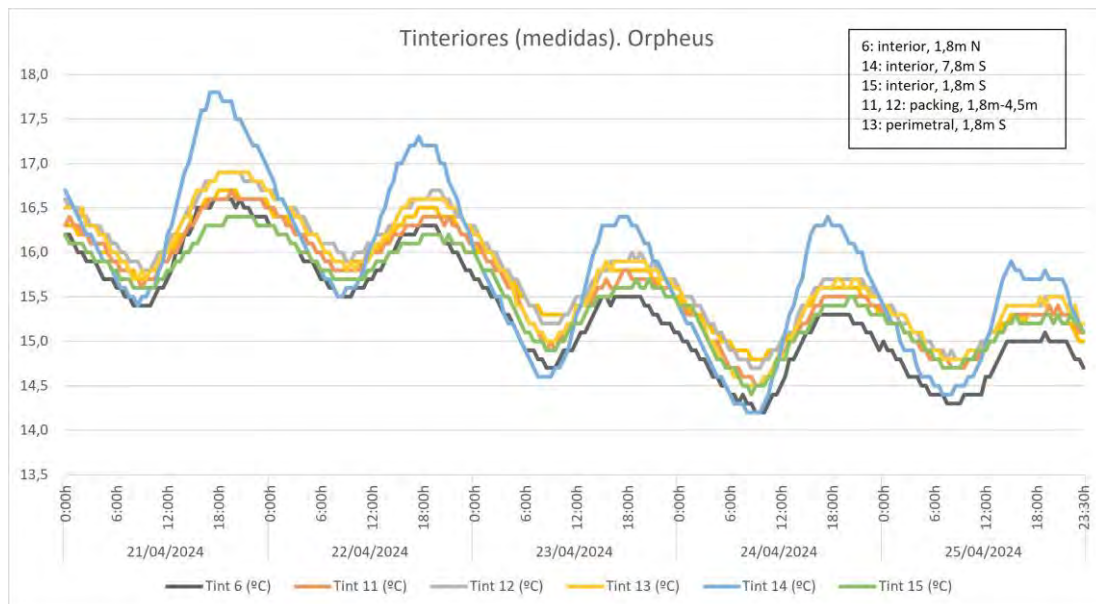


Figura 12. Evolución temperaturas interiores en la nave para condiciones intermedias. Puntos de interés

En este caso, la elevada oscilación térmica diaria exterior, junto con una radiación solar propia del mes de abril (bastante elevada), hace que las temperaturas interiores de la nave varíen más a lo largo del periodo de análisis. Así, puede observarse una variación diaria en los diferentes puntos de medida. Además, se comprueba como la nave se va enfriando ligeramente a lo largo de los días (unos 2 °C de media en los 5 días medidos). El volumen de aire alcanza una temperatura mínima de unos 14,5 °C, que se sitúa muy por encima de los valores mínimos de la temperatura exterior.

Puede observarse que los puntos 6 y 7, ubicados en la zona central cercana a la fachada norte, tienen temperaturas aproximadamente 1°C por debajo del resto. No obstante, se mantiene el patrón de estabilidad observado en el caso de verano, de manera que se mantiene la selección de los mismos 6 puntos de interés para hacer el resto de análisis.

Respecto la comparativa con las temperaturas exteriores, en las **Figuras 13 y 14** se muestran las evoluciones para los 5 días de estudio de los puntos 11 y 14. Se mantiene el comportamiento observado en condiciones de verano e invierno: las temperaturas interiores diarias oscilan ligeramente, y se mantienen estables en la zona alta del rango de oscilación de la temperatura exterior.

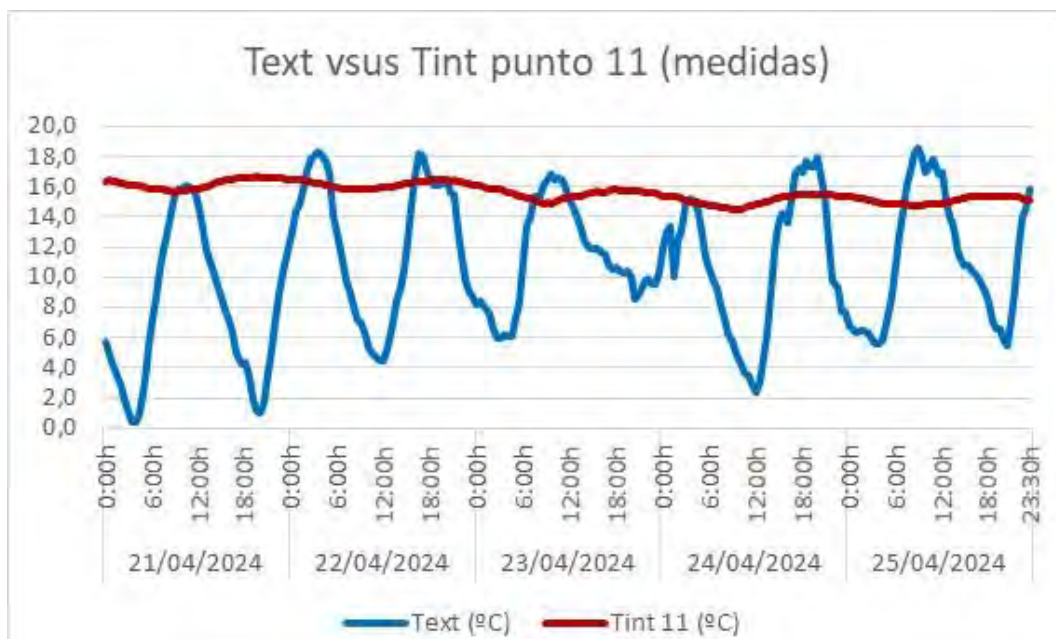


Figura 13. Evolución temperatura punto 11 respecto a temperatura exterior. Condiciones intermedias

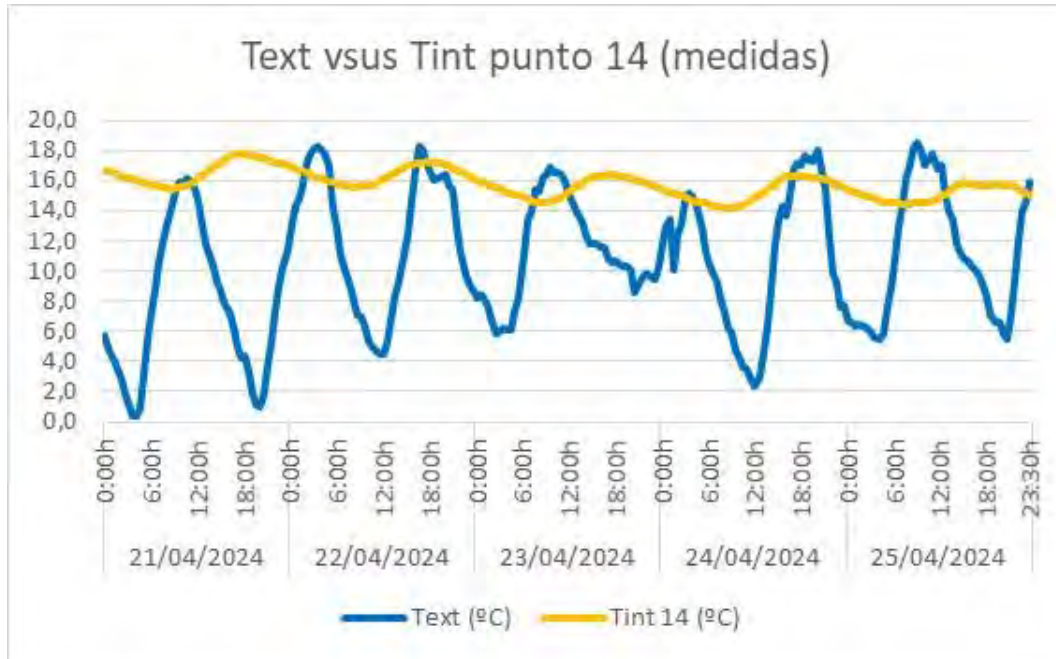


Figura 14. Evolución temperatura punto 14 respecto a temperatura exterior. Condiciones intermedias

3.4. Evolución anual de las temperaturas medias de la nave

Para finalizar el estudio térmico de los datos experimentales, se ha analizado la variación de las temperaturas exteriores frente a las temperaturas interiores en la zona de *packing* (punto 11) a una altura de 1,8 metros. Para ello, se ha graficado la evolución comparada de las temperaturas medias diarias contra las temperaturas medias exteriores para un periodo de 1 año (del 1 de abril de 2024 al 31 de marzo de 2025). Los resultados se presentan en la **Figura 15 y 16**.

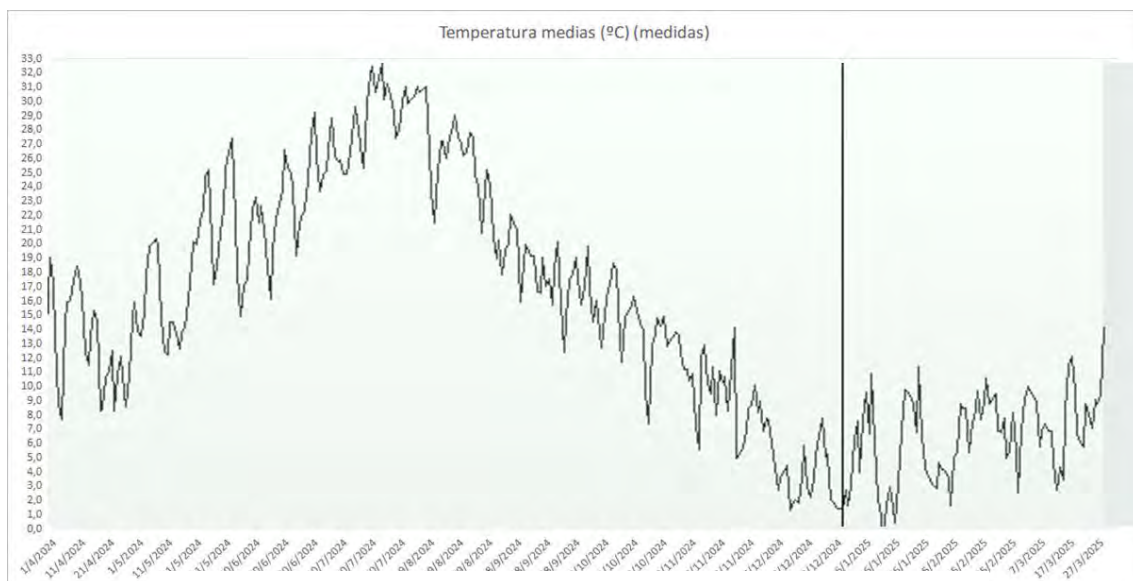


Figura 15. Evolución temperatura exterior media diaria

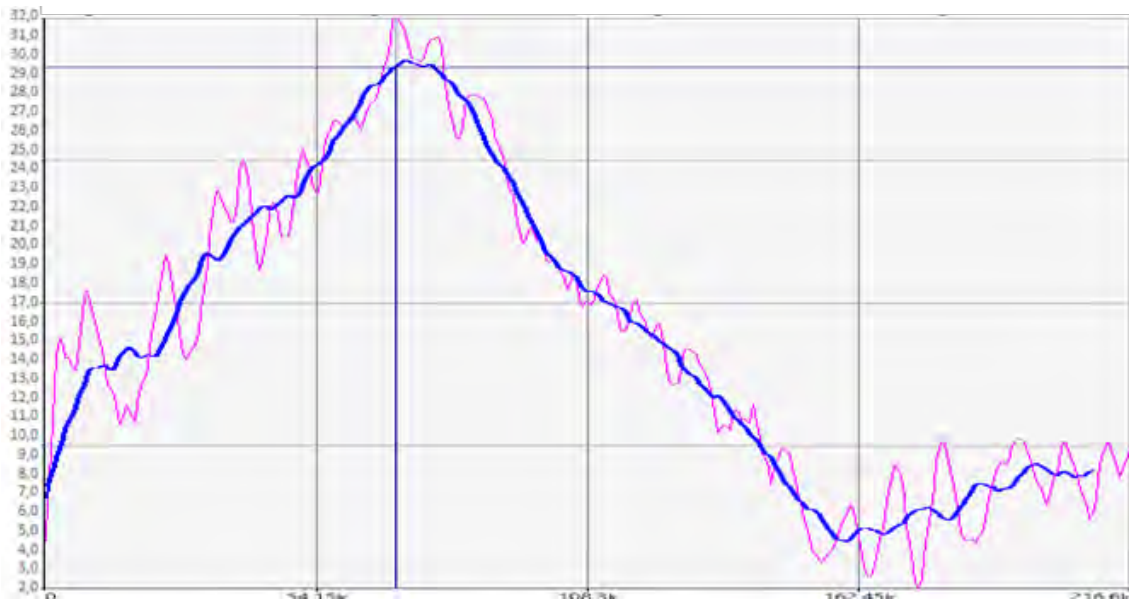


Figura 16. Evolución temperatura exterior media

La temperatura media exterior alcanza los 31º y la mínima 2º.

En la Figura 17, se compara la evolución de la temperatura interior con la exterior.

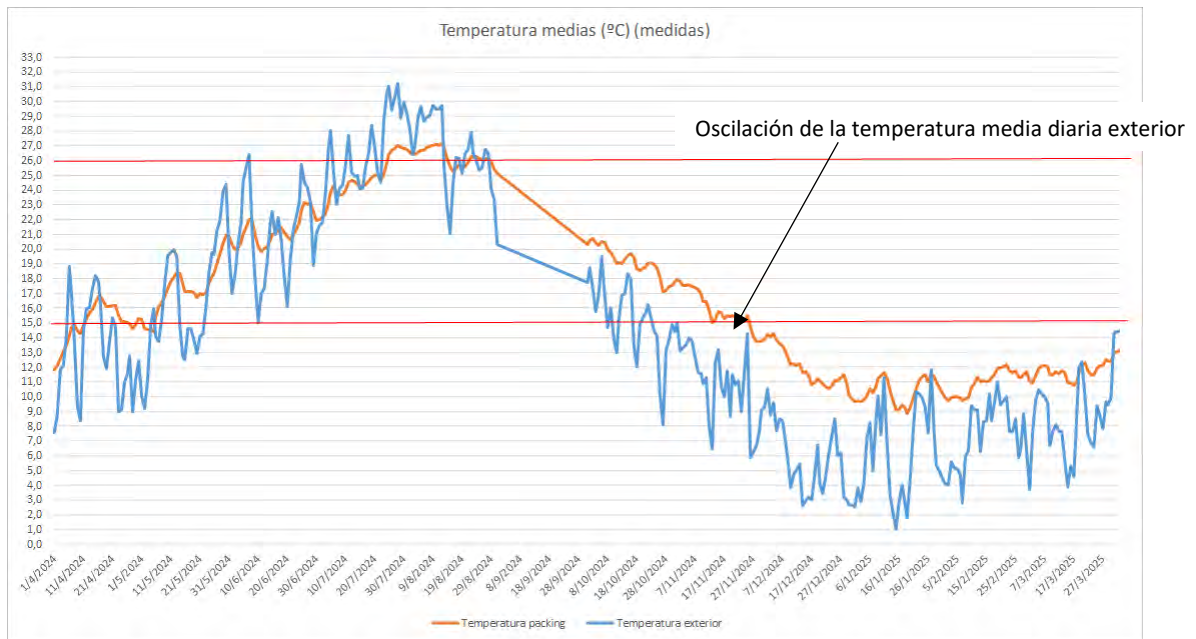


Figura 17. Evolución anual temperatura media interior packing contra temperatura media exterior.

Como puede observarse, las temperaturas interiores siguen la evolución de las exteriores, pero con un comportamiento mucho más atenuado. Las temperaturas exteriores medias diarias presentan cambios importantes entre días consecutivos, que la nave no reproduce, aunque sí sigue la tendencia general de aumento o descenso térmico. Esto confirma que la nave posee

una elevada inercia térmica, junto con pocas cargas interiores y una baja incidencia de la radiación solar, por lo que su comportamiento es el esperable.

Las temperaturas medias diarias de la nave oscilan entre un mínimo de aproximadamente 8,8 °C en el mes de enero y un máximo de unos 27 °C en los meses de julio y agosto.

Desde finales de noviembre hasta aproximadamente mediados de abril, la temperatura media interior de la nave es inferior a 15 °C (franja inferior marcada en rojo en la Figura 17). En cambio, en la franja superior, únicamente se superan los 26 °C durante parte de los meses de julio y agosto (franja superior marcada en rojo en la Figura 17).

3.5. Análisis de la calidad del aire interior

Para finalizar el estudio de los datos experimentales, se ha analizado el nivel de CO₂ interior de la nave para un período de un año (01/04/24 al 31/03/25). Los puntos considerados han sido: el 11 y el 12 como característicos del *packing* (altura 1,8m y 4,5m); el 14 y el 15 como característicos de la zona central (altura 1,8m y 7,5m); y el punto 7 como característico de la zona perimetral (altura 1,8m). Los resultados se muestran en la **Figura 18 y 19**.

Puede verse que, independientemente de la época del año o del punto considerado, las condiciones de calidad del aire interior siempre son excelentes, manteniéndose los niveles de CO₂ entre 350 y 500 ppm. Se producen oscilaciones diarias, que siguen las oscilaciones características del aire exterior, relacionadas con las variaciones en la radiación solar, además de responder a los períodos de ocupación de la nave. No obstante, en ningún momento la nave presenta niveles de CO₂ fuera del rango óptimo de calidad.



Figura 18. Evolución anual CO₂ para los puntos 11, 12, 14 y 15

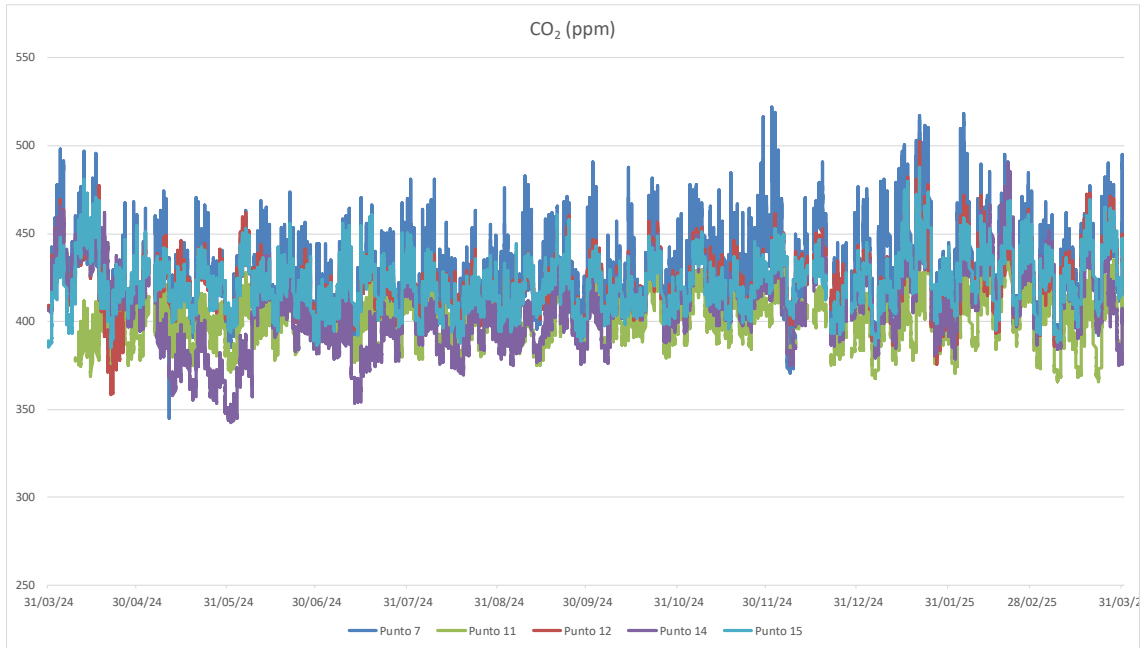


Figura 19. Evolución anual CO₂ comparada para los puntos 7, 11, 12, 14 y 15

3.6. Conclusiones del análisis de datos experimentales

El análisis de los datos experimentales de temperatura recogidos en la nave de Marchamalo 2B permiten inferir las siguientes conclusiones:

- Las temperaturas interiores en las 3 condiciones climáticas estudiadas (verano, invierno y época intermedia) son muy uniformes. Únicamente se detectan pequeñas diferencias en las zonas más cercanas a la fachada norte (puntos 6, 7) y en el punto a mayor altura (punto 14), debido a su cercanía con la cubierta de la nave. No obstante, estas diferencias son poco significativas (entre 1°C-2°C de diferencia en general).

Para determinar el comportamiento térmico de la nave, se pueden tomar como puntos representativos:

- punto 6 como representativo de la zona interior, fachada norte
 - punto 15 por zona interior fachada sur
 - punto 14 como zona de influencia de cubierta
 - puntos 11 y 12 como representativos de la zona *packing*
 - punto 13 como representativo de la zona perimetral, fachada sur.
- La uniformidad térmica registrada en el interior de la nave permite hacer la recomendación que, en caso de monitorizarse en un futuro edificios de características similares, la instalación de sensores se centre en las zonas ocupadas y en aquellas zonas perimetrales en contacto con los muelles de carga. Esto permitirá reducir el número de sensores a instalar y reducirá también el volumen de datos a almacenar y gestionar.

Por lo tanto, en análisis posteriores, nos centraremos en el análisis de estos puntos.

- En condiciones de verano, las temperaturas máximas interiores registradas son de unos 27,5°C para la zona de *packing* (para una temperatura exterior de 40°C). Para época intermedia, las temperaturas mínimas registradas son de unos 14,5°C para una temperatura exterior de 0°C.
- En condiciones de invierno, con temperaturas exteriores mínimas de -6°C, las temperaturas interiores no bajan de los 9°C en la zona de *packing*.
- Un efecto muy importante que se consigue en esta nave es que la temperatura interior siempre está “cerca” de las mínimas exteriores en verano y “cerca” de las máximas exteriores en invierno. Es decir, se consiguen atenuar las temperaturas exteriores a través de tres aspectos: del aislamiento térmico de la envolvente; de la inercia térmica del aire contenido interiormente (pocas infiltraciones); y de la inercia de la solera, que transfiere la estabilidad de temperaturas del terreno.

Respecto al nivel de calidad de aire interior, el análisis de los datos experimentales de CO₂ recogidos en la nave de Marchamalo 2B permiten indicar que la calidad del aire en las diferentes zonas, independientemente del nivel de ocupación o época del año, es excelente, encontrándose siempre en el rango de 350-500 ppm.

4. Creación del modelo digital de la nave

4.1. Herramienta de simulación empleada

El gemelo virtual de la nave se ha realizado empleando CFD mediante el software Ansys Fluent. Este software es el utilizado habitualmente en estudios de las características del presente, y es el mismo que se empleó en el convenio previo entre la UPC y Montepino, para el estudio de la nave de Marchamalo-Inditex. Con este tipo de simulaciones fluidodinámicas, los resultados son muy detallados, pudiendo obtenerse principalmente:

- Distribución de temperaturas en los diferentes puntos de la nave, necesaria para comprobar las condiciones de confort térmico interior. A diferencia de los softwares de simulación energética (como DesignBuilder o similares), en este caso podemos obtener resultados detallados de cada punto, en lugar de asumir una única (o unas pocas) zonas y definir las con su temperatura media.
- Flujos de aire en el interior de la nave, vinculados a infiltraciones o a estrategias de ventilación que podrían utilizarse para reducir bien la demanda térmica del edificio, o bien la temperatura interior. Este tipo de resultados no pueden obtenerse con los softwares de simulación energética existentes en el mercado, de manera que es necesario emplear técnicas de CFD.

Este nivel de detalle en las simulaciones tiene como contrapartida la realización de modelos complejos, con una cantidad de elementos muy elevada (en este caso, una malla formada por aproximadamente 4 millones de elementos de cálculo, en contraposición a los modelos energéticos, formados habitualmente por un solo elemento por zona). Esto supone un elevado

tiempo de cálculo, lo que limita los períodos que puede abarcar una simulación dinámica (habitualmente poco tiempo, entre 72 y 120 horas de operación de la nave), a diferencia de los modelos energéticos, que permiten hacer simulaciones horarias anuales, aportando resultados menos exactos.

4.2. Modelo virtual realizado

En el modelo realizado, se ha dividido la superficie de la nave en tres zonas diferenciadas: una zona de estanterías, una zona de empaquetado (en la cual se ha asignado prácticamente la totalidad de la ocupación de la nave) y una zona perimetral libre de obstáculos (ver **Figura 20** y **21**).

Se ha creado una malla en base a elementos tetraédricos y hexaédricos, y se han aplicado las condiciones de contorno correspondientes a la nave estudiada. La malla se ha optimizado, realizando pruebas de independencia de malla, obteniéndose resultados satisfactorios.

Geometría del modelo virtual desarrollado:

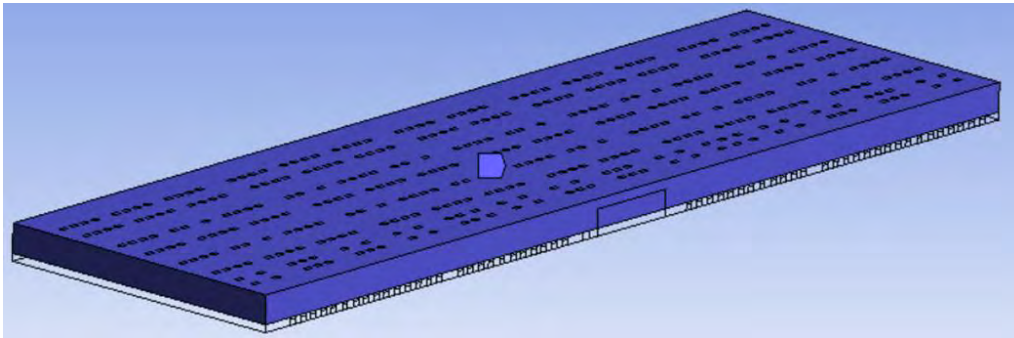


Figura 20. Vista general del modelo virtual realizado

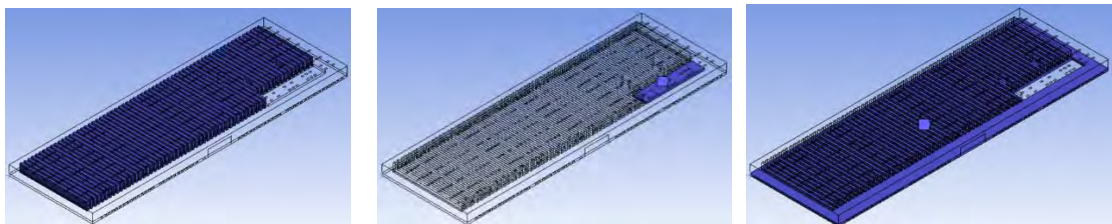


Figura 21. Vista del modelo virtual. (1) Área de estanterías, (2) Área de empaquetado, (3) Área perimetral

4.3. Validación del modelo digital

- **Período de tiempo escogido para la validación del modelo CFD**



Los modelos virtuales deben validarse contrastando los resultados obtenidos contra datos experimentales. En el caso de los modelos CFD, es habitual realizar dicha validación en las condiciones críticas de temperatura, que suelen extenderse a unos pocos días (habitualmente entre 4 y 7 días).

En el caso que nos ocupa, las condiciones escogidas para la validación han sido las del periodo crítico de verano, comprendido entre los días 21 al 31 de julio de 2024 (con temperaturas máximas registradas de 40 °C). El periodo de verano es el crítico a nivel de simulación, ya que es en el que la modelización de la radiación solar tiene más peso.

Los otros dos periodos analizados experimentalmente (el período de invierno y el periodo intermedio) se consideran equivalentes, de manera que si el modelo virtual reproduce fielmente las condiciones reales de la nave en el primer caso, éste se considera validado.

Una vez esté el modelo validado, será posible seleccionar cualquier día dentro de los periodos de interés para hacer simulaciones en las que comprobar la afectación de los parámetros de diseño en el comportamiento de la nave.

4.4. Resultados del proceso de validación

Para realizar la validación del modelo virtual, se procede a comparar los resultados obtenidos mediante simulación con los resultados medidos mediante los equipos instalados en la nave. Dicha validación se realiza en base a los datos de temperatura, siguiendo los estándares de validación de modelos similares como los propuestos por la asociación ASHRAE.

Debido a la gran uniformidad en las temperaturas, detectada en el análisis de los datos experimentales, los valores de validación se han centrado en los puntos de interés seleccionados en el análisis experimental. A continuación, se presentan las comparativas entre valores medidos y experimentales para la zona central del *packing* (punto 11), en el período de verano (días 21 al 31 de julio de 2024).

En la **Figura 22** puede verse como los resultados de la simulación reproducen el comportamiento térmico de la nave, tanto a nivel de las oscilaciones de temperatura diarias como en relación al ligero incremento de temperatura acumulado en todo el periodo, que ya se había detectado en el análisis de los datos experimentales.

Se detecta una variación entre los datos simulados y los datos medidos de un máximo 1°C - 1,5°C, estando los valores del modelo siempre por encima de los reales medidos. Esta variación está dentro del rango considerado como aceptable para la validación de modelos energéticos y fluidodinámicos según ASHRAE, que se sitúa en un $\pm 5\%$. Este comportamiento se reproduce también en el resto de los puntos de interés de la nave seleccionados con anterioridad.



Figura 22. Temperaturas simuladas vsus reales para el punto 11 del packing. Caso validación verano

4.5. Conclusiones de la validación del modelo virtual de la nave

El análisis de los datos experimentales de temperatura recogidos en la nave de Marchamalo 2B, respecto a los datos obtenidos mediante simulación, permiten inferir las siguientes conclusiones:

- Las diferencias entre las temperaturas medidas y las temperaturas simuladas están alrededor del 10% (aproximadamente 1°C). El modelo virtual, en general, recoge correctamente las tendencias de las temperaturas de la nave.
- El modelo tiende a sobreestimar ligeramente las temperaturas interiores. Sin embargo, este comportamiento está dentro de lo esperable y no se considera relevante.
- Se confirma la uniformidad en las temperaturas interiores, de manera que se mantendrá el análisis de los puntos de interés antes indicados, en el proceso de optimización posterior.
- Dados los resultados obtenidos y presentados, se considera el modelo virtual validado, de manera que puede procederse a la fase de optimización del diseño de la nave. Para esta fase, se procederá a comparar los resultados de simulación del caso base (el presentado en este apartado), con los resultados de simulación con variaciones en algunos parámetros del modelo virtual.

5. Optimización del diseño de la nave

5.1. Objetivos del estudio de optimización

Las simulaciones a realizar pretenden, a través de la modificación de ciertos parámetros de diseño de la nave, conseguir mejorar las condiciones de temperatura interior para, por una parte, incrementar los niveles de confort térmico y, por otro, reducir las potenciales demandas de climatización de la nave. También se busca verificar la posibilidad de optimizar el coste de construcción de la nave sin comprometer significativamente sus condiciones de confort.

Para ello, se realizará, para el día/s seleccionados, una comparativa de las temperaturas medias interiores en los puntos representativos, para el caso base y los casos modificados.

5.2. Listado de casos a simular

Se han simulado los siguientes casos:

Modificación del aislamiento térmico de la nave:

- Substitución del cerramiento actual de fachadas ($U_{base} = 0,439 \text{ W/m}^2\text{K}$) y cubierta ($U_{base} = 0,553 \text{ W/m}^2\text{K}$) por un nuevo cerramiento con aislamiento térmico reforzado en fachadas ($U_{mejorado} = 0,338 \text{ W/m}^2\text{K}$) y cubierta ($U_{mejorado} = 0,326 \text{ W/m}^2\text{K}$). Comparativa de temperaturas medias interiores alcanzadas en la zona de *packing* para los casos de verano e invierno.
- Substitución del cerramiento actual de fachadas ($U_{base} = 0,439 \text{ W/m}^2\text{K}$) y cubierta ($U_{base} = 0,553 \text{ W/m}^2\text{K}$) por un nuevo cerramiento con aislamiento térmico menor ($U_{inferior} = 0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$). Comparativa de temperaturas medias interiores alcanzadas en la zona de *packing* para los casos de verano e invierno.

Modificación de los lucernarios:

- Modificación del caso base (con un 5% de lucernarios), disminuyendo el porcentaje hasta un 3% (**Figura 25**). Comparativa de temperaturas medias interiores alcanzadas en la zona de *packing* para los casos de verano e invierno.
- Modificación del caso base (con un 5% de lucernarios), aumentando el porcentaje hasta un 7% y añadiendo una franja perimetral de policarbonato en la parte superior de las fachadas (**Figura 27 y 28**). Comparativa de temperaturas medias interiores alcanzadas en la zona de *packing* para los casos de verano e invierno.

5.3. Caso crítico verano

El período de tiempo considerado para las simulaciones de verano es el comprendido entre el 21 y el 25 de julio de 2024. Se muestran los resultados de las temperaturas medias para el punto central del *packing* (punto 12).

5.3.1. Incremento del aislamiento térmico en fachada y cubierta

Transmitancia térmica panel de fachada base: 0,439 W/m²·K

Transmitancia térmica panel cubierta base: 0,553 W/m²K

Transmitancia térmica nuevo panel de fachada: 0,338 W/m²·K

Transmitancia térmica nuevo panel cubierta: 0,326 W/m²K

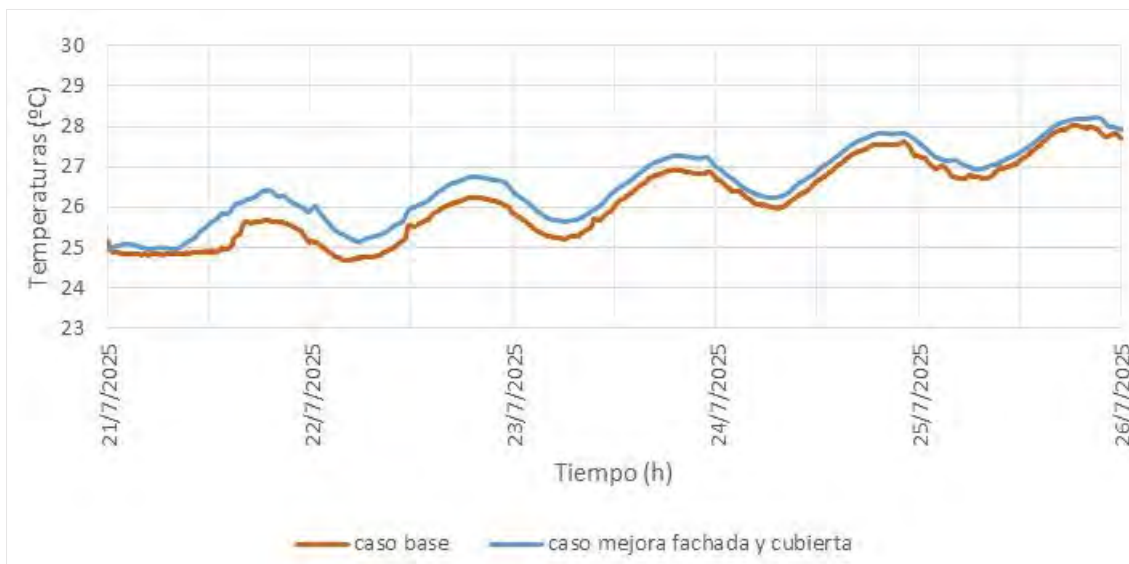


Figura 23. Temperaturas caso base vsus mejora aislamiento en fachada y cubierta para el punto 11. Caso verano

5.3.2. Reducción del aislamiento térmico en fachada y cubierta

Transmitancia térmica panel de fachada base: 0,439 W/m²·K

Transmitancia térmica panel cubierta base: 0,553 W/m²K

Transmitancia térmica nuevo panel de cubierta y fachada: 0,65 W/m²·K

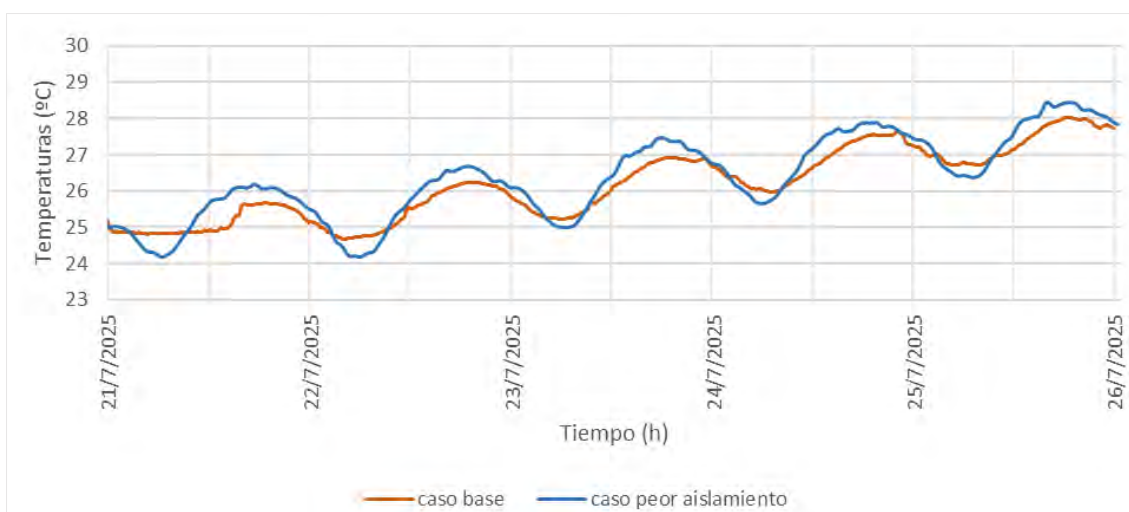


Figura 24. Temperaturas caso base vsus peor aislamiento en cubierta y fachada para el punto 11. Caso verano

Discusión modificaciones aislamiento térmico en condiciones de verano

En condiciones críticas de verano, el incremento del aislamiento de fachada y cubierta supone un leve sobrecalentamiento en la zona de *packing*, tanto de día como de noche, de entre 0,5°C y 1°C aproximadamente (**Figura 23**).

Por su parte, un peor aislamiento en fachada y cubierta (de un 50% menos aproximadamente) no supone un cambio substancial en las condiciones de confort térmico de la zona de *packing*. Se observa un ligero sobrecalentamiento durante las horas diurnas (en todos casos menor de 1°C) (**Figura 24**). Este ligero sobrecalentamiento se compensa con unas temperaturas inferiores en las horas nocturnas, debido a que se producen mayores pérdidas por transmisión a través de los cerramientos, al ser su transmitancia térmica mayor.

Como resumen, podría decirse que no se observa un sobrecalentamiento significativo en verano al modificar el aislamiento de la envolvente. Por lo tanto, el potencial efecto negativo en condiciones críticas de verano de incrementar el aislamiento térmico no se produce, ni de manera puntual en las zonas de interés ni de manera global por zonas amplias. Sería posible reducir el aislamiento térmico sin pérdida importante de confort en verano

5.3.3. Reducción de la superficie translúcida en la envolvente

Caso base: 5% superficie de lucernarios

Caso modificado: 3% superficie de lucernarios

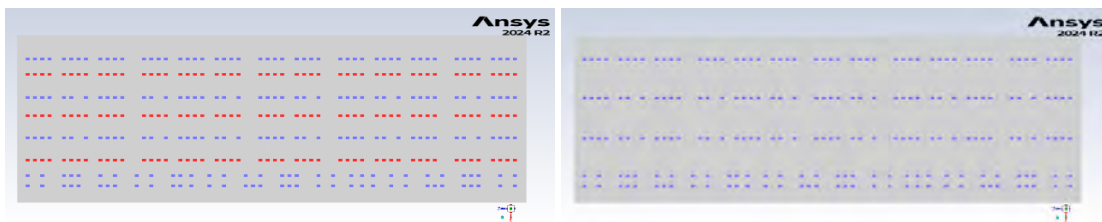


Figura 25. Imagen en planta del modelo base de la nave (5% lucernarios) vsus modelo con superficie translúcida reducida (3% lucernarios)

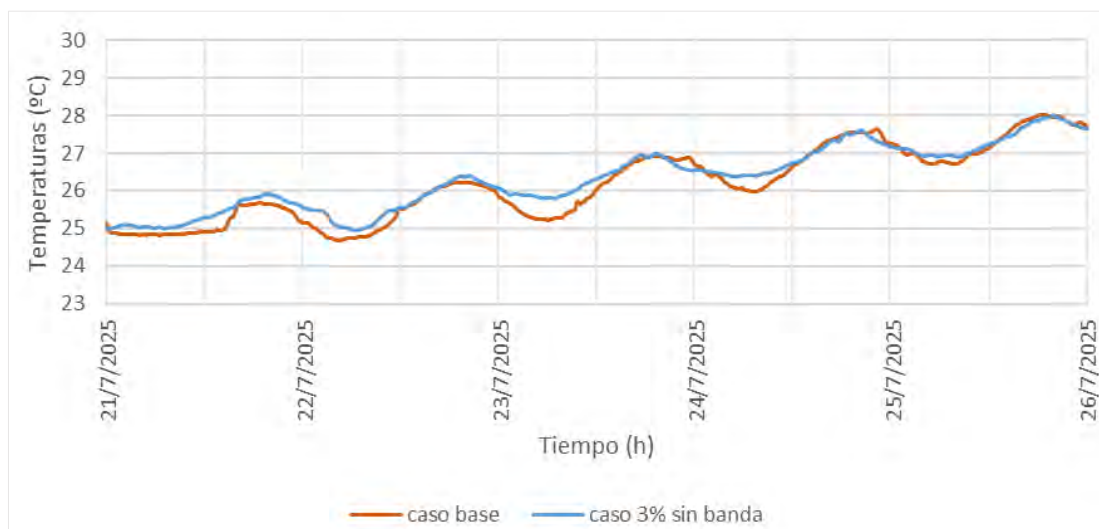


Figura 26. Temperaturas caso 5% lucernarios vsus 3% lucernarios para el punto 11. Caso verano

5.3.4. Aumento de la superficie translúcida en la envolvente (lucernarios + banda perimetral)

Caso base: 5% superficie de lucernarios

Caso modificado: 7% superficie de lucernarios + banda perimetral en fachadas

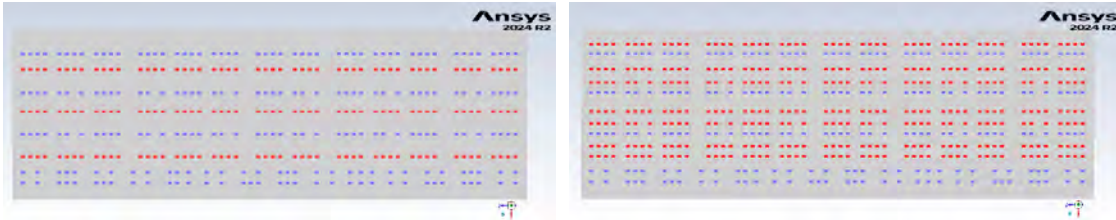


Figura 27. Imagen en planta del modelo base de la nave (5% lucernarios) vsus modelo con superficie translúcida aumentada (5% lucernarios)

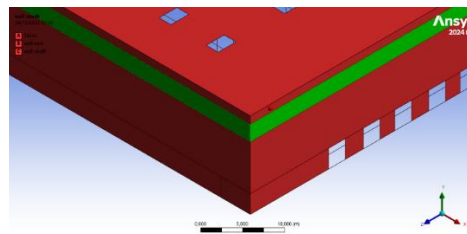


Figura 28. Vista modelo con superficie translúcida aumentada (banda perimetral)



Figura 29. Temperaturas caso base (5% lucernarios) vsus 7% lucernarios y vsus 7% lucernarios + banda perimetral para el punto 11. Caso verano

Discusión modificaciones superficie translúcida de la envolvente en condiciones de verano

En condiciones críticas de verano, la reducción de la superficie de lucernarios (de un 5% a un 3%) provoca que el comportamiento térmico de la nave (en concreto de la zona de *packing*) sea más estable, con menores oscilaciones a lo largo del día (**Figura 26**). Esto es debido a la menor radiación solar incidente, provocada por la disminución de la superficie translúcida de cubierta.

Por otra parte, en condiciones de verano aumentar la superficie translúcida (del 5% al 7% de lucernarios y añadiendo una banda perimetral translúcida en todas las fachadas) provoca un sobrecalentamiento de la nave, con incrementos de hasta 3°C en la zona de *packing*, así como un incremento de las oscilaciones térmicas a lo largo del día (**Figura 29**). En este caso, el efecto de la radiación solar incidente supera al de la transmisión a través de los cerramientos opacos. Los mayores sobrecalentamientos debido al incremento de la superficie translúcida, pues, se dan en las horas solares con mayor incidencia de radiación.

Como resumen, podría decirse que el incremento de superficie translúcida en la envolvente sí que supone un potencial problema de sobrecalentamiento de la nave en condiciones de verano, con lo cual no parece conveniente desde el punto de vista de confort térmico realizar esta modificación en la envolvente.

5.4. Caso crítico invierno

En este caso se han considerado los días 13 al 17 de enero de 2025. Los resultados presentados son los mismos que para el caso de verano, comparando el caso base simulado con los casos modificados con el aislamiento mejorado en cubierta y fachada, para el punto central de la zona de *packing* (punto 11).

5.4.1. Incremento del aislamiento térmico en fachada y cubierta

Transmitancia térmica panel de fachada base: 0,439 W/m²·K

Transmitancia térmica panel cubierta base: 0,553 W/m²·K

Transmitancia térmica nuevo panel de fachada: 0,338 W/m²·K

Transmitancia térmica nuevo panel cubierta: 0,326 W/m²·K

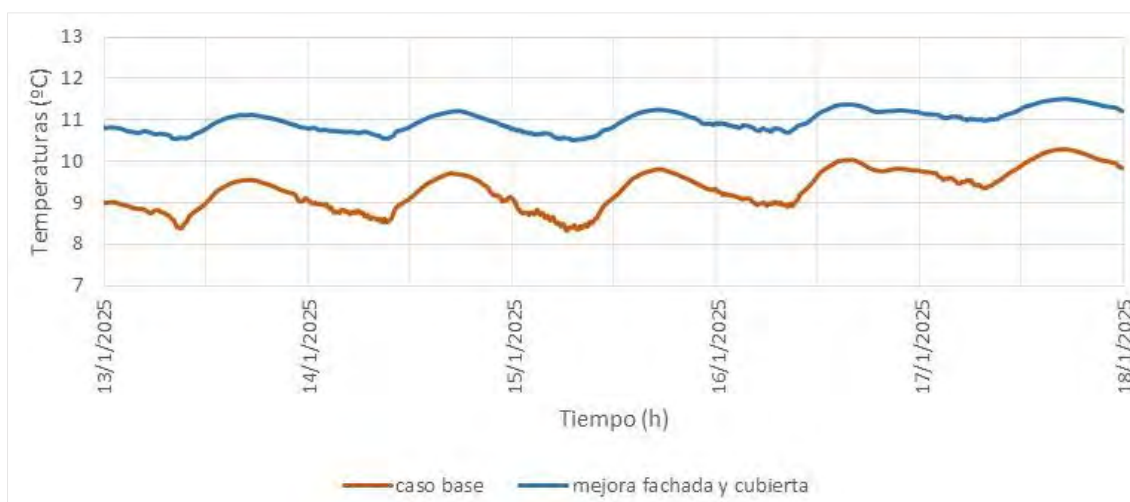


Figura 30. Temperaturas caso base vsus mejora aislamiento en fachada y cubierta para el punto 11.
Caso invierno

5.4.2. Reducción del aislamiento térmico en fachada y cubierta

Transmitancia térmica panel de fachada base: $0,439 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Transmitancia térmica panel cubierta base: $0,553 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Transmitancia térmica nuevo panel de cubierta y fachada: $0,65 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$



Figura 31. Temperaturas caso base vsus peor aislamiento en cubierta y fachada para el punto 11. Caso invierno

Discusión modificaciones aislamiento térmico en condiciones de invierno

En condiciones críticas de invierno, el incremento del aislamiento de fachada y cubierta supone un comportamiento más estable de la nave, con menores oscilaciones térmicas entre el día y la noche. También supone un aumento de las temperaturas medias de la nave de entre 1°C - $1,5^{\circ}\text{C}$ respecto al caso base (con mayores incrementos durante las horas nocturnas) (**Figura 30**).

Por su parte, una reducción del aislamiento en fachada y cubierta produce un comportamiento térmico con mayores oscilaciones. Al reducir el aislamiento, la nave se enfría algo más durante la noche (apareciendo diferencias de temperatura respecto al caso base de 1°C aproximadamente), mientras que durante el día la nave recupera temperatura debido a la radiación solar, de manera que la temperatura solo cae aproximadamente unos $0,5^{\circ}\text{C}$ respecto a la del caso base (**Figura 31**).

Como resumen, podría decirse que, en condiciones de invierno, es posible reducir el aislamiento térmico de la envolvente sin comprometer excesivamente el confort diurno, mientras que las condiciones durante la noche empeoran de manera más acusada.

5.4.3. Reducción de la superficie translúcida en la envolvente

Caso base: 5% superficie de lucernarios

Caso modificado: 3% superficie de lucernarios



Figura 32. Temperaturas caso 5% lucernarios vsus 3% lucernarios para el punto 11. Caso invierno

5.4.4. Aumento de la superficie translúcida en la envolvente (lucernarios + banda perimetral)

Caso base: 5% superficie de lucernarios

Caso modificado: 7% superficie de lucernarios + banda perimetral en fachadas

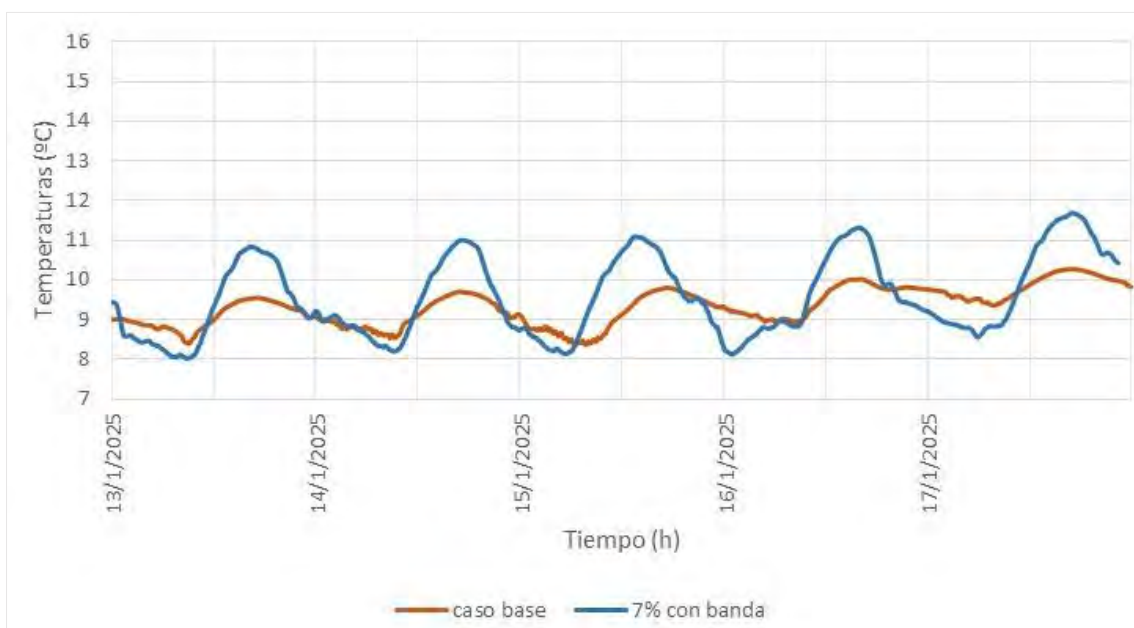


Figura 33. Temperaturas caso base (5% lucernarios) vsus 7% lucernarios + banda perimetral para el punto 11. Caso invierno

Discusión modificaciones superficie translúcida de la envolvente en condiciones de invierno

En condiciones críticas de invierno, la reducción de la superficie de lucernarios (de un 5% a un 3%) provoca que el comportamiento térmico de la nave (en concreto de la zona de *packing*) sea más estable, con menores oscilaciones a lo largo del día (**Figura 32**). Esto es debido a la menor radiación solar incidente, provocada por la disminución de la superficie translúcida de cubierta. Además, al tener menor superficie con aislamiento térmico bajo, las temperaturas medias se ven afectadas, observándose un incremento de entre 1°C y 2,5°C aproximadamente respecto al caso base, lo que supone una mejora en las condiciones térmicas de la zona de *packing*.

El caso con banda perimetral y 7% de lucernarios empeora la situación respecto al caso con un 3% de lucernarios. Al haber más pérdidas, en situación de ausencia de radiación solar, la temperatura media disminuye (entre 0,5°C y 1°C aproximadamente), mientras que durante el día, debido al aumento de la radiación solar incidente, las temperaturas aumentan en 1°C aproximadamente respecto al caso base (**Figura 33**). Por otro lado, el comportamiento pasa a ser más oscilante a lo largo del día, al seguir la radiación solar; el caso con menor superficie translúcida es mucho más estable a nivel de temperaturas.

Como resumen, podría decirse que el incremento de superficie translúcida en la envolvente podría mejorar ligeramente las condiciones térmicas interiores en presencia de radiación solar, pero las empeora en ausencia de esta.

6. Conclusiones generales y recomendaciones

A continuación, se resumen las conclusiones generales a que se ha llegado al finalizar el estudio: Respecto la **metodología a seguir**, la opción de realizar una monitorización en continuo unida a la creación de un gemelo virtual de la nave se ha comprobado como adecuada para los objetivos planteados.

El análisis de los datos experimentales tiene un peso fundamental en el estudio. No solo para realizar un seguimiento continuo de las condiciones térmicas de la nave, sino como herramienta necesaria para validar los modelos digitales. Con el estudio experimental, se han podido extraer las siguientes conclusiones en relación a la nave:

- Las temperaturas interiores en la nave son muy uniformes, independientemente de la época del año estudiada. Únicamente se detectan pequeñas diferencias en las zonas de medida más elevadas (puntos cercanos a la cubierta). En cualquier caso, las diferencias son poco significativas (entre 1°C-2°C de diferencia en general).
- Para determinar el comportamiento térmico de la nave se pueden tomar unos pocos puntos como representativos. La uniformidad térmica registrada en el interior de la nave permite hacer la recomendación que, en caso de monitorizarse en un futuro edificios de características similares, la instalación de sensores se centre en las zonas ocupadas y en aquellas zonas perimetrales en contacto con los muelles de carga. Esto permitirá reducir el número de sensores a instalar y reducirá también el volumen de datos a almacenar y gestionar.

- En épocas intermedias y cálidas se obtienen temperaturas máximas de unos 27,5°C para la zona de *packing*. En condiciones de invierno, con temperaturas exteriores mínimas de -6°C, las temperaturas interiores no bajan de los 9°C en la zona de *packing*.
- Los niveles de CO₂ anuales medidos en el interior de la nave se encuentran siempre en el rango de 350-500 ppm. Estos valores muestran que la calidad del aire en las diferentes zonas, independientemente del nivel de ocupación o época del año, es excelente.

Respecto a la fase de modelización y validación, es imprescindible definir los objetivos del estudio (ahorro energético, confort interior, otros) y simplificar el modelo al máximo. Si es necesario, combinar modelos energéticos (más sencillos) con modelos fluidodinámicos (CFD) cuando se requieran por ejemplo estudios de detalle de ventilación, infiltraciones, modificación de los sistemas de climatización, etc.

En el caso del modelo de Marchamalo 2B, se ha conseguido un modelo virtual que, en general, recoge correctamente las tendencias de las temperaturas de la nave. Las diferencias entre las temperaturas medidas y las temperaturas simuladas están alrededor del 10% (aproximadamente 1°C), de manera que se considera validado.

En relación a la fase de optimización de la nave a través de simulaciones, se concluye que:

- Respecto al **aislamiento térmico de la envolvente**, es posible reducirlo sin comprometer el confort interior diurno de forma significativa, tanto en condiciones de invierno como de verano. El confort nocturno sí se vería comprometido, principalmente en condiciones de invierno e intermedias.
- Por su parte, en relación a la **modificación del % de superficie translúcida de la nave**, se concluye que aumentar el % de lucernarios en cubierta y perimetrales no es conveniente desde el punto de vista de confort térmico, principalmente en condiciones de verano. En condiciones críticas de invierno este incremento produce leves mejoras en el confort durante las horas diurnas, pero dicha mejora no compensa el sobrecalentamiento producido en verano y el sobreenfriamiento producido durante las horas nocturnas en época fría.