



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

**Autor:** Montoya Torres, Raquel  
**Director:** Padilla Martínez, Javier  
**Codirector:** Navarro Andreu, José Ramón

Cartagena, 20 de septiembre de 2019



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2. DISPOSITIVO (MONTAJE) EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>14</b> |
| 2.1 CASA TÉRMICA DE PAREDES INTERCAMBIABLES .....   | 14        |
| 2.1.a <i>Materiales empleados en la casa térmica</i> .....  | 15        |
| 2.1.b <i>Paredes principales</i> .....  | 17        |
| 2.2 FOCO.....   | 19        |
| 2.2.a <i>Calibración del foco</i> .....   | 20        |
| 2.3 SISTEMA DE MEDIDA DE TEMPERATURAS .....   | 24        |
| <b>3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....</b>  | <b>25</b> |
| 3.1 INTRODUCCIÓN A LOS ENSAYOS .....  | 25        |
| 3.2 DESCRIPCIÓN DE DATOS OBTENIDOS PARA CADA ENSAYO .....   | 26        |
| 3.3 EJEMPLO DE DATOS OBTENIDOS PARA CADA MATERIAL.....  | 31        |
| <b>4. CÁLCULOS DEL COEFICIENTE DE PELÍCULA .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>5. CÁLCULOS DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN DEL<br/>CALOR Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....</b> | <b>38</b> |
| <b>6. ANÁLISIS DE DATOS.....</b>  | <b>43</b> |
| 6.1 EFECTO DE LA IRRADIANCIA (O DISTANCIA).....   | 43        |
| 6.2 EFECTO DE LAS DIFERENTES PAREDES EMPLEADAS .....  | 52        |
| 6.3 EFECTO DEL MATERIAL EMPLEADO EN LA TEMPERATURA FINAL ALCANZADA .....                            | 64        |
| 6.4 EVOLUCIÓN DE LAS CONSTANTES DE TIEMPO .....   | 66        |
| <b>7. CONCLUSIONES.....</b>   | <b>73</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFIA.....</b>   | <b>74</b> |

## ÍNDICE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Medidas proceso calibración foco solar. ....                  | 21 |
| Tabla 2. Medidas proceso calibración foco solar. ....                  | 22 |
| Tabla 3. Ajuste lineal de la calibración del foco. ....                | 23 |
| Tabla 4. Medidas del ajuste para la pared de pladur. ....              | 32 |
| Tabla 5. Cálculo del coeficiente de película. ....                     | 37 |
| Tabla 6. Cálculo del coeficiente global de transmisión del calor. .... | 41 |
| Tabla 7. Cálculo del coeficiente de conductividad térmica. ....        | 42 |
| Tabla 8. Media de la constante de tiempo y error. ....                 | 67 |

## ÍNDICE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Reflexión y absorción del blanco y negro. ....             | 10 |
| Figura 2. Termopar tipo K. ....                                      | 14 |
| Figura 3. Parte superior. ....                                       | 14 |
| Figura 4. Termopares en exterior de pared principal. ....            | 15 |
| Figura 5. Termopares en interior de pared principal. ....            | 15 |
| Figura 6. Termopares en el interior. ....                            | 16 |
| Figura 7. Termopar en el interior de la pared aislante trasera. .... | 16 |
| Figura 8. Termopar en el exterior de la pared aislante trasera. .... | 16 |
| Figura 9. Pared aislante de laterales. ....                          | 17 |
| Figura 10. Tornillo moleteado. ....                                  | 17 |
| Figura 11. Paredes pladur. ....                                      | 18 |
| Figura 12. Paredes ladrillo con mortero. ....                        | 18 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 13. Paredes madera.....           | 18 |
| Figura 14. Paredes vidrio.....           | 18 |
| Figura 15. Foco.....                     | 19 |
| Figura 16. Polímetro.....                | 20 |
| Figura 17. Piranómetro.....              | 21 |
| Figura 18. Termopar tipo K.....          | 24 |
| Figura 19. Amplificador multiplexor..... | 24 |

## ÍNDICE GRÁFICAS

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 1. Representación de la irradiancia frente a la inversa de la distancia al cuadrado.....   | 22 |
| Gráfica 2. Representación de la temperatura en la pared exterior (inferior derecha).....           | 26 |
| Gráfica 3. Representación de la temperatura en la pared interior (inferior derecha). ....          | 27 |
| Gráfica 4. Representación de la temperatura en la pared exterior (inferior izquierda). .           | 27 |
| Gráfica 5. Representación de la temperatura en la pared exterior (superior derecha)....            | 27 |
| Gráfica 6. Representación de la temperatura en la pared exterior (superior izquierda). 28          |    |
| Gráfica 7. Representación de la temperatura en la pared interior (inferior izquierda)...           | 28 |
| Gráfica 8. Representación de la temperatura en la pared interior (superior derecha). ...           | 28 |
| Gráfica 9. Representación de la temperatura en la pared interior (superior izquierda)..            | 28 |
| Gráfica 10. Representación de la temperatura del aire interior (delantero).....                    | 28 |
| Gráfica 11. Representación de la temperatura del aire interior (trasero).....                      | 28 |
| Gráfica 12. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.<br>..... | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 13. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.<br>..... | 44 |
| Gráfica 14. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero. ....            | 45 |
| Gráfica 15. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero. ....            | 45 |
| Gráfica 16. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.<br>..... | 46 |
| Gráfica 17. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.<br>..... | 46 |
| Gráfica 18. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero. ....            | 47 |
| Gráfica 19. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero. ....            | 47 |
| Gráfica 20. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.<br>..... | 48 |
| Gráfica 21. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.<br>..... | 48 |
| Gráfica 22. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero. ....            | 49 |
| Gráfica 23. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero. ....            | 49 |
| Gráfica 24. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.<br>..... | 50 |
| Gráfica 25. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.<br>..... | 50 |
| Gráfica 26. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero. ....            | 51 |
| Gráfica 27. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero. ....            | 51 |
| Gráfica 28. Representación de la temperatura en la pared exterior para 50cm. ....                  | 53 |
| Gráfica 29. Representación de la temperatura en la pared interior para 50cm. ....                  | 53 |
| Gráfica 30. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 50cm. ....           | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Gráfica 31. Representación de la temperatura en la pared exterior para 62,5cm. ....                          | 56 |
| Gráfica 32. Representación de la temperatura en la pared interior para 62,5cm. ....                          | 56 |
| Gráfica 33. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 62,5cm. ...                    | 57 |
| Gráfica 34. Representación de la temperatura en la pared exterior para 75cm. ....                            | 57 |
| Gráfica 35. Representación de la temperatura en la pared interior para 75cm. ....                            | 58 |
| Gráfica 36. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 75cm. ....                     | 58 |
| Gráfica 37. Representación de la temperatura en la pared exterior para 87,5cm. ....                          | 59 |
| Gráfica 38. Representación de la temperatura en la pared interior para 87,5cm. ....                          | 59 |
| Gráfica 39. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 87,5cm. ...                    | 60 |
| Gráfica 40. Representación de la temperatura en la pared exterior para 1 m. ....                             | 60 |
| Gráfica 41. Representación de la temperatura en la pared interior para 1 m. ....                             | 61 |
| Gráfica 42. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 1 m. ....                      | 61 |
| Gráfica 43. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal. .... | 62 |
| Gráfica 44. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal. .... | 63 |
| Gráfica 45. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal. .... | 63 |
| Gráfica 59. Representación de la temperatura en la pared exterior para las paredes sin pintar. ....          | 65 |
| Gráfica 60. Representación de la temperatura en la pared interior para las paredes sin pintar. ....          | 65 |
| Gráfica 43. Representación del tiempo en la pared exterior. ....   | 68 |
| Gráfica 44. Representación del tiempo en la pared interior. ....   | 68 |
| Gráfica 45. Representación del tiempo en el aire interior frontal. ....                                      | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Gráfica 46. Representación del tiempo en el aire interior trasero. .... | 68 |
| Gráfica 47. Representación del tiempo en la pared exterior.....         | 69 |
| Gráfica 48. Representación del tiempo en la pared interior. ....        | 69 |
| Gráfica 49. Representación del tiempo en el aire interior frontal. .... | 69 |
| Gráfica 50. Representación del tiempo en el aire interior trasero. .... | 69 |
| Gráfica 51. Representación del tiempo en la pared exterior.....         | 70 |
| Gráfica 52. Representación del tiempo en la pared interior. ....        | 70 |
| Gráfica 53. Representación del tiempo en el aire interior frontal. .... | 70 |
| Gráfica 54. Representación del tiempo en el aire interior trasero. .... | 70 |
| Gráfica 55. Representación del tiempo en la pared exterior.....         | 71 |
| Gráfica 56. Representación del tiempo en la pared interior. ....        | 71 |
| Gráfica 57. Representación del tiempo en el aire interior frontal. .... | 71 |
| Gráfica 58. Representación del tiempo en el aire interior trasero. .... | 71 |

## **1. Introducción y objetivos**

Actualmente, casi la mitad de la energía primaria consumida en Europa es debida al uso en edificaciones, y más concretamente a la calefacción o refrigeración de estas. Por este motivo, el coste energético y por consiguiente económico y ambiental, es un problema creciente a escala global. Debido a esto, y en base a las diferentes políticas energéticas tendentes a la reducción del consumo y la mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero, es necesario proponer soluciones en el ámbito de la eficiencia energética en edificaciones nuevas o en adaptaciones de edificaciones antiguas donde la eficiencia energética aun no era considerada como un factor relevante.

Generalmente, se reconoce que la eficiencia energética en edificación es la manera más barata de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y conservar recursos energéticos valiosos. Ante esta situación, se hace necesario la propuesta e implantación de soluciones eficaces en la mitigación del consumo energético y emisiones de gases. Las transferencias de calor indeseadas se producen a través de paredes, techos, suelos y ventanas, y la selección de materiales adecuados puede reducir considerablemente el consumo energético en climatización y paralelamente la contaminación ambiental.

Las edificaciones están sometidas a condiciones climáticas variables, lo que hace complicado el diseñar materiales que respondan favorablemente, desde el punto de vista energético en todas esas condiciones, ya que materiales y configuraciones con un buen aislamiento o estáticos (en caso de ventanas) permiten reducir la influencia de las condiciones ambientales externas solo en el caso de climas extremos o muy poco variables. Para las condiciones de variabilidad en las condiciones externas, se ha propuesto el uso de los denominados materiales “inteligentes”, capaces de modular sus propiedades físicas en función de un estímulo externo.

Los materiales o dispositivos cromogénicos son capaces de modular sus propiedades ópticas en función de un estímulo externo. Centrándonos en este proyecto en los materiales

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

termocrómicos, ya que son una solución pasiva, autorregulada y de bajo coste y mantenimiento, para la absorción variable y controlada de la radiación solar.

Los materiales termocrómicos, son capaces de cambiar sus propiedades ópticas, tanto de absorción como reflexión, en un rango determinado del espectro electromagnético, debido a un cambio en su estructura, en función de una temperatura de transición, aunque es necesario desarrollar sistemáticamente una serie de protocolos de caracterización que permitan confirmar la viabilidad de su uso. Sin embargo, presentan algunas características y/o debilidades que deben ser cuidadosamente analizadas y cuantificadas para confirmar la viabilidad de esta tecnología. Los objetivos de este proyecto se dirigen en esta dirección, obteniendo una caracterización sistemática.

Para una correcta comprensión de las pinturas termocrómicas, habrá que analizar inicialmente los colores que emplean estas. En el caso de las pinturas que se pretenden estudiar, el blanco y el negro por ser los dos colores extremos.

La percepción del color implica que nos lleguen ondas luminosas a los ojos, donde se convierten en impulsos nerviosos que se envían al cerebro para que sean interpretados y nos produzcan la sensación del color.

Todos los cuerpos están constituidos por sustancias que absorben y reflejan las ondas electromagnéticas, es decir, absorben y reflejan colores. Cuando un cuerpo se ve blanco es porque recibe todos los colores básicos del espectro (rojo, verde y azul) y los devuelve reflejados, generándose así la mezcla de los tres colores, el blanco. Si el objeto se ve negro es porque absorbe todas las radiaciones electromagnéticas (todos los colores) y no refleja ninguno. Para el resto de colores, se visualiza el color, la radiación electromagnética, que es reflejado y el resto son absorbidas.



Figura 1. Reflexión y absorción del blanco y negro.

El blanco es un color acromático de claridad máxima y oscuridad nula. Perceptualmente es la consecuencia de la foto recepción de una luz intensa constituida por todas las longitudes de onda del espectro visible, por tres longitudes de onda (larga, media y corta) o por dos longitudes de onda complementarias. Es el color de máxima reflectancia.

El negro es la percepción visual de máxima oscuridad, debido a la inexistencia de foto recepción, por falta total o casi total de luz. Es el color más oscuro y es de claridad nula y acromático.

La capacidad de reflexión y absorción que aporta el pintar una pared de color blanco y negro, es una de las características térmicas que se quieren analizar en este proyecto.

En física, la absorción de la radiación electromagnética es el proceso por el cual dicha radiación es captada por la materia. Cuando la absorción se produce dentro del rango de la luz visible, recibe el nombre de absorción óptica. Esta radiación, al ser absorbida, puede, bien ser reemitida o bien transformarse en otro tipo de energía, como calor o energía eléctrica.

En general, todos los materiales absorben en algún rango de frecuencias. Aquellos que absorben en todo el rango de la luz visible son llamados materiales opacos, mientras que si dejan pasar dicho rango de frecuencias se les llama transparentes. Es precisamente este proceso de absorción y posterior reemisión de la luz visible lo que da color a la materia.

La reflexión ocurre cuando los rayos de luz que inciden en una superficie chocan en ella, se desvían y regresan al medio que salieron formando un ángulo igual al de la luz incidente, muy distinta a la refracción.

El objetivo general de este proyecto es el inicio para el avance en la cuantificación de los posibles ahorros energéticos derivados del uso de materiales termocrómicos en edificación. Para ello, se propone incidir en el estudio sistemático de varios aspectos de esta tecnología, de lo que se derivan los siguientes objetivos específicos:

1. Una primera aproximación a las pinturas termocrómicas. Para posteriormente que sea posible la cuantificación de sus propiedades térmicas como parte de la envolvente de una Edificación. Para ello se utilizará una casa térmica a escala. En segundo lugar, para que el efecto del cambio en las propiedades ópticas de los materiales tenga el mayor efecto posible en términos energéticos, es necesario cuantificar las cinéticas de cambio de color y de transmisión de calor, en función de los diferentes materiales empleados (la inercia térmica de un vidrio es completamente diferente a la de una viga de madera, por poner dos ejemplos significativos). Otro objetivo de ese proyecto será el obtener esas cinéticas para un espectro representativo de materiales de construcción, y para diferentes materiales termocrómicos con diferentes temperaturas de transición.
2. Caracterización de las propiedades ópticas del color blanco y negro. Por ser los dos colores extremos de cambio de las pinturas termocrómicas, el más reflectante y el más absorbente, por eso el efecto térmico va a ser completamente diferente en cada caso. Uno sería para aplicarlo en verano, reflejando el máximo posible y el otro para aplicarlo en invierno, absorbiendo lo máximo posible. Para poder determinar la temperatura de transición adecuada en función de las condiciones climáticas externas. Los materiales termocrómicos, al tener su transición a una temperatura fija (ser autorregulados), tiene menor adaptación a climas cambiantes. Por consiguiente, es necesario saber cuál será la temperatura de transición del material para poder elegir según el lugar, un material termocrómico que sincronice su cambio con el cambio de la evolución climática correspondiente. Todo esto es necesario ya que el cambio de color no está relacionado directamente con la temperatura ambiental, sino con el balance de calor (que depende del material utilizado, masa térmica, condiciones ambientales, etc.). También se analizarán las paredes sin pintura para estudiar la diferencia y el ahorro que podrían suponer las pinturas termocrómicas.
3. Cuantificación de la cinética de transmisión de calor en función de las condiciones externas (día-noche, invierno-verano), y de las características térmicas de los materiales

empleados (material de la envolvente), ya que estos materiales afectarían a la cinética del cambio de color de las pinturas termocrómicas.

4. Estudio de la viabilidad del uso de materiales termocrómicos en diferentes secciones de la envolvente del edificio (paredes, tejados, ventanas) (Cuantificación del posible ahorro energético en climatización para diferentes condiciones atmosféricas), la mayoría de los estudios en tecnologías cromogénicas se centran en las ventanas, pero las paredes y tejados son de gran importancia también. Se estudiará con énfasis estos dos últimos elementos como elemento novedoso y potencialmente disruptor, ya que los materiales tradicionales usados en tejados absorben entre el 85 y 95 % de la radiación solar que incide sobre ellos, incrementando la temperatura de los habitáculos inferiores.

Este proyecto es un estudio inicial sobre el efecto del color de la envolvente en la evolución térmica de un habitáculo, constituyendo un primer paso hacia estudios posteriores sobre materiales termocrómicos, y tiene como objetivo final desarrollar un modelo completo y servir de punto de partida para realizar estudios detallados de estas pinturas sobre diversos materiales, en los que se puedan obtener resultados concluyentes de los mismos y comprobar si suponen una mejora en el rendimiento energético y más adelante, comprobar su eficacia en exteriores y en diversas condiciones climáticas.

## 2. Dispositivo (montaje) experimental

### 2.1 Casa térmica de paredes intercambiables

El uso de esta casa térmica es analizar la diferencia de transmisión del calor para diversos materiales. Para estos materiales se hará con distintos acabados de pinturas en su cara exterior, uno sin pintar, otro blanco y por último otro negro. También se simulan diversas temperaturas exteriores, mediante distintas distancias, para la influencia de estos parámetros.

La casa es un cubo (40x40x36,5 cm) el cual dispone de:

- Cuatro caras laterales con una abertura de 21 x 21 cm. En tres de ellas que no se analizan, solo se toman en consideración por las posibles pérdidas, se colocará un aislante con conductividad térmica conocida.
- Consta de termopares tipo K para realizar las múltiples mediciones de la temperatura.

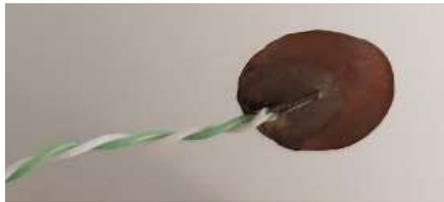


Figura 2. Termopar tipo K.

- Esta casa se abre por la parte superior con el fin de poder hacer el cambio de paredes y comprobar la correcta colocación y el buen funcionamiento de los termopares. Este techo tiene como aislante poliestireno expandido con una conductividad muy baja y un espesor de 4,3 cm. Se cierra mediante tornillos para que no haya pérdidas. Por lo tanto, esta superficie se considerará aislada.



Figura 3. Parte superior.

### 2.1.a Materiales empleados en la casa térmica

En la casa se utilizan tanto elementos de medición como paredes. Estos son:

- 14 termopares tipo K colocados en diversos sitios:
  - 1 en la parte exterior donde el aire está irradiado por el foco.
  - 4 en la cara exterior de la pared para evitar errores accidentales en las medidas, como que se despegue uno a mitad de un ensayo o que se rompa uno por su fragilidad y cambio de una pared a otra, y aumentar la estadística de datos, teniendo 4 medidas en el interior y exterior de pared en vez de 1.

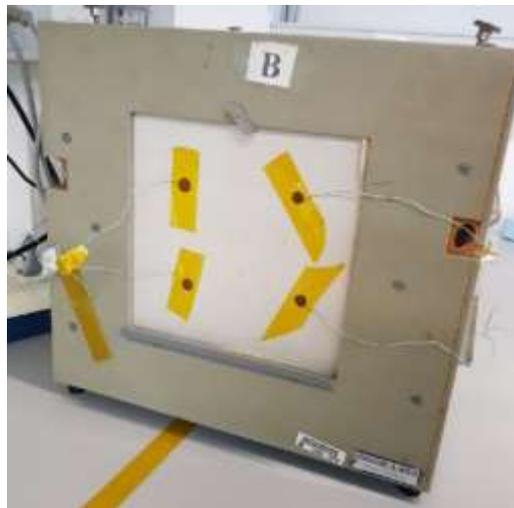


Figura 4. Termopares en exterior de pared principal.

- 4 en la parte interior de la pared con el mismo fin que antes.



Figura 5. Termopares en interior de pared principal.

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

- 2 en el interior de la casa a distinta distancia de la pared a medir.



Figura 6. Termopares en el interior.

- 1 en el interior de la pared aislante más separada de la pared principal.



Figura 7. Termopar en el interior de la pared aislante trasera.

- 1 en el exterior de la pared del aislante antes mencionado.

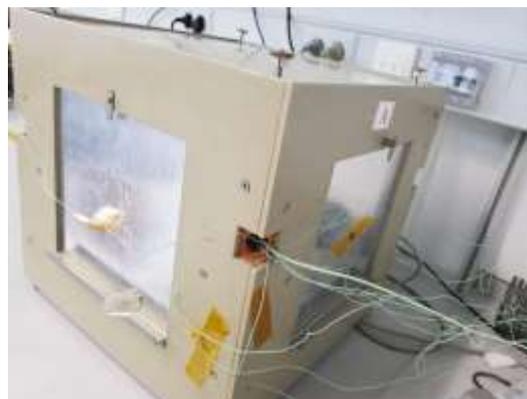


Figura 8. Termopar en el exterior de la pared aislante trasera.

- 1 en el exterior donde el aire no es irradiado.

- 3 paredes aislantes de 24,5 x 2,5 x 24,5 cm con conductividad térmica conocida ( $k = 0,039 \text{ W/m K}$ ).



Figura 9. Pared aislante de laterales.

- 2 tornillos moleteados en cada pared lateral para fijar las paredes y evitar pérdidas.



Figura 10. Tornillo moleteado.

- Sistema de obtención de temperaturas en tiempo real que se describirá en otro punto
- Pared principal descrita con detenimiento en el siguiente punto.

### **2.1.b Paredes principales**

Para estas paredes se usan 4 tipos de materiales, de esos cuatro tipos de materiales habrá 3 para cada una. Una se quedará como está, sin pintar, otra se pintará de blanco y otra de negro. Para pintar estas paredes se usa una pistola a presión y se realizan las pasadas necesarias para dejarla opaca.

Estos tipos de materiales fueron elegidos por ser materiales típicos de construcción. El pladur en recubrimientos de paredes, el ladrillo con mortero en exteriores, la madera en determinadas viviendas y el vidrio en ventanas.

## Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

### Materiales:

- Pladur de construcción 25 x 1 x 25 cm



Figura 11. Paredes pladur.

- Ladrillo con mortero 25 x 3,5 x 25 cm:
  - Ladrillo: 25 x 3 x 25 cm
  - Mortero: 25 x 0,5 x 25 cm



Figura 12. Paredes ladrillo con mortero.

- Madera de pino 25 x 2,7 x 25 cm



Figura 13. Paredes madera.

- Vidrio 25 x 1 x 25 cm



Figura 14. Paredes vidrio.

## 2.2 Foco

Para poder simular la radiación solar que llega a un edificio común en los posteriores ensayos, se va a utilizar un foco con irradiancia constante. Esto va a hacer que según a la distancia que se coloque se puedan simular diferentes temperaturas y poder obtener una gran cantidad de datos que simulen distintos climas. Con esto se puede comprobar la variación del rendimiento energético según los diversos valores de los parámetros que se estudiarán.

Para la toma de medidas, se colocará enfocado a la pared del material que se quiere estudiar y estará conectado durante 4 horas. La radiación que emite el foco hace que dicha pared se caliente y al elevarse la temperatura en la pared también lo hace el interior ya que hay conducción y convección entre la pared y el aire.

Para intentar simular distintas condiciones de radiación solar, inferiores o superiores a un sol ( $1000 \text{ W/m}^2$ ), se usará un foco y una bombilla de  $1000 \text{ W}$  y  $230 \text{ V}$ . Para comprobar la irradiancia real que llega a la pared, se calibrará el foco.



Figura 15. Foco.

### 2.2.a Calibración del foco

Es necesario saber cómo varia la potencia del foco con la distancia para poder realizar las diferentes pruebas y posteriores cálculos con exactitud. Para este proceso de calibración se usa un piranómetro térmico y un polímetro.



Figura 16. Polímetro.

Este polímetro es necesario porque el piranómetro da el resultado de la potencia en tensión, y este polímetro la mide. Pero para la calibración el elemento imprescindible es el piranómetro, que mide la densidad del flujo de radiación solar ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ). Este espectro de la radiación solar se extiende entre 300 y 2800 nm.

Un piranómetro se constituye por una pila termoeléctrica (absorbe un rango entre los 300 y los 50000 nm contenida en un alojamiento con dos semiesferas de cristal (limita la respuesta al rango de 300 a 2800 nm). La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación y transformarla en calor. El flujo de calor se transmite a la termopila y fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares y por lo tanto a la radiación incidente.

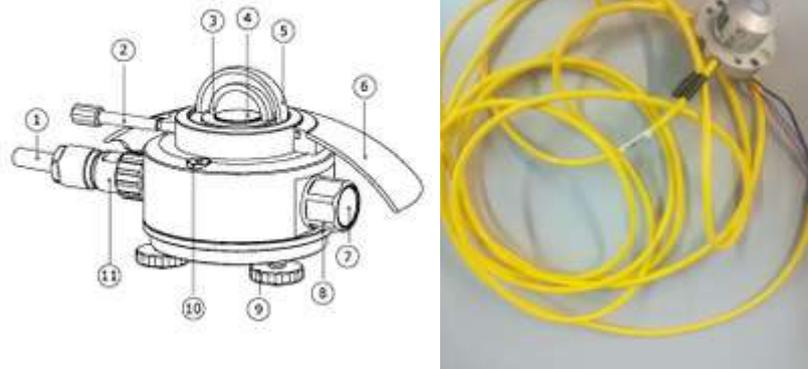


Figura 17. Piranómetro.

Sus componentes principales son: (1) Cable eléctrico, (3) y (5) Cúpula de cristal, (4) Sensor o termopila, (7) Indicador de desecante, (9) Tornillo de nivelado, (10) Nivel, (11) Conector.

Para la medición, se coloca el piranómetro en la pared principal de la casa térmica, es decir la que se toman las mediciones, y se enciende el foco a una distancia de 25 cm que será la más próxima tomada. Como el foco es de potencia constante, solo se puede variar el flujo de calor que llega a la pared, alejando el foco. Una vez tomada esa medida con el piranómetro y polímetro para su conversión, se alejará 25 cm de la pared y se volverá a tomar. Se repite este proceso hasta llegar a una distancia de 2m entre el foco y la pared. Se comprueba moviendo el piranómetro por toda la pared que la máxima tensión medida es en el centro de la pared a la altura del foco (incidencia directa).

Para el cambio de unidades de tensión del polímetro a potencia es necesario el siguiente dato:

$$71,1 \mu V = 1 W/m^2$$

Con el dato de conversión y los datos tomados se obtiene la siguiente tabla de resultados:

| Distancia(cm) | Voltaje (mV) | Irradiancia ( $W/m^2$ ) |
|---------------|--------------|-------------------------|
| 25            | 117,2        | 1648,38                 |
| 50            | 37,7         | 530,24                  |
| 75            | 18,6         | 261,60                  |
| 100           | 11,4         | 160,34                  |
| 125           | 7,8          | 109,70                  |
| 150           | 5,8          | 81,58                   |
| 175           | 4,5          | 63,29                   |
| 200           | 3,8          | 53,45                   |

Tabla 1. Medidas proceso calibración foco solar.

## Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

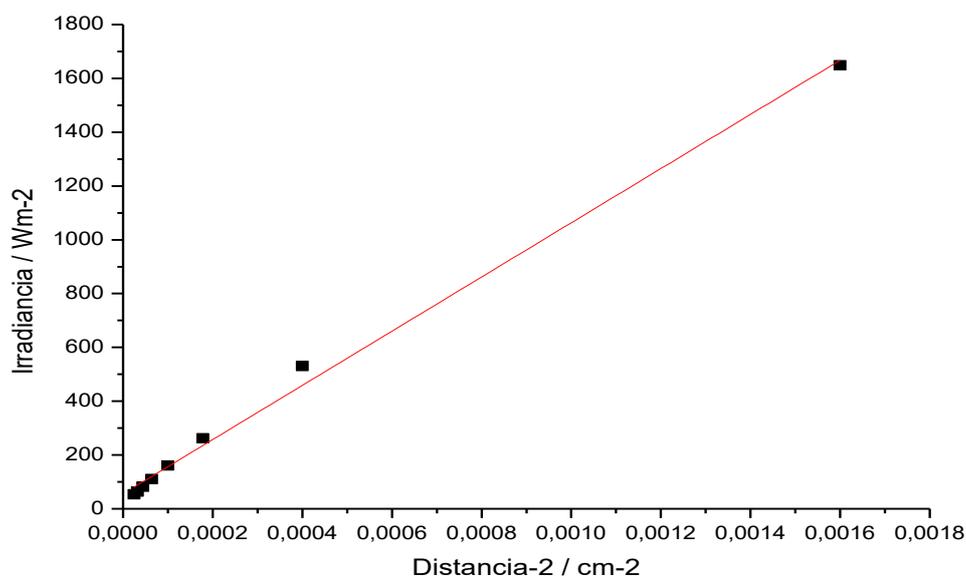
Para comprobar cómo afecta la distancia a la irradiancia que le llega a la pared se representa la irradiancia frente a la inversa de la distancia al cuadrado conociendo la dependencia lineal entre estas dos variables (la irradiancia decrece linealmente con el inverso de la distancia al cuadrado).

Expresamos los datos en una tabla y gráficamente respecto a la inversa de la distancia al cuadrado:

| Distancia(cm) | Voltaje (mV) | Irradiancia ( $W/m^2$ ) | $1/distancia^2$ ( $1/cm^2$ ) |
|---------------|--------------|-------------------------|------------------------------|
| 25            | 117,2        | 1648,38                 | 0,0016                       |
| 50            | 37,7         | 530,24                  | 0,0004                       |
| 75            | 18,6         | 261,60                  | 0,000178                     |
| 100           | 11,4         | 160,34                  | 0,0001                       |
| 125           | 7,8          | 109,70                  | 0,000064                     |
| 150           | 5,8          | 81,58                   | 0,0000444                    |
| 175           | 4,5          | 63,29                   | 0,0000327                    |
| 200           | 3,8          | 53,45                   | 0,000025                     |

Tabla 2. Medidas proceso calibración foco solar.

Con estos resultados se confirma que la irradiancia que llega al piranómetro aumenta con la inversa de la distancia al cuadrado. Si se representan gráficamente los valores obtenidos para ver cuál es la tendencia que sigue la irradiancia, se obtiene:



Gráfica 1. Representación de la irradiancia frente a la inversa de la distancia al cuadrado.

| Equation      | y = a + b*x |           |                |
|---------------|-------------|-----------|----------------|
| Adj. R-Square | 0,99543     |           |                |
|               |             | Value     | Standard Error |
| B             | Intercept   | 55,82366  | 15,1749        |
| B             | Slope       | 1,00732E6 | 25791,36454    |

Tabla 3. Ajuste lineal de la calibración del foco.

En estas representaciones se puede comprobar de manera más visual que la irradiancia aumenta conforme aumenta la inversa de la distancia al cuadrado. De aquí se sacan la ecuación lineal creciente que relaciona los parámetros, y su respectivo coeficiente de regresión que indica el grado de ajuste de la ecuación a los datos tomados.

$$R^2 = 0,99543$$

Es un ajuste bueno y la ecuación de la inversa de la irradiancia al cuadrado es:

$$y = 1,01E6x + 60$$

Con estas ecuaciones, y sustituyendo la inversa de la distancia al cuadrado en x, podremos saber la irradiancia del foco para cualquier distancia, gracias a la calibración ya concluida y sin necesidad de más medidas.

### 2.3 Sistema de medida de temperaturas

Para la correcta realización de los ensayos, una de las tareas principales para poder comprobar los objetivos de este proyecto es la medición de la temperatura en los distintos puntos. La medición se realizará de la siguiente manera:

- En primer lugar, la temperatura la medirán sensores, que en este caso son termopares tipo k. Estos termopares están colocados de la manera descrita en el apartado 2.1.

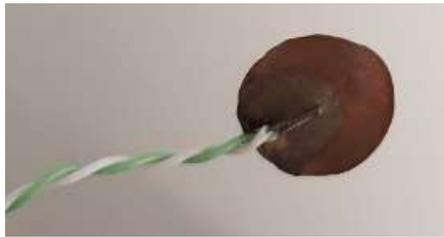


Figura 18. Termopar tipo K.

- Los termopares pasan la información de forma analógica a un amplificador multiplexor.
- Este multiplexor se encarga de convertir la señal analógica recibida de los termopares a forma digital.



Figura 19. Amplificador multiplexor.

- Mediante un cable RS232 (tipo C) se pasan los datos digitales del multiplexor al ordenador.
- En el ordenador, con un programa llamado Rtg-das, se vuelcan los datos obtenidos a Excel para un manejo más fácil de ellos.

### **3. Procedimiento experimental**

#### **3.1 Introducción a los ensayos**

Para comenzar con la presentación de los datos obtenidos, se va a hacer una breve descripción del proceso que se ha ido siguiendo para cada una de las paredes. Lo primero es mencionar que se han usado 4 tipos de materiales de paredes con 3 colores cada una, que hacen un total de 12 paredes distintas. También es mencionable que se utiliza el foco en 5 medidas distintas (50, 62'5, 75, 87'5, 100 cm) ya que la irradiancia del foco es constante y se regula el flujo de calor en la pared mediante las diferentes distancias.

Inicialmente, es necesario tener la configuración de la casa térmica deseada, que para todos los ensayos tienen puntos en común como:

- Las tres paredes aislantes en los tres laterales del cubo no estudiados.
- La colocación de los termopares.
- El sistema de medida de temperaturas.
- El tiempo total del ensayo.
- El tiempo entre cada medida.

Para estar seguro de que la temperatura del habitáculo llegue al estacionario, se usará un tiempo total para el ensayo de 4 horas, así todas las paredes alcanzarán dicho régimen.

El tiempo entre cada media de la temperatura será de 1 minuto para mayor precisión del ensayo mediante la toma de una cantidad de medidas significativas sin mucha variación de la temperatura entre ambas.

Entre los ensayos hay dos elementos principales que si varían:

- La pared a medir.
- La distancia a la que se encuentra el foco.

Tras esta exposición generales sobre todos los ensayos, se procede con los casos específicos.

### 3.2 Descripción de datos obtenidos para cada ensayo

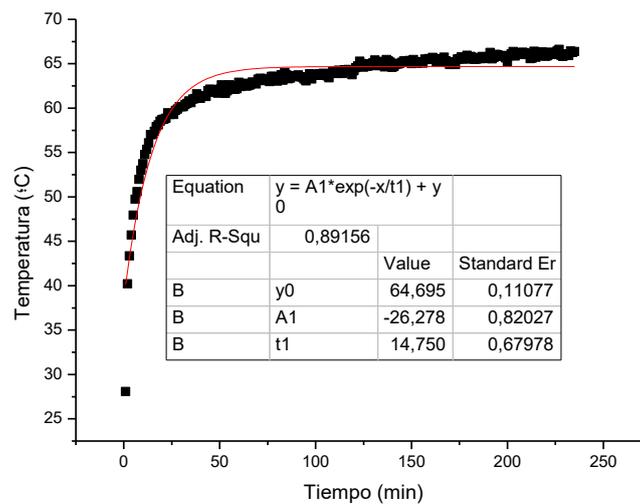
Como ejemplo para mostrar los datos obtenidos y el procedimiento que se sigue en cada ensayo, se toma la pared de pladur a una distancia fija de 50 cm.

Para este ensayo, hay que colocar la pared de pladur sin pintar en la casa, con los 14 termopares en la colocación descrita, y se coloca el foco a 50 cm. Se inicia el programa y la primera medida es con el foco sin encender. Una vez tomada esa medida, se enciende el foco y el programa va tomando los datos automáticamente cada minuto hasta llegar a 4 horas. De la toma de estos datos se obtiene, para este caso, la siguiente cantidad:

$$4 \text{ horas} \times 60 \text{ min} \times 14 \text{ termopares} = 3360 \text{ datos en un ensayo}$$

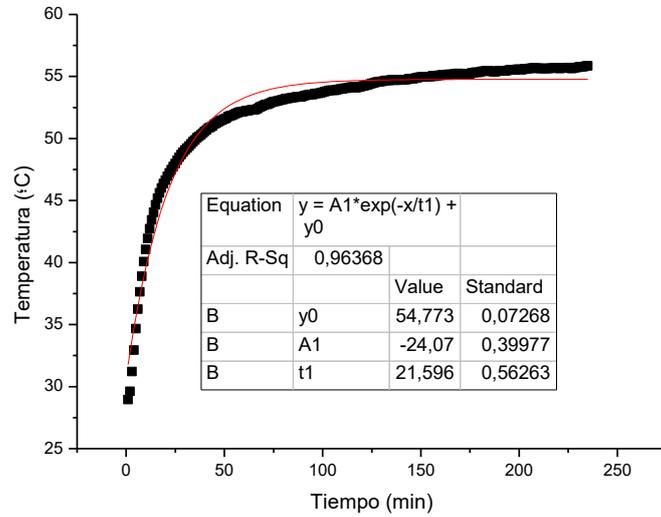
Tomando de la tabla los valores más importantes del estudio, como el exterior de la pared, el interior de la pared y los aires interiores, y representándolos para ver más visualmente si alcanzan el estacionario y cuando.

Pared exterior:



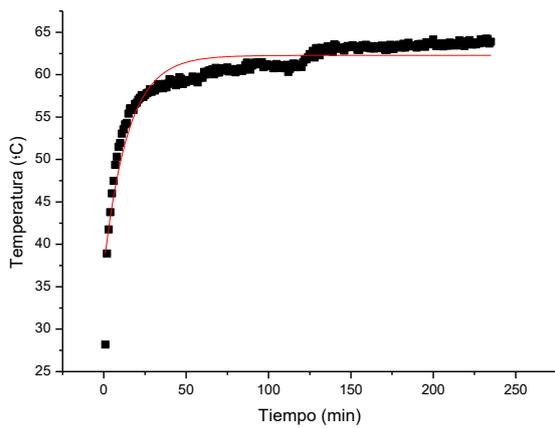
Gráfica 2. Representación de la temperatura en la pared exterior (inferior derecha).

Pared interior:

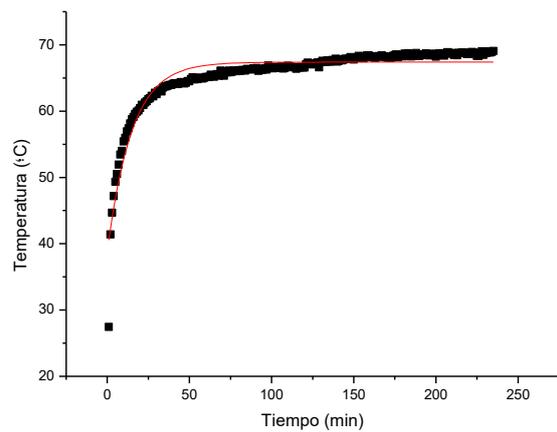


Gráfica 3. Representación de la temperatura en la pared interior (inferior derecha).

Para el resto:

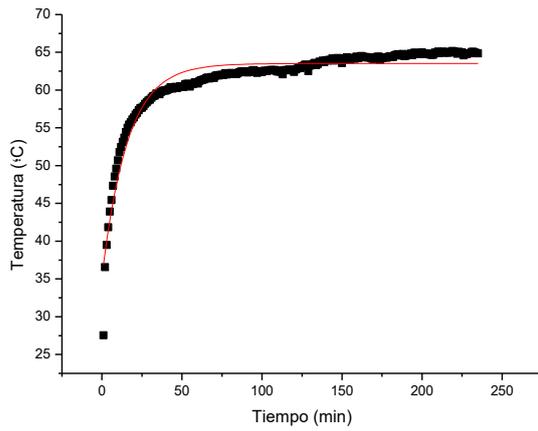


Gráfica 4. Representación de la temperatura en la pared exterior (inferior izquierda).

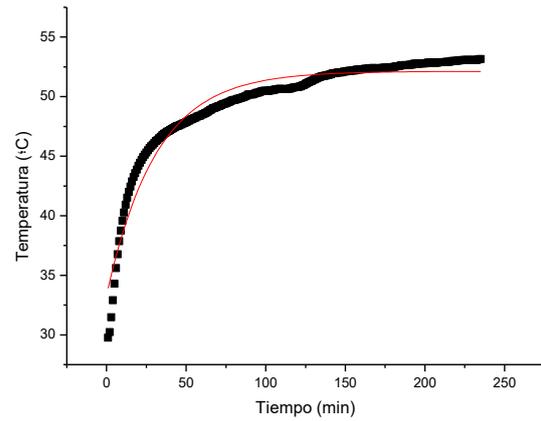


Gráfica 5. Representación de la temperatura en la pared exterior (superior derecha).

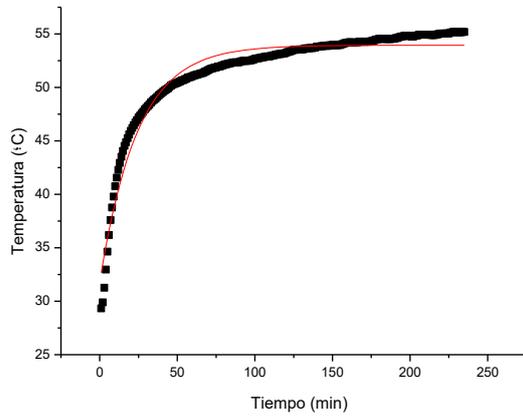
Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.



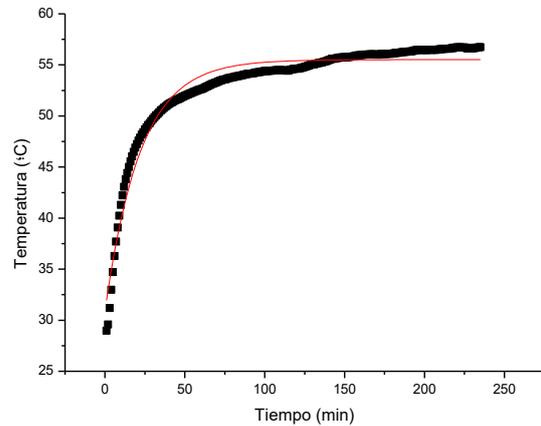
Gráfica 6. Representación de la temperatura en la pared exterior (superior izquierda).



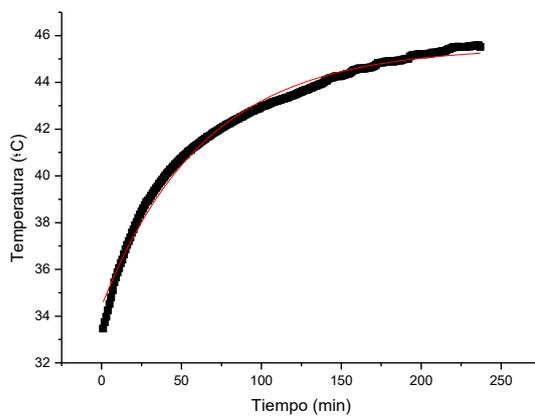
Gráfica 7. Representación de la temperatura en la pared interior (inferior izquierda).



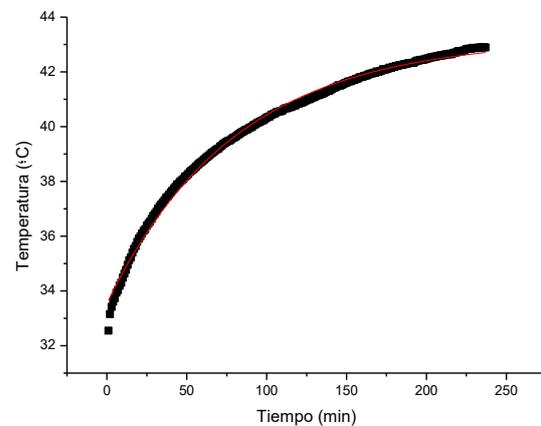
Gráfica 8. Representación de la temperatura en la pared interior (superior derecha).



Gráfica 9. Representación de la temperatura en la pared interior (superior izquierda).



Gráfica 10. Representación de la temperatura del aire interior (delantero).



Gráfica 11. Representación de la temperatura del aire interior (trasero).

Con estas representaciones, se comprueba que la temperatura va aumentando progresivamente con el tiempo hasta llegar a un momento en el que llega a ser estacionario. Este estacionario llega antes en el caso del exterior de la pared por ser el que alcanza más rápidamente mayores temperaturas por estar en exposición directa con el foco. Tras las cuatro horas de ensayo, se ve que el aire interior no ha terminado de alcanzar el estacionario pero que está prácticamente en él ya que la pendiente de la curva ha disminuido.

Con el programa origin se han hecho las representaciones gráficas y se han ajustado los datos obtenidos a una función exponencial del tipo:

$$y = y_0 + A_1 e^{-x/t_1}$$

Para cada representación se expone, dentro de ella, la tabla que se ve en dos de ellas, que contienen los parámetros de la anterior ecuación ( $y_0, A_1, t_1$ ) para poder hallar una temperatura en cualquier instante sin necesidad del ensayo y para un mejor análisis de datos posterior. En esta tabla también se presenta su correspondiente coeficiente de regresión del ajuste de esta función, que como se puede comprobar, en los casos más bajos ronda el 0,9 que es un ajuste bueno.

A parte del coeficiente de regresión, los otros tres datos importantes obtenidos de la tabla son los correspondientes para completar la ecuación que caracteriza la curva para cada representación. Son  $y_0$  que es la temperatura máxima alcanzada (llamada para el resto del proyecto  $T_{max}$ ),  $A_1$  es la variación de temperatura de la inicia a la final (se llamará  $\Delta T$ ) y  $t_1$  que es la constante de tiempo (que se llamará  $\tau$ ).

Se puede ver que, tanto para las cuatro medidas exteriores como para las cuatro medidas interiores de la pared, los resultados son prácticamente iguales, como cabía de esperar. Por lo tanto, al tener una gran cantidad de ensayos, 60 en total, se mostrará una tabla con los resultados para la pared de pladur y para el resto se mostrarán los datos en el análisis.

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

Hay que mencionar que se hicieron las representaciones de estas cuatro posiciones por ser las más importantes y también porque en el resto de termopares, al no estar el foco en dirección directa con ellos, la variación de temperatura de la inicial a la final es mínima y se realizó la media de todos los datos tomados durante las 4 horas, considerándolos sin variación.

Estas representaciones se realizaron para todas las paredes y colores, pero por la cantidad de gráficas obtenidas de las 12 paredes y teniendo en cuenta que en el punto 10 de análisis de datos se generan 49 graficas más, para que el proyecto no se hiciera muy extenso y pesado de leer, solo se ha presentado de una pared.

El análisis de estas representaciones y datos obtenidos se realizará en otro apartado cuando ya se tengan los resultados para todas las paredes.

### 3.3 Ejemplo de datos obtenidos para cada material

En este punto se presentan los datos del ajuste de la pared de pladur para todas las distancias y todos los colores. Para el exterior y el interior de la pared se presentará un único dato que será la media de los valores sin fallos de cualquier tipo. Se presentan solo los valores del pladur, pero para las otras tres paredes habría otras tablas correspondientes, pero por simplificación no se presentan y se verán en el análisis.

| Pared        | Distancia (cm)  | Dato            | Media pared exterior | Media pared interior | aire interior frontal | aire interior trasero |
|--------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Pladur       | 50              | $R^2$           | 0,8976               | 0,9548               | 0,9893                | 0,9947                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 64,5                 | 54,09                | 45,52                 | 43,21                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 42,5                 | 32,1                 | 23,52                 | 21,21                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 15,0                 | 25                   | 63                    | 80                    |
|              | 62,5            | $R^2$           | 0,9574               | 0,9803               | 0,9995                | 0,9989                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 50,54                | 45,27                | 40,24                 | 39,97                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 28,5                 | 23,3                 | 18,24                 | 17,97                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 19,9                 | 33                   | 81,8                  | 65,0                  |
|              | 75              | $R^2$           | 0,9427               | 0,9748               | 0,9996                | 0,9996                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 43,74                | 40,47                | 36,34                 | 35,62                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 21,7                 | 18                   | 14,34                 | 13,62                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 39                   | 52,1125              | 89                    | 101,4                 |
|              | 87,5            | $R^2$           | 0,9399               | 0,9670               | 0,9905                | 0,9890                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 42,66                | 39,35                | 36,45                 | 36,22                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 20,7                 | 17,4                 | 14,45                 | 14,22                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 20,2                 | 25,9                 | 54,3                  | 55,6                  |
| 100          | $R^2$           | 0,9460          | 0,9788               | 0,9994               | 0,9998                |                       |
|              | Tmax (°C)       | 38,14           | 35,11                | 33,34                | 32,84                 |                       |
|              | $\Delta T$ (°C) | 16,1            | 13,1                 | 11,34                | 10,841                |                       |
|              | $\tau$ (min)    | 38              | 49                   | 93,9                 | 102,4                 |                       |
| Pladur negro | 50              | $R^2$           | 0,9122               | 0,9653               | 0,9985                | 0,9995                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 73,9                 | 69,4                 | 51,73                 | 48,87                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 51,9                 | 47,4                 | 29,73                 | 26,87                 |
|              |                 | T (min)         | 13,3                 | 27,7                 | 63,7                  | 83,2                  |
|              | 62,5            | $R^2$           | 0,9691               | 0,9730               | 0,9997                | 0,9985                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 58,09                | 54,55                | 44,12                 | 42,36                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 36,1                 | 32,5                 | 22,12                 | 20,36                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 14,9                 | 22,7                 | 68,9                  | 63,5                  |
|              | 75              | $R^2$           | 0,9651               | 0,9654               | 0,9968                | 0,9984                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 49,86                | 47,75                | 40,09                 | 38,68                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 27,9                 | 25,8                 | 18,09                 | 16,68                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 12,5                 | 24,0                 | 63,3                  | 65,8                  |
|              | 87,5            | $R^2$           | 0,9680               | 0,9687               | 0,9996                | 0,9979                |
|              |                 | Tmax (°C)       | 47,60                | 45,19                | 38,99                 | 36,59                 |
|              |                 | $\Delta T$ (°C) | 25,6                 | 23,2                 | 16,99                 | 14,59                 |
|              |                 | $\tau$ (min)    | 19,6                 | 27,6                 | 73,2                  | 94,3                  |

|                      |             |                                   |        |        |        |        |
|----------------------|-------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                      | <b>100</b>  | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9368 | 0,9501 | 0,9989 | 0,9991 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 44,60  | 42,00  | 36,52  | 35,85  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 22,6   | 20,0   | 14,52  | 13,85  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 23,7   | 30,2   | 82,8   | 83,8   |
| <b>Pladur blanco</b> | <b>50</b>   | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9421 | 0,9758 | 0,9974 | 0,9995 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 62,24  | 49,85  | 43,48  | 41,23  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 40,2   | 27,8   | 21,48  | 19,23  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 12,1   | 22,5   | 57,0   | 66,6   |
|                      | <b>62,5</b> | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9375 | 0,9684 | 0,9997 | 0,9982 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 44,78  | 41,15  | 38,28  | 37,71  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 22,8   | 19,2   | 16,28  | 15,71  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 26     | 45     | 99,5   | 80,5   |
|                      | <b>75</b>   | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9249 | 0,9723 | 0,9994 | 0,9994 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 41,59  | 38,11  | 35,03  | 34,43  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 19,6   | 16,1   | 13,03  | 12,43  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 37,9   | 57     | 94,6   | 107,9  |
|                      | <b>87,5</b> | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9572 | 0,9854 | 0,9994 | 0,9989 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 40,58  | 37,20  | 35,64  | 34,42  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 18,6   | 15,2   | 13,64  | 12,42  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 37,9   | 52,8   | 113,4  | 128,9  |
|                      | <b>100</b>  | <b><math>R^2</math></b>           | 0,9447 | 0,9665 | 0,9852 | 0,9720 |
|                      |             | <b>Tmax (°C)</b>                  | 37,72  | 34,97  | 32,73  | 32,15  |
|                      |             | <b><math>\Delta T</math> (°C)</b> | 15,7   | 13,0   | 10,73  | 10,15  |
|                      |             | <b><math>\tau</math> (min)</b>    | 13,6   | 21,0   | 54     | 55     |

Tabla 4. Medidas del ajuste para la pared de pladur.

A la hora de presentar los datos en las tablas, hay que prestar atención al número de cifras significativas. En este caso, el error de los parámetros lo da el propio software al hacer el ajuste, teniendo en cuenta que el error se muestra con una sola cifra significativa, y el dato medido, ajustado a esas cifras. Se usará la desviación standard como error.

Respecto a los coeficientes de regresión se han dejado 4 cifras significativas, ya que si se dejaban 3 en algunas ocasiones el redondeo era 1.

#### 4. Cálculos del coeficiente de película

Como referencia para el cálculo de este coeficiente y para corroborar las ecuaciones utilizadas, se observa que corresponde a una convección libre con flujo de calor constante por venir de un foco térmico, se usó la ecuación de la página 256 del libro de transferencia de calor de J.P.Holman. Holman expone que, para poder calcular el coeficiente de película para la pared que recibe el flujo de calor, considerando que es una superficie vertical. Hay que comenzar calculando el número de Grashof modificado. Para ello se dispone de la ecuación del cálculo de éste con las siguientes variables:

$$Gr^* = \frac{g \cdot \beta \cdot q_w \cdot x^4}{k \cdot \nu^2}$$

Donde:

|  |  |
|--|--|
| g: Aceleración de la gravedad (9,81m/s <sup>2</sup> )            | $\beta: 1/T_{\infty}(K)$ (0,00338983 $\frac{1}{K}$ ) (por ser gas) |
| $T_{\infty}(K)$ : Temperatura ambiente (295 K)                   | x: Longitud de la pared (0,21 m)                                   |
| $q_w$ : Flujo de calor por unidad de area<br>(W/m <sup>2</sup> ) | K: coeficiente de conductividad térmica<br>(W/m K)                 |
| $\nu$ : viscosidad cinemática (m <sup>2</sup> /s)                | $Gr^*$ : Numero de Grashof modificado                              |

Donde los datos que no se han especificado ya se obtienen para cada pared y distancia según su temperatura media entre la máxima alcanzada en el exterior de la pared y en el aire exterior irradiado, es decir, sus temperaturas cuando llegan al estacionario.

$$T_{med} = (T_{pared\ ext} + T_{flu\ ext})/2$$

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

Con el número de Grashof y el número de Prandtl que también se saca interpolando de la misma tabla, se saca el número de Nusselt de la siguiente manera:

$$Nu = 0,6 (Gr^* \cdot Pr)^{0,2}$$

Nu: Número de Nusselt

Pr: Número Prandtl

Sabiendo que el número de Nusselt también se puede calcular de la siguiente manera, ya que en J.P Holman dice que “*Los coeficientes de transferencia de calor locales fueron correlacionados por la siguiente relación para el rango laminar*”:

$$Nu = \frac{h \cdot x}{K_f} = 0,6 (Gr^* \cdot Pr)^{0,2}$$

Donde:

h: Coeficiente de transmisión del calor

$K_f$ : Conductividad térmica del fluido

(W/m<sup>2</sup>K)

(W/m K)

Conocido el resto de datos, se despeja h de la anterior ecuación. Holman también comenta que para región laminar con un flujo de calor por unidad de área constante el coeficiente de película hay que evaluarlo de la siguiente manera:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx$$

$$\bar{h} = \frac{5}{4} h_{x=L} \quad q_w = const$$

Quedando finalmente el dato obtenido de la anterior ecuación por 5/4. Se mostrará el resumen de los datos en una tabla con todos los valores de los datos utilizados:

| Distancia (cm) | Pared          | $T_{med}$ (°C) | $\nu \times 10^6$ ( $m^2/s$ ) | $k \times 10^3$ (W/m K) | Pr    | Gr         | Nu     | h ( $W/m^2 K$ ) |
|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------|-------|------------|--------|-----------------|
| 50             | mortero        | 47,43          | 17,67                         | 27,63                   | 0,709 | 3746490581 | 46,030 | 7,570           |
|                | mortero negro  | 51,93          | 17,67                         | 27,63                   | 0,709 | 3748672470 | 46,035 | 7,570           |
|                | mortero blanco | 42,29          | 17,18                         | 27,26                   | 0,710 | 4017677131 | 46,684 | 7,576           |
|                | madera         | 45,74          | 17,51                         | 27,51                   | 0,709 | 3832778473 | 46,242 | 7,571           |
|                | madera negra   | 50,10          | 17,93                         | 27,82                   | 0,709 | 3615176770 | 45,699 | 7,567           |
|                | madera blanca  | 43,90          | 17,33                         | 27,38                   | 0,710 | 3930168779 | 46,477 | 7,574           |
|                | pladur         | 47,79          | 17,71                         | 27,65                   | 0,709 | 3728581381 | 45,985 | 7,569           |
|                | pladur negro   | 53,17          | 18,23                         | 28,03                   | 0,709 | 3469858537 | 45,321 | 7,563           |
|                | pladur blanco  | 46,15          | 17,55                         | 27,54                   | 0,709 | 3811495424 | 46,190 | 7,571           |
|                | vidrio         | 46,14          | 17,55                         | 27,54                   | 0,709 | 3812010717 | 46,191 | 7,571           |
|                | vidrio negro   | 52,61          | 18,18                         | 28,00                   | 0,709 | 3495686023 | 45,389 | 7,564           |
|                | vidrio blanco  | 43,26          | 17,27                         | 27,33                   | 0,710 | 3964432926 | 46,559 | 7,575           |
| 62,5           | mortero        | 43,58          | 17,30                         | 27,35                   | 0,710 | 2719286165 | 43,177 | 7,030           |
|                | mortero negro  | 45,28          | 17,47                         | 27,47                   | 0,709 | 2657074929 | 42,975 | 7,028           |
|                | mortero blanco | 40,29          | 16,99                         | 27,12                   | 0,710 | 2845542278 | 43,574 | 7,034           |
|                | madera         | 42,64          | 17,21                         | 27,29                   | 0,710 | 2754517243 | 43,289 | 7,031           |
|                | madera negra   | 45,34          | 17,47                         | 27,48                   | 0,709 | 2654929704 | 42,968 | 7,028           |
|                | madera blanca  | 40,79          | 17,04                         | 27,16                   | 0,710 | 2825948716 | 43,514 | 7,034           |
|                | pladur         | 42,12          | 17,16                         | 27,25                   | 0,710 | 2774297919 | 43,352 | 7,032           |
|                | pladur negro   | 46,50          | 17,58                         | 27,56                   | 0,709 | 2613556981 | 42,832 | 7,027           |
|                | pladur blanco  | 39,47          | 17,58                         | 27,81                   | 0,709 | 2592268628 | 42,754 | 7,077           |
|                | vidrio         | 42,19          | 17,17                         | 27,26                   | 0,710 | 2771831475 | 43,344 | 7,032           |
|                | vidrio negro   | 44,93          | 17,43                         | 27,45                   | 0,710 | 2669778195 | 43,017 | 7,029           |
|                | vidrio blanco  | 40,13          | 16,97                         | 27,11                   | 0,710 | 2852048443 | 43,595 | 7,035           |
|                | mortero        | 39,56          | 16,92                         | 27,05                   | 0,710 | 2121524576 | 41,091 | 6,616           |
|                | mortero negro  | 42,38          | 17,19                         | 27,27                   | 0,710 | 2038936366 | 40,762 | 6,616           |
|                | mortero blanco | 36,09          | 16,59                         | 26,67                   | 0,711 | 2237765353 | 41,540 | 6,595           |

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

|               |                |       |       |       |            |            |        |       |
|---------------|----------------|-------|-------|-------|------------|------------|--------|-------|
| 75            | madera         | 37,74 | 16,74 | 26,85 | 0,710      | 2181527242 | 41,325 | 6,605 |
|               | madera negra   | 48,93 | 17,82 | 27,73 | 0,709      | 1865652625 | 40,037 | 6,609 |
|               | madera blanca  | 36,36 | 16,61 | 26,70 | 0,711      | 2228471667 | 41,504 | 6,597 |
|               | pladur         | 37,12 | 16,69 | 26,79 | 0,711      | 2202345242 | 41,405 | 6,602 |
|               | pladur negro   | 41,77 | 17,13 | 27,23 | 0,710      | 2056180947 | 40,831 | 6,617 |
|               | pladur blanco  | 36,33 | 16,61 | 26,70 | 0,711      | 2229405624 | 41,508 | 6,597 |
|               | vidrio         | 37,84 | 16,75 | 26,86 | 0,710      | 2178018977 | 41,311 | 6,606 |
|               | vidrio negro   | 40,75 | 17,03 | 27,15 | 0,710      | 2085294646 | 40,947 | 6,618 |
|               | vidrio blanco  | 34,92 | 16,48 | 26,55 | 0,711      | 2278845988 | 41,694 | 6,588 |
| 87,5          | mortero        | 36,97 | 16,67 | 26,77 | 0,711      | 1706404048 | 39,345 | 6,269 |
|               | mortero negro  | 38,05 | 16,77 | 26,89 | 0,710      | 1678369077 | 39,213 | 6,276 |
|               | mortero blanco | 34,35 | 16,42 | 26,48 | 0,711      | 1777535832 | 39,674 | 6,254 |
|               | madera         | 37,01 | 16,68 | 26,77 | 0,711      | 1705427824 | 39,341 | 6,270 |
|               | madera negra   | 41,19 | 17,07 | 27,18 | 0,710      | 1602104291 | 38,844 | 6,286 |
|               | madera blanca  | 36,50 | 16,63 | 26,72 | 0,711      | 1718936822 | 39,404 | 6,267 |
|               | pladur         | 36,78 | 16,65 | 26,75 | 0,711      | 1711336165 | 39,368 | 6,268 |
|               | pladur negro   | 38,46 | 16,81 | 26,93 | 0,710      | 1667701608 | 39,162 | 6,278 |
|               | pladur blanco  | 35,17 | 16,50 | 26,57 | 0,711      | 1754719113 | 39,570 | 6,259 |
|               | vidrio         | 37,02 | 16,68 | 26,77 | 0,711      | 1705243218 | 39,340 | 6,270 |
|               | vidrio negro   | 39,47 | 16,91 | 27,04 | 0,710      | 1642029117 | 39,038 | 6,284 |
| vidrio blanco | 36,53          | 16,63 | 26,72 | 0,711 | 1718084153 | 39,400     | 6,267  |       |
| 100           | mortero        | 34,03 | 16,39 | 26,45 | 0,711      | 1429400740 | 37,982 | 5,980 |
|               | mortero negro  | 36,92 | 16,67 | 26,76 | 0,711      | 1366454945 | 37,635 | 5,996 |
|               | mortero blanco | 32,93 | 16,29 | 26,33 | 0,711      | 1454278859 | 38,116 | 5,974 |
|               | madera         | 33,88 | 16,38 | 26,43 | 0,711      | 1432786060 | 38,000 | 5,979 |
|               | madera negra   | 37,18 | 16,69 | 26,79 | 0,711      | 1360951737 | 37,605 | 5,997 |
|               | madera blanca  | 32,73 | 16,27 | 26,31 | 0,711      | 1459023888 | 38,141 | 5,973 |
|               | pladur         | 33,50 | 16,34 | 26,39 | 0,711      | 1441415758 | 38,047 | 5,977 |

|            |                      |       |       |       |       |            |        |       |
|------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|------------|--------|-------|
| <b>100</b> | <b>pladur negro</b>  | 37,03 | 16,68 | 26,78 | 0,711 | 1364089767 | 37,622 | 5,996 |
|            | <b>pladur blanco</b> | 33,51 | 16,34 | 26,39 | 0,711 | 1441143253 | 38,045 | 5,977 |
|            | <b>vidrio</b>        | 34,07 | 16,40 | 26,45 | 0,711 | 1428424257 | 37,977 | 5,980 |
|            | <b>vidrio negro</b>  | 36,28 | 16,61 | 26,69 | 0,711 | 1380065557 | 37,712 | 5,992 |
|            | <b>vidrio blanco</b> | 33,95 | 16,39 | 26,44 | 0,711 | 1431198908 | 37,992 | 5,979 |

Tabla 5. Cálculo del coeficiente de película.

Este coeficiente de película se calcula para ver si se modifican los datos después de un periodo de iluminación larga, ya que no se estaría en una convección libre con superficie isoterma, que sería  $h_e = 8,1$ , sino en un proceso con flujo de calor constante. Con él también se puede comparar las diferencias térmicas entre las paredes tras este flujo de calor y como varía el coeficiente de película o el coeficiente global de transmisión del calor con la reflexión y absorción.

Se usará para el cálculo del coeficiente global y el de conductividad térmica del siguiente apartado.

## 5. Cálculos del coeficiente global de transmisión del calor y conductividad térmica

Para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor, se realizarán todos los cálculos con las temperaturas del exterior del fluido irradiado, la pared exterior e interior en el estacionario. Se empieza con el coeficiente de película calculando el calor irradiado con la siguiente ecuación:

$$\frac{q}{A} = h \Delta T = h (T_{pared\ ext} - T_{flu\ ext})$$

h: Coeficiente de transmisión del calor  $(W/m^2K)$        $q/A$ : Flujo de calor por unidad de area  $(W/m^2)$

$T_{pared\ ext}$ : Media de las 4 temperaturas en el estacionario de la pared exterior ( $^{\circ}C$ )       $T_{flu\ ext}$ : Temperaturas en el estacionario del fluido exterior irradiado ( $^{\circ}C$ )

Una vez sacado este dato, usando la próxima ecuación, se despeja el coeficiente global de transmisión del calor.

$$\frac{q}{A} = U \Delta T = U (T_{pared\ ext} - T_{pared\ int})$$

h: Coeficiente de transmisión del calor  $(W/m^2K)$        $T_{pared\ int}$ : Media de las 4 temperaturas en el estacionario de la pared interior ( $^{\circ}C$ )

Es necesario el cálculo de este coeficiente global de transmisión del calor para ver la variación de este entre las diferentes paredes. Se halla U y no el coeficiente de conductividad térmica (k) porque las paredes están pintadas, y el coeficiente de conductividad térmica no es posible determinarlo en el caso que las paredes sean compuestas o heterogéneas y no puras, ya que no podemos colocar un termopar en la interfase pintura - pared. Solo se sacará el coeficiente de conductividad térmica para las paredes que no están pintadas, menos para el mortero con

ladrillo, es decir, para la madera, el pladur y el vidrio que son paredes simples. Para el ladrillo con mortero no es posible, no por estar pintado, sino por no ser un material macizo y tener aire en los huecos dentro del ladrillo que hace que no sea homogéneo sino heterogéneo y que la transferencia de calor sea, en vez de conducción, por convección. También hay que tener en cuenta que, en el ladrillo con el mortero, dependiendo de la situación del termopar, dependiendo de si se encuentra en una zona hueca o no, presentaría una conductividad térmica u otra, este es otro de los motivos para hallar el coeficiente global de transmisión del calor.

Para sacar el coeficiente de conductividad térmica para las paredes simples, van a ser necesarias dos ecuaciones. El procedimiento será muy similar al utilizado anteriormente para el cálculo del coeficiente global de transmisión del calor. En primer lugar, con la ecuación expuesta a continuación y los datos de las temperaturas de los termopares de las posiciones necesarias, se calculará el calor irradiado por el foco.

$$(T_{pared\ ext} - T_{flu\ ext}) = \frac{q}{h_e \cdot A}$$

Tras haber sacado el calor irradiado, y teniendo en cuenta el espesor de cada pared, se despeja el coeficiente de conductividad térmica.

$$(T_{pared\ ext} - T_{pared\ int}) = \frac{q}{\frac{K}{d} \cdot A}$$

*k*: Conductividad termica de la pared

d: Espesor de la pared (m)

(W/m K)

Estos coeficientes, el global de transmisión del calor y el de conductividad térmica, se sacan para analizar que pared es más aislante, dato muy importante en climas de temperaturas muy extremas.

Con todo esto, se realizan los cálculos y se exponen los resultados en la siguiente tabla:

| Distancia (cm) | pared          | Temperatura fluido exterior irradiado (°C) | Temperatura pared exterior (°C) | Temperatura pared interior (°C) | h (W/m <sup>2</sup> K) | q/A (W/m <sup>2</sup> ) | U (W/m <sup>2</sup> K) |
|----------------|----------------|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| 50             | mortero        | 32,87                                      | 61,99                           | 49,34                           | 7,570                  | 220,394                 | 17,428                 |
|                | mortero negro  | 33,64                                      | 70,21                           | 57,89                           | 7,570                  | 276,879                 | 22,467                 |
|                | mortero blanco | 32,50                                      | 52,08                           | 42,36                           | 7,576                  | 148,357                 | 15,258                 |
|                | madera negra   | 31,62                                      | 68,580                          | 54,06                           | 7,567                  | 279,658                 | 19,262                 |
|                | madera blanca  | 31,65                                      | 56,14                           | 40,35                           | 7,574                  | 185,495                 | 11,746                 |
|                | pladur negro   | 32,39                                      | 73,94                           | 69,40                           | 7,563                  | 314,240                 | 69,216                 |
|                | pladur blanco  | 30,06                                      | 62,24                           | 49,85                           | 7,571                  | 243,656                 | 19,661                 |
|                | vidrio negro   | 32,70                                      | 72,52                           | 70,65                           | 7,564                  | 301,145                 | 161,472                |
|                | vidrio blanco  | 31,75                                      | 54,77                           | 50,27                           | 7,575                  | 174,396                 | 38,720                 |
| 62,5           | mortero        | 34,60                                      | 52,56                           | 44,58                           | 7,030                  | 126,254                 | 15,823                 |
|                | mortero negro  | 34,64                                      | 55,91                           | 45,98                           | 7,028                  | 149,517                 | 15,051                 |
|                | mortero blanco | 34,33                                      | 46,25                           | 39,87                           | 7,034                  | 83,878                  | 13,139                 |
|                | madera negra   | 33,10                                      | 57,57                           | 45,71                           | 7,028                  | 171,999                 | 14,499                 |
|                | madera blanca  | 33,65                                      | 47,93                           | 37,76                           | 7,034                  | 100,427                 | 9,877                  |
|                | pladur negro   | 34,90                                      | 58,09                           | 54,55                           | 7,027                  | 162,981                 | 45,988                 |
|                | pladur blanco  | 34,16                                      | 44,78                           | 41,15                           | 7,077                  | 75,150                  | 20,708                 |
|                | vidrio negro   | 34,14                                      | 55,71                           | 55,60                           | 7,029                  | 151,620                 | 1353,752               |
|                | vidrio blanco  | 34,39                                      | 45,87                           | 44,35                           | 7,035                  | 80,729                  | 53,251                 |

|                       |                       |                |       |       |       |         |         |
|-----------------------|-----------------------|----------------|-------|-------|-------|---------|---------|
| <b>75</b>             | <b>mortero</b>        | 32,74          | 46,37 | 39,47 | 6,616 | 90,189  | 13,069  |
|                       | <b>mortero negro</b>  | 30,74          | 54,01 | 46,07 | 6,616 | 153,979 | 19,386  |
|                       | <b>mortero blanco</b> | 30,95          | 41,23 | 36,54 | 6,595 | 67,820  | 14,451  |
|                       | <b>madera negra</b>   | 45,30          | 52,56 | 41,17 | 6,609 | 47,984  | 4,213   |
|                       | <b>madera blanca</b>  | 30,10          | 42,62 | 35,01 | 6,597 | 82,588  | 10,854  |
|                       | <b>pladur negro</b>   | 33,67          | 49,86 | 47,75 | 6,617 | 107,142 | 50,730  |
|                       | <b>pladur blanco</b>  | 31,07          | 41,60 | 38,11 | 6,597 | 69,432  | 19,923  |
|                       | <b>vidrio negro</b>   | 30,73          | 50,77 | 49,00 | 6,618 | 132,642 | 74,855  |
|                       | <b>vidrio blanco</b>  | 28,65          | 41,20 | 39,41 | 6,588 | 82,676  | 46,214  |
|                       | <b>87,5</b>           | <b>mortero</b> | 30,10 | 43,84 | 38,34 | 6,269   | 86,155  |
| <b>mortero negro</b>  |                       | 30,40          | 45,69 | 40,63 | 6,276 | 95,955  | 18,963  |
| <b>mortero blanco</b> |                       | 30,19          | 38,51 | 35,07 | 6,254 | 52,023  | 15,132  |
| <b>madera negra</b>   |                       | 31,24          | 51,15 | 41,46 | 6,286 | 125,126 | 12,917  |
| <b>madera blanca</b>  |                       | 31,66          | 41,34 | 35,14 | 6,267 | 60,643  | 9,786   |
| <b>pladur negro</b>   |                       | 29,32          | 47,60 | 45,19 | 6,278 | 114,763 | 47,620  |
| <b>pladur blanco</b>  |                       | 29,77          | 40,58 | 37,20 | 6,259 | 67,654  | 20,022  |
| <b>vidrio negro</b>   |                       | 30,97          | 47,98 | 47,45 | 6,284 | 106,871 | 202,791 |
| <b>vidrio blanco</b>  |                       | 32,20          | 40,86 | 38,88 | 6,267 | 54,278  | 27,399  |
| <b>100</b>            |                       | <b>mortero</b> | 28,70 | 39,36 | 35,81 | 5,980   | 63,732  |
|                       | <b>mortero negro</b>  | 29,40          | 44,44 | 39,24 | 5,996 | 90,145  | 17,352  |
|                       | <b>mortero blanco</b> | 28,93          | 36,94 | 34,23 | 5,974 | 47,837  | 17,665  |
|                       | <b>madera negra</b>   | 29,13          | 45,23 | 36,97 | 5,997 | 96,536  | 11,691  |
|                       | <b>madera blanca</b>  | 29,06          | 36,40 | 32,10 | 5,973 | 43,815  | 10,199  |
|                       | <b>pladur negro</b>   | 29,46          | 44,60 | 42,00 | 5,996 | 90,778  | 34,928  |
|                       | <b>pladur blanco</b>  | 29,30          | 37,72 | 34,97 | 5,977 | 50,313  | 18,309  |
|                       | <b>vidrio negro</b>   | 29,44          | 43,12 | 43,64 | 5,992 | 81,949  | 156,391 |
|                       | <b>vidrio blanco</b>  | 30,67          | 37,23 | 35,48 | 5,979 | 39,212  | 22,433  |

Tabla 6. Cálculo del coeficiente global de transmisión del calor.

| Distancia (cm) | pared  | Temperatura fluido exterior irradiado (°C) | Temperatura pared exterior (°C) | Temperatura pared interior (°C) | h (W/m <sup>2</sup> K) | q/A (W/m <sup>2</sup> ) | K (W/m K) |
|----------------|--------|--|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------|
| 50             | madera | 32,00                                      | 59,48                           | 42,65                           | 7,571                  | 208,063                 | 0,334     |
|                | pladur | 31,10                                      | 64,47                           | 54,09                           | 7,569                  | 252,581                 | 0,243     |
|                | vidrio | 32,19                                      | 60,09                           | 60,19                           | 7,571                  | 211,252                 | 21,779    |
| 62,5           | madera | 34,69                                      | 50,59                           | 39,77                           | 7,031                  | 111,819                 | 0,279     |
|                | pladur | 33,70                                      | 50,54                           | 45,27                           | 7,032                  | 118,446                 | 0,225     |
|                | vidrio | 33,95                                      | 50,42                           | 50,82                           | 7,032                  | 115,836                 | 2,918     |
| 75             | madera | 30,20                                      | 45,27                           | 36,37                           | 6,605                  | 99,563                  | 0,302     |
|                | pladur | 30,50                                      | 43,74                           | 40,47                           | 6,602                  | 87,419                  | 0,267     |
|                | vidrio | 30,56                                      | 45,12                           | 45,59                           | 6,606                  | 96,197                  | 2,055     |
| 87,5           | madera | 30,71                                      | 43,31                           | 36,14                           | 6,270                  | 78,973                  | 0,298     |
|                | pladur | 30,91                                      | 42,66                           | 39,35                           | 6,268                  | 73,647                  | 0,223     |
|                | vidrio | 30,82                                      | 43,21                           | 43,47                           | 6,270                  | 77,682                  | 2,988     |
| 100            | madera | 28,79                                      | 38,97                           | 33,49                           | 5,979                  | 60,847                  | 0,300     |
|                | pladur | 28,85                                      | 38,14                           | 35,11                           | 5,977                  | 55,548                  | 0,183     |
|                | vidrio | 29,28                                      | 38,87                           | 38,70                           | 5,980                  | 57,318                  | 3,474     |

Tabla 7. Cálculo del coeficiente de conductividad térmica.

Estos coeficientes sirven para analizar las diferencias entre los materiales, ya que como no tienen el mismo espesor las paredes, se necesita un coeficiente en el que ya no importe el espesor.

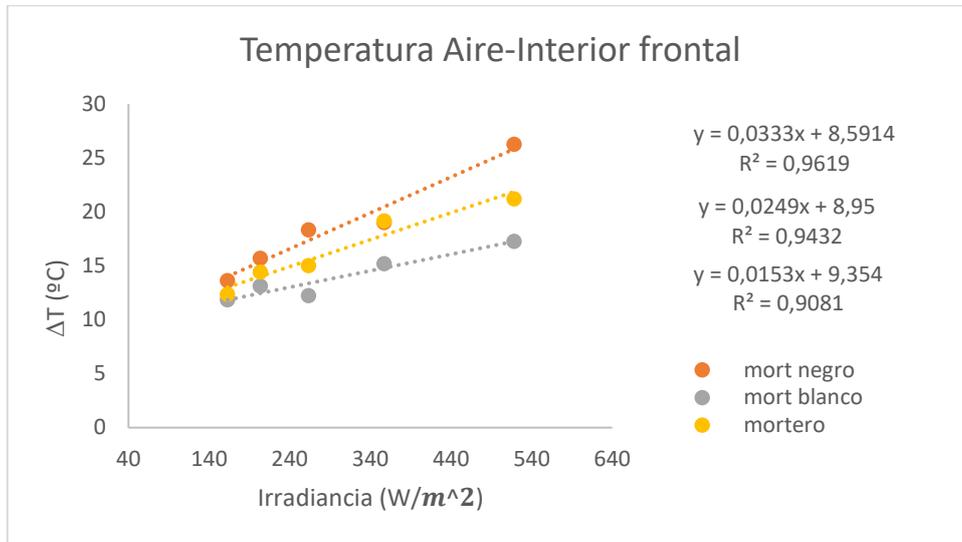
## **6. Análisis de datos**

### **6.1 Efecto de la irradiancia (o distancia)**

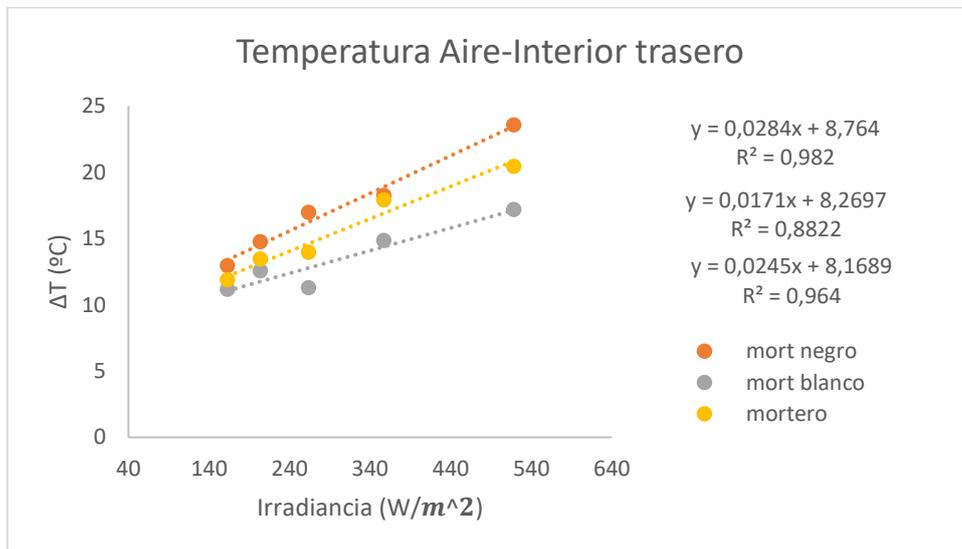
Para el comienzo del análisis de los datos obtenidos, se van a agrupar distintos materiales y distancias para visualizar las diferencias entre la diversidad de paredes, colores y distancias, que en este caso se representan mediante irradiancias. En primer lugar, se realizará la representación de la variación de las temperaturas con respecto a la totalidad de distancias del foco a la pared, así se comprobará como existe una relación entre absorción de energía y distancia. También se comprobará que guarda una relación la absorción de energía y el color de la pared. Por este motivo, se mostrarán los tres colores de las paredes en una misma gráfica.

Estas representaciones siguen una tendencia lineal y en ellas se mostrarán las diferentes ecuaciones de ajustes lineales de los datos tomados. También se pueden observar unos coeficientes de regresión muy altos, que indican un buen ajuste de las ecuaciones a los datos.

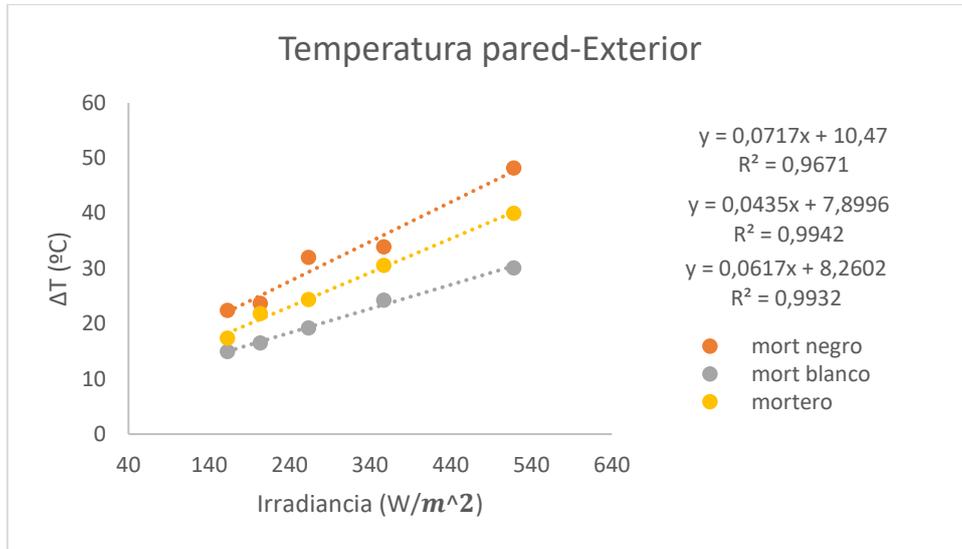
Se ha decidido representar las tres variaciones de una misma pared en la misma gráfica para que se muestre visualmente como existe una gran diferencia entre los distintos colores del exterior de la pared. Un resumen general de lo observado es que con el color negro se alcanzan temperaturas mucho más altas y con el color blanco, al contrario. Esto justifica que posteriormente se estudien las pinturas termocrómicas. Teniendo que analizarse también para que temperaturas es mejor un color u otro para saber elegir la pintura termocrómica correctamente según el rango en el que cambie de color esta.



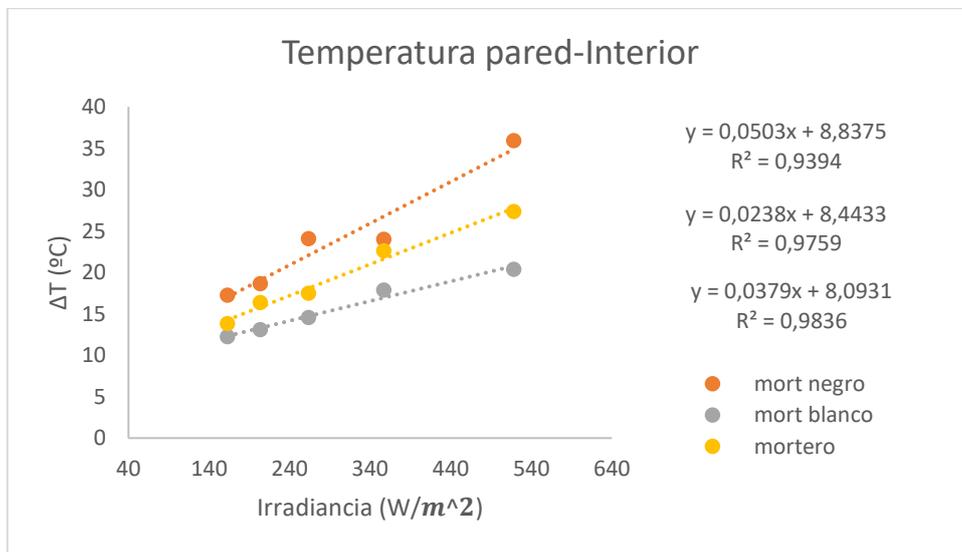
Gráfica 12. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.



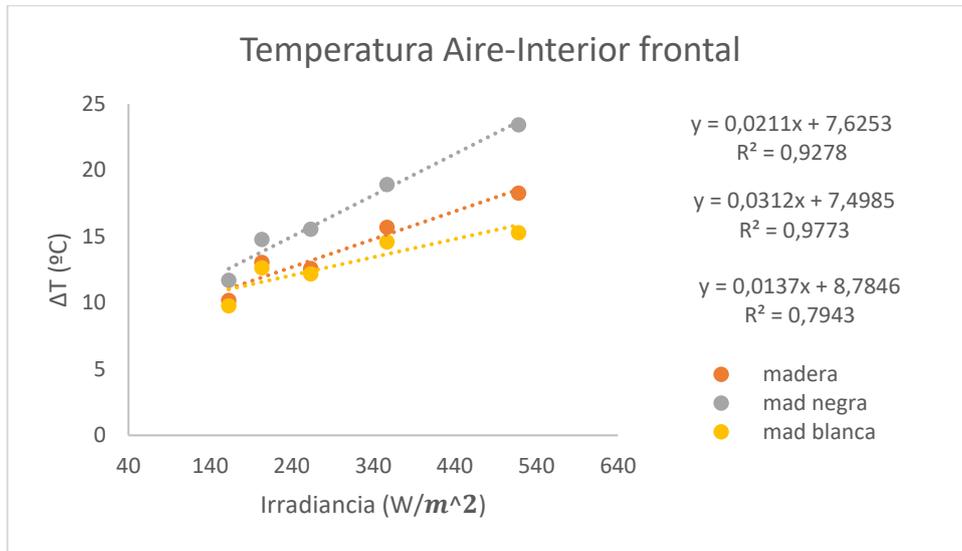
Gráfica 13. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.



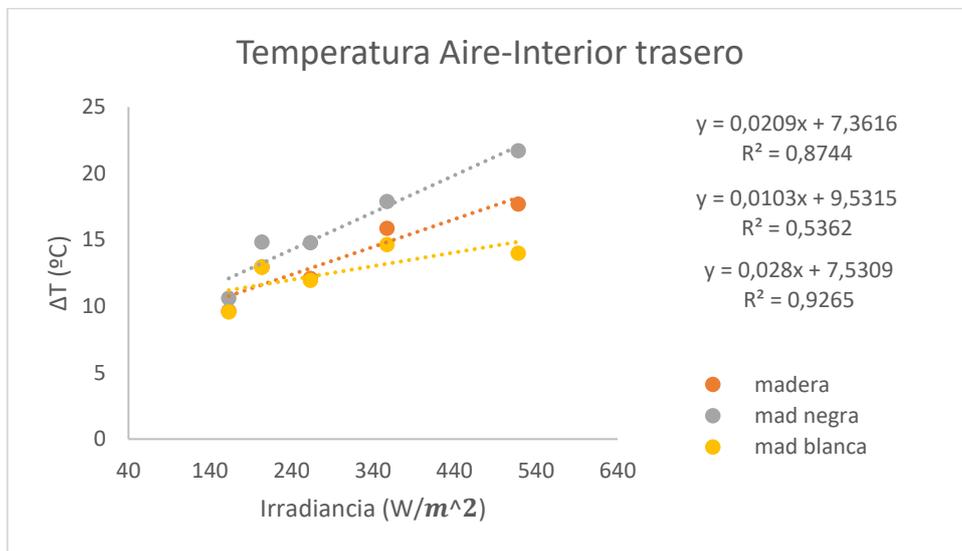
Gráfica 14. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero.



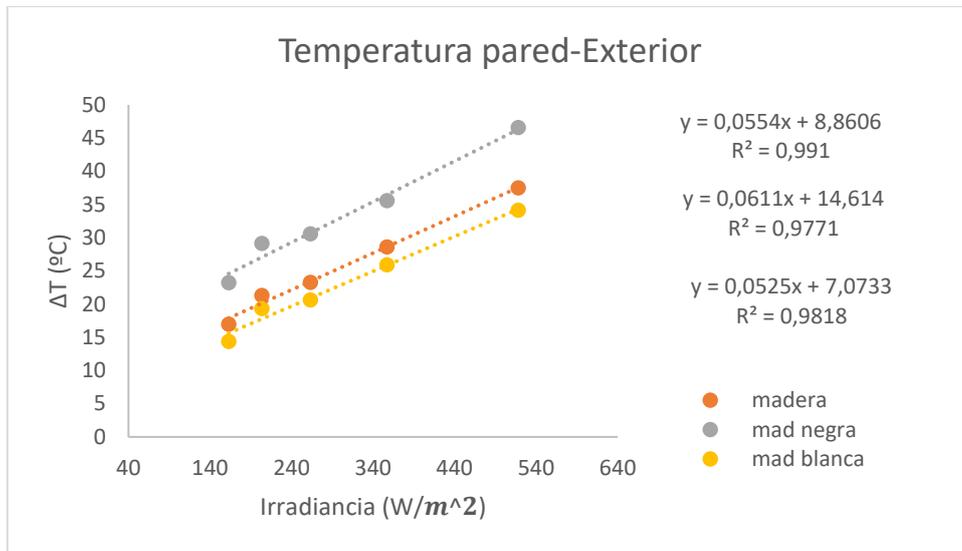
Gráfica 15. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero.



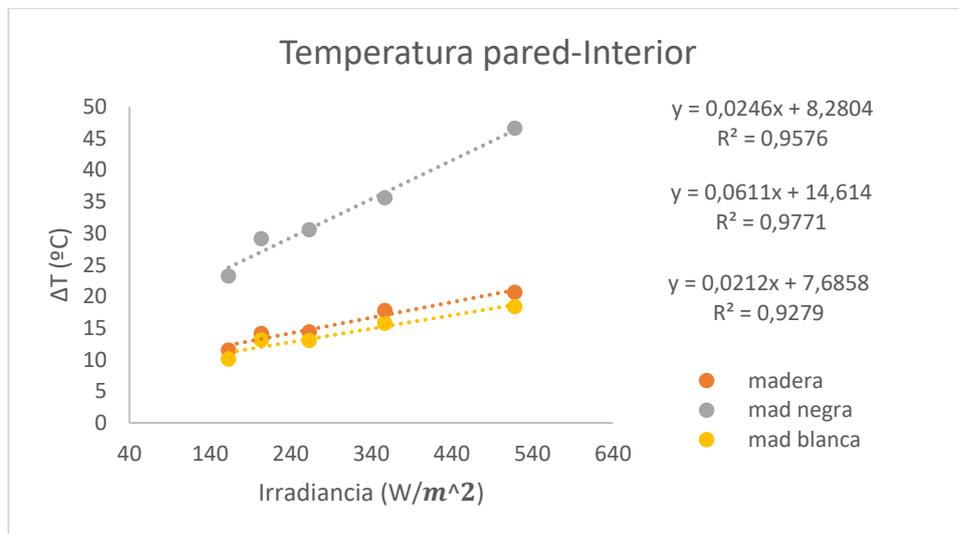
Gráfica 16. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.



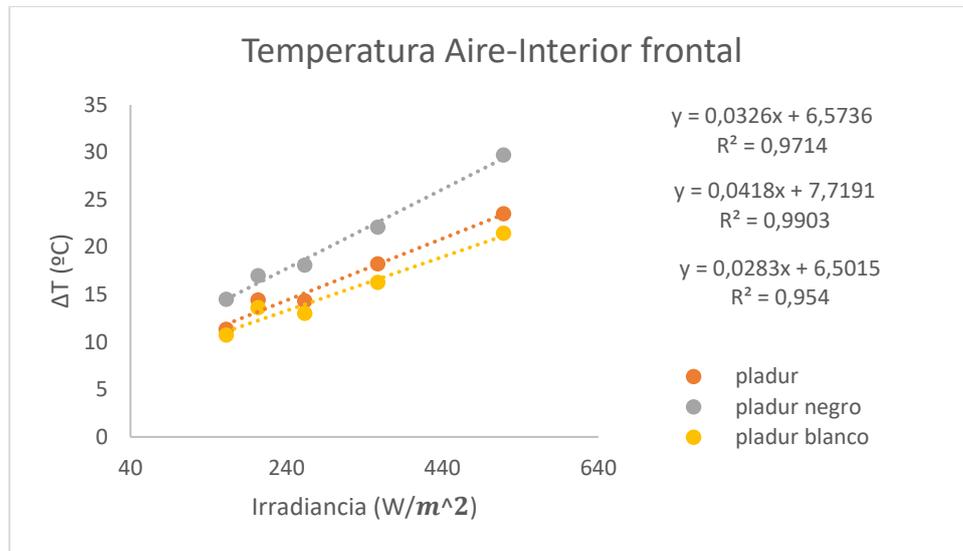
Gráfica 17. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.



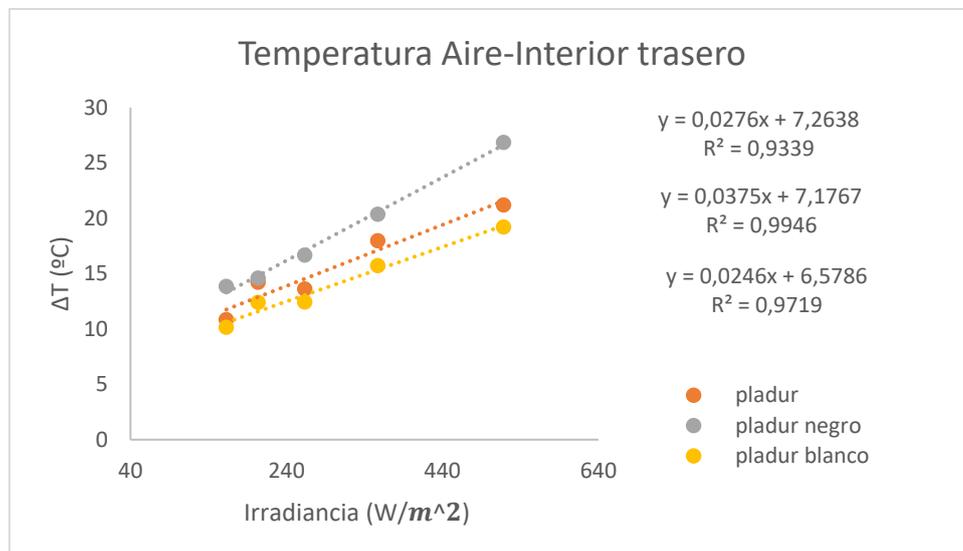
Gráfica 18. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero.



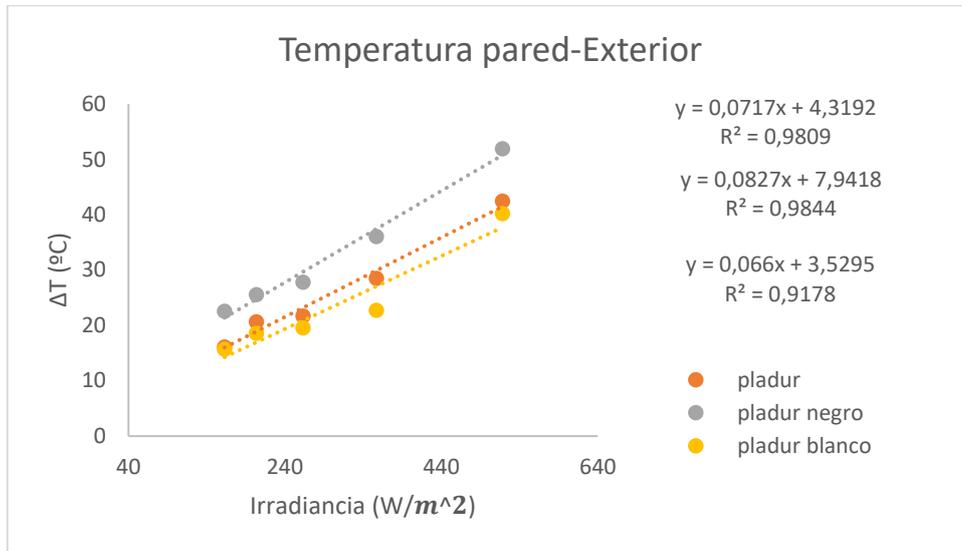
Gráfica 19. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero.



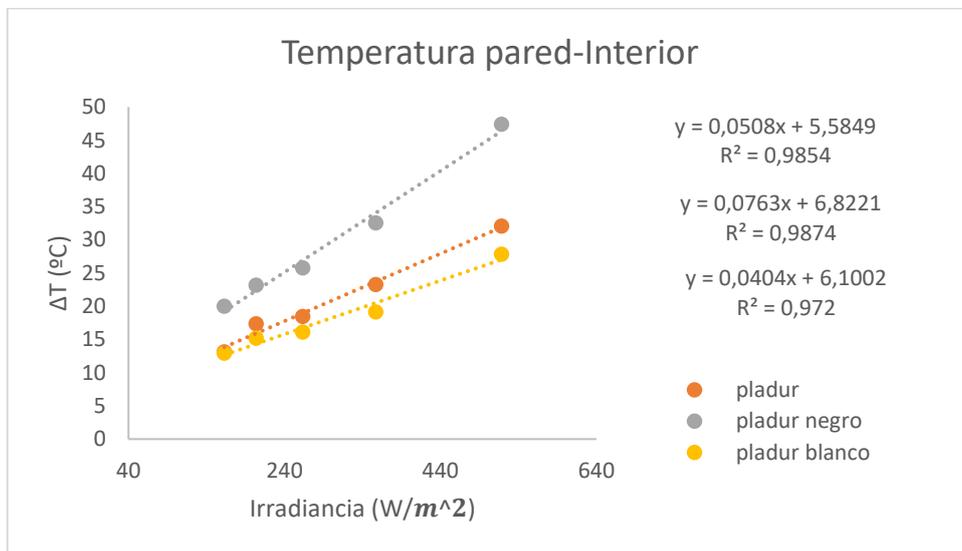
Gráfica 20. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.



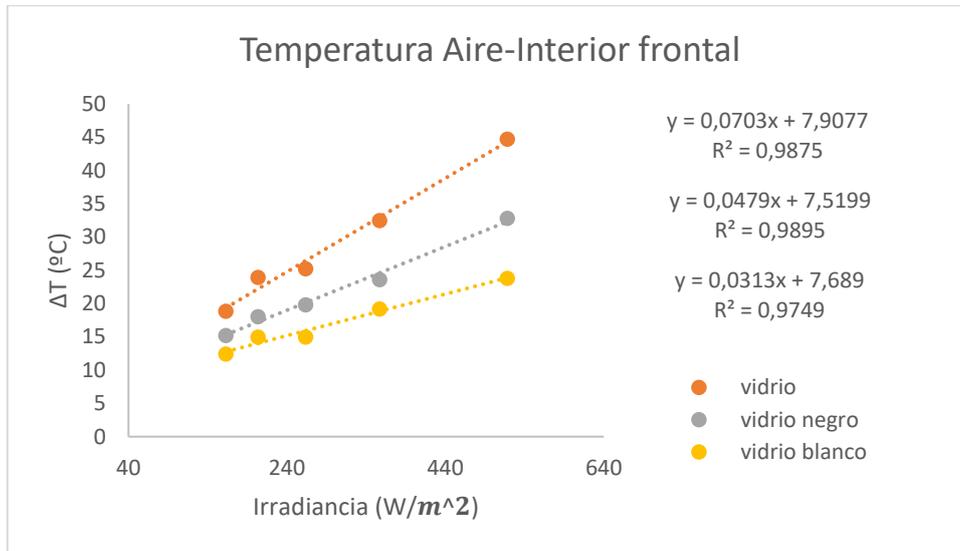
Gráfica 21. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.



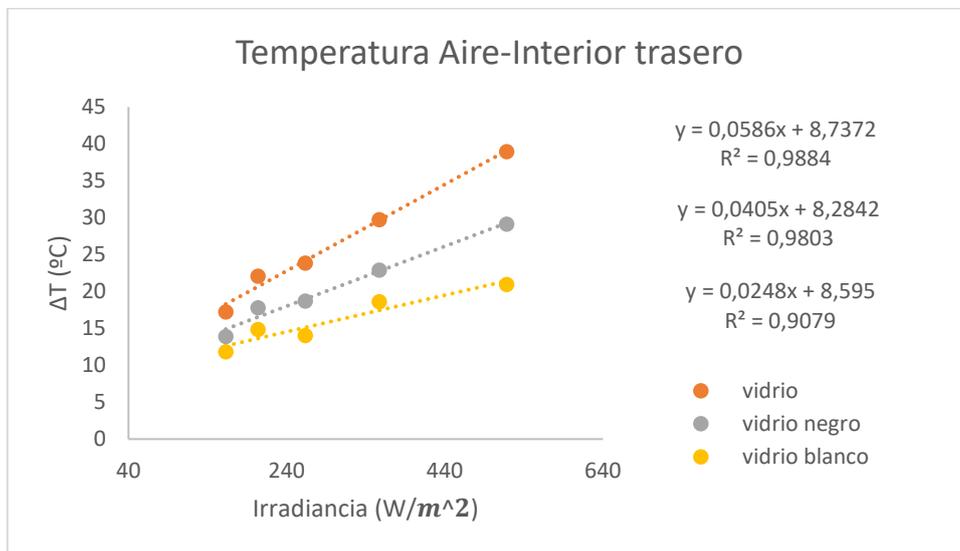
Gráfica 22. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero.



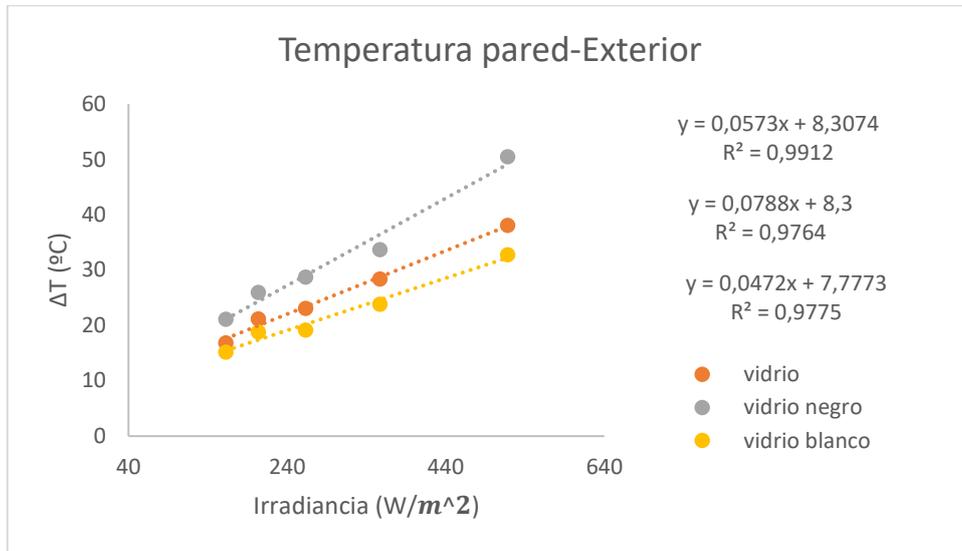
Gráfica 23. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero.



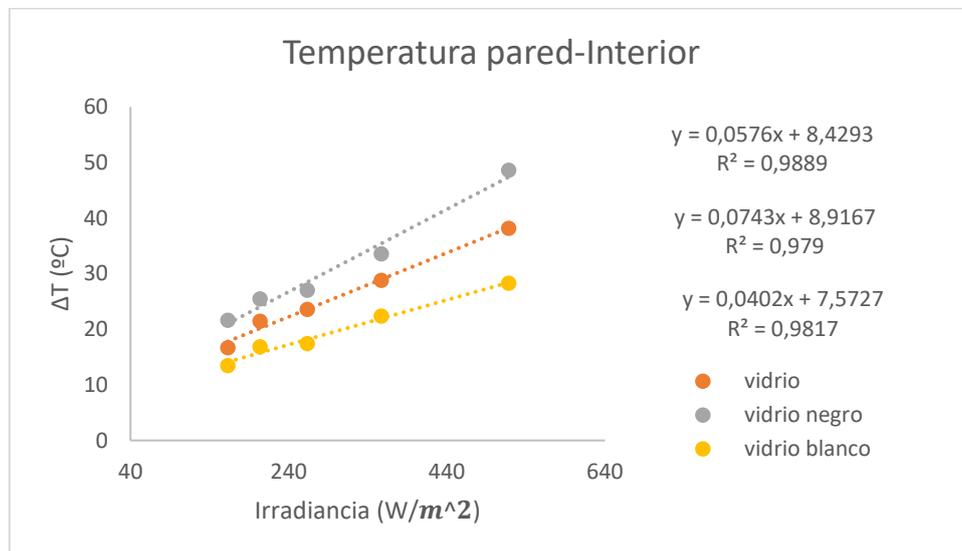
Gráfica 24. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para el mortero.



Gráfica 25. Representación de la temperatura en el aire interior trasero para el mortero.



Gráfica 26. Representación de la temperatura en la pared exterior para el mortero.



Gráfica 27. Representación de la temperatura en la pared interior para el mortero.

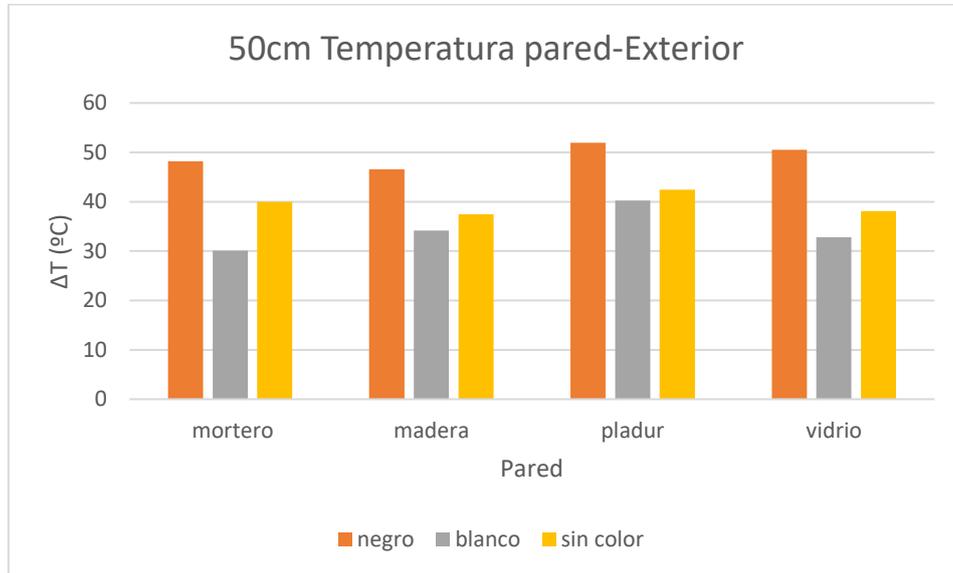
Se puede comprobar que para todas las paredes la pared pintada de negro es la que tiene mayor variación, alcanzando una mayor temperatura ya que se considera como temperatura inicial de todos los termopares la misma, 22°C. Al contrario, la pared pintada de blanco tiene menor variación de temperatura. Esto que ocurre con estas dos paredes es normal por las características que aportan estos colores a cualquier material de absorción y reflexión, como se ha visto en la introducción. La pared sin pintar queda entre estos dos colores, menos el vidrio que se analizara más profundamente.

La regresión lineal que siguen los datos es creciente, es decir, conforme aumenta la irradiancia o flujo de calor que es conforme decrece la distancia del foco a la pared, la variación de temperaturas de todas las paredes, indistintamente del color, va aumentando. Esto es lógico ya que, al llegarle un flujo de calor más directo, fuerte y concentrado, alcanza mayor temperatura la pared de un mismo color que estando el foco a mayor distancia, de dicha pared, porque la irradiancia disminuye con el inverso de la distancia al cuadrado.

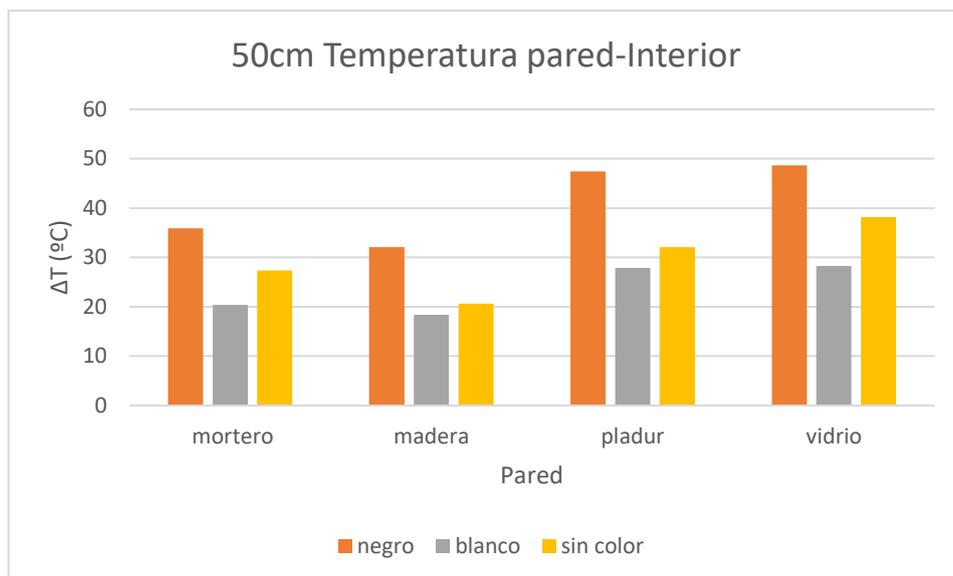
Con el ajuste obtenido para cada material, se podría calcular la variación de temperatura para la distancia que se desee sin la necesidad de un nuevo experimento de cuatro horas de duración. Esto supone un gran ahorro de tiempo y la posibilidad de obtener un rango más amplio de datos en futuros experimentos. Esta acción es posible ya que los coeficientes de regresión tienden a 1 que indican que la ecuación que hemos obtenido es válida para la obtención de la temperatura sin el experimento.

## **6.2 Efecto de los diferentes colores empleadas**

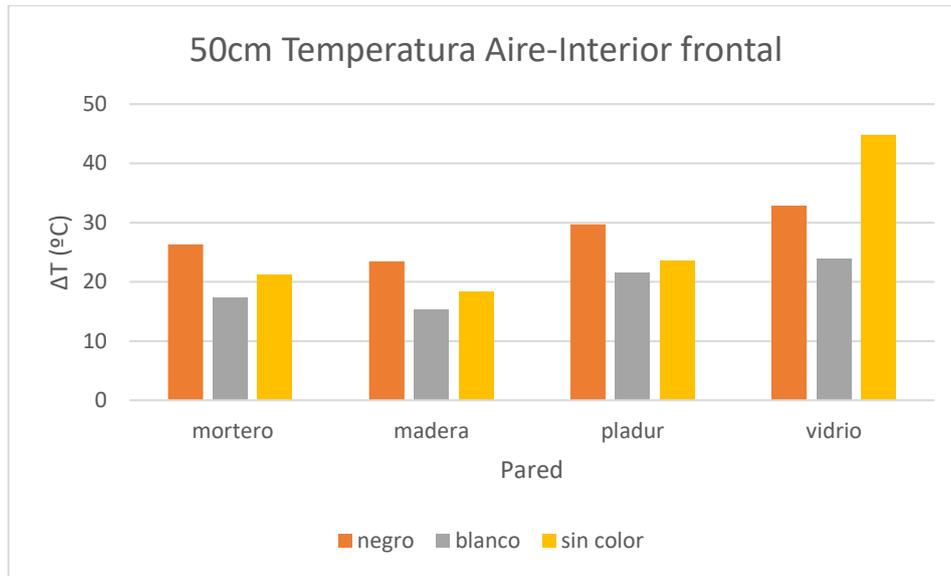
Para visualizar todas las paredes y sus temperaturas máximas alcanzadas se utilizan diagramas de barras para cada distancia del foco, es decir, para una irradiancia fija. Se muestran las tres posiciones de termopares más importantes para los cálculos térmicos expuestos anteriormente.



Gráfica 28. Representación de la temperatura en la pared exterior para 50cm.



Gráfica 29. Representación de la temperatura en la pared interior para 50cm.



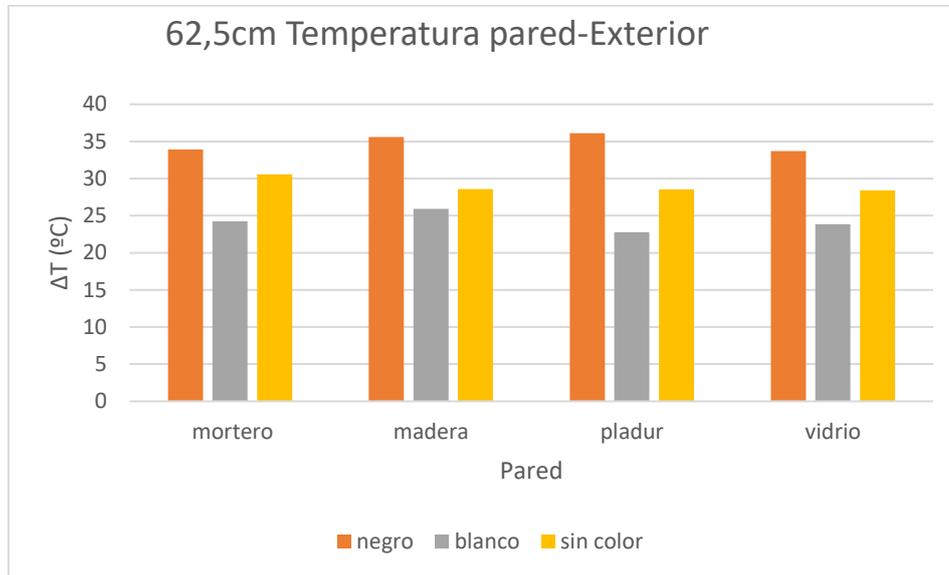
Gráfica 30. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 50cm.

Con el foco a 50 cm la variación para las diferentes paredes de la temperatura respecto del exterior de la pared y el aire interior es:

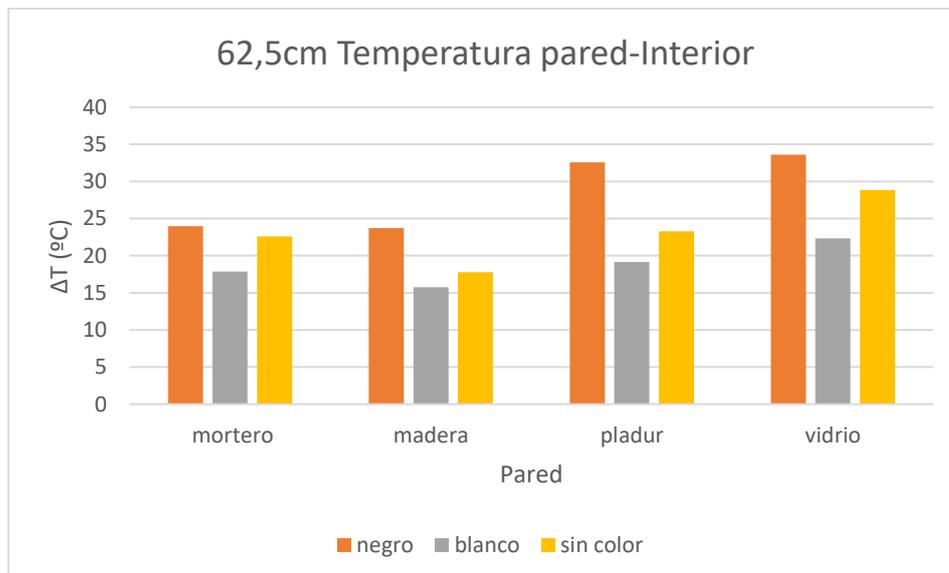
- Mortero:  $40 - 21 = 19$
- Mortero blanco:  $30 - 18 = 12$
- Mortero negro:  $49 - 27 = 22$
- Madera:  $38 - 18 = 20$
- Madera blanca:  $34 - 25 = 9$
- Madera negra:  $47 - 24 = 23$
- Pladur:  $43 - 24 = 19$
- Pladur blanco:  $40 - 21 = 19$
- Pladur negro:  $51 - 30 = 21$
- Vidrio:  $38 - 45 = -7$
- Vidrio blanco:  $33 - 24 = 9$
- Vidrio negro:  $50 - 23 = 27$

Quitando la pared de vidrio sin pintar que tiene una condición diferente al resto, ya que por su absorción y transmisión de la luz deja pasar toda la radiación electromagnética, hace que la diferencia de temperatura entre el exterior de la pared y la interior sea mínima, el resto de paredes presentan variaciones de temperatura muy parecidas para el mismo tipo de color de pared, y rangos similares de U. Hay que puntualizar que en el rango de valores que nos estamos moviendo, el efecto del color es más acusado que el del coeficiente global de transmisión del calor. Como el color negro tiene mayor absorción, todas las ondas electromagnéticas, las paredes pintadas de este color presentan una mayor variación de temperaturas entre la pared exterior y el aire interior, sin tener en cuenta sus temperaturas máximas alcanzadas. Sin embargo, las paredes pintadas de blanco, como este color tiene una reflexión de todas estas ondas serán las que tendrán menor variación de temperaturas. Las paredes sin pintar, exceptuando la del vidrio, tendrán una variación intermedia entre la de estos dos colores.

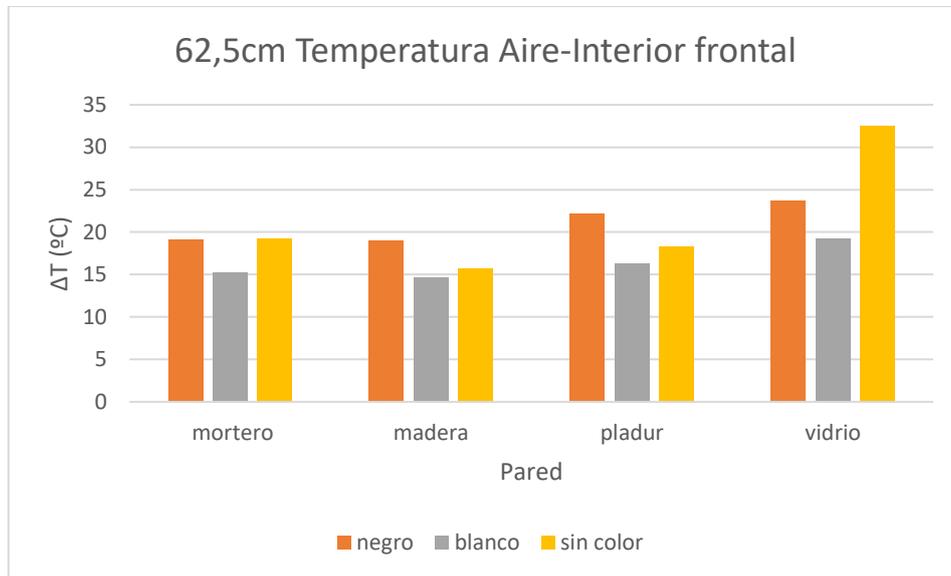
Para la pared de vidrio sin pintar, la transparencia de este dependerá del contenido de sus elementos, pero se puede comprobar que, en estos ensayos el aire interior alcanza mayor temperatura que el exterior de la pared. Esto es porque esta pared, a pesar de no dejar pasar prácticamente la luz ultravioleta e infrarroja, no presenta oposición al espectro visible, como es el foco, y supone, para la eficiencia energética, un efecto negativo.



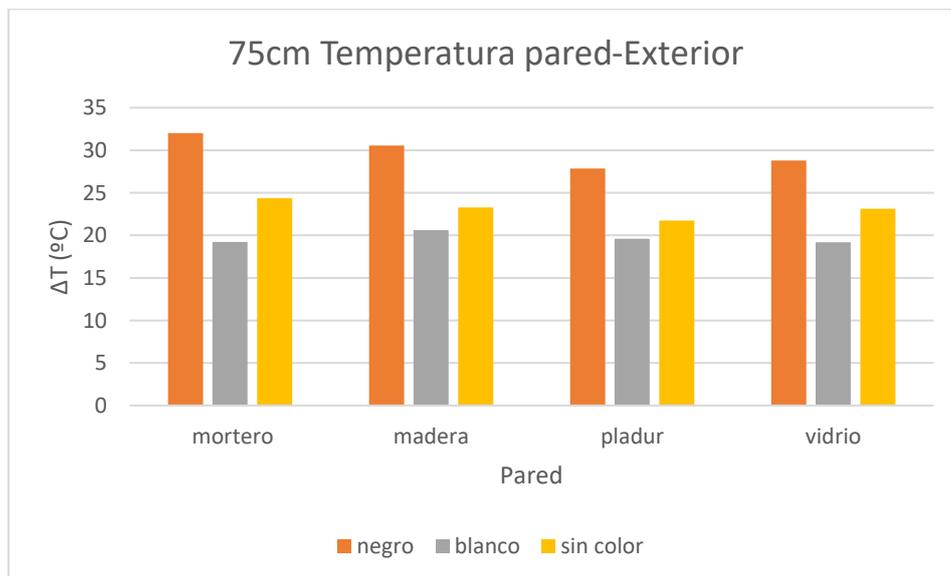
Gráfica 31. Representación de la temperatura en la pared exterior para 62,5cm.



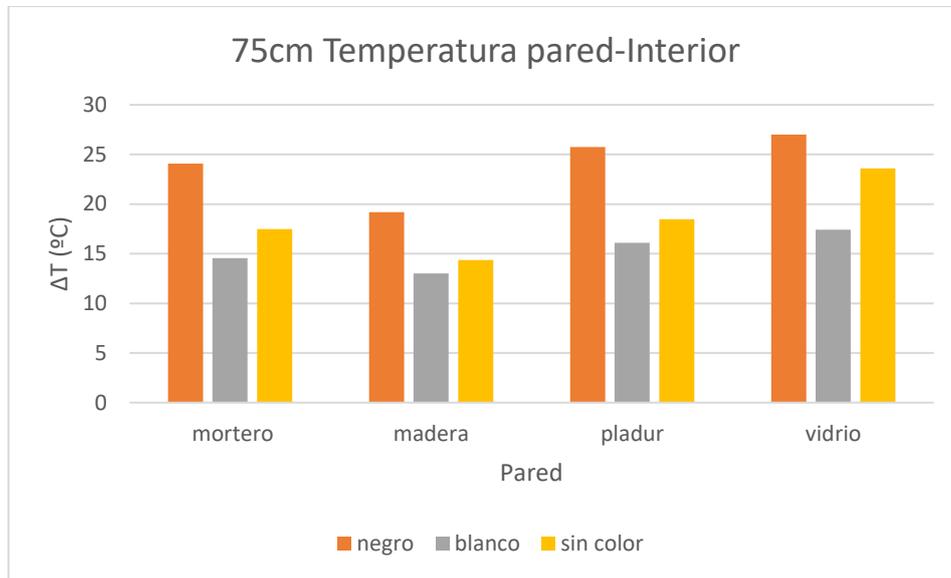
Gráfica 32. Representación de la temperatura en la pared interior para 62,5cm.



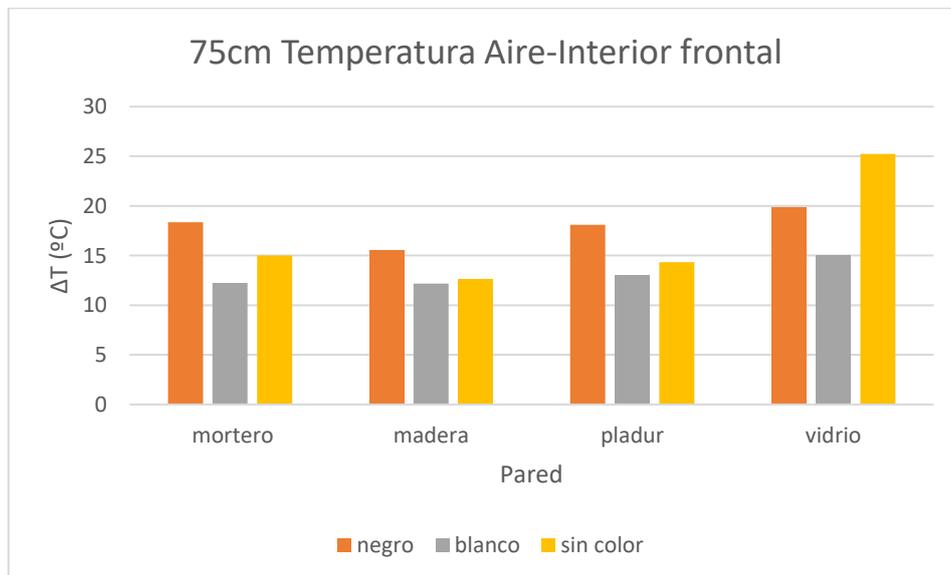
Gráfica 33. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 62,5cm.



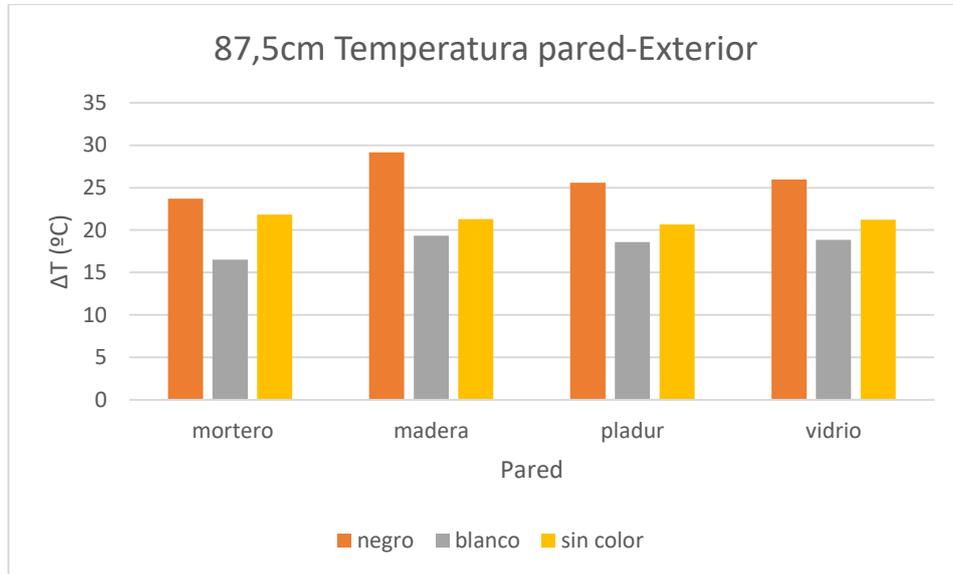
Gráfica 34. Representación de la temperatura en la pared exterior para 75cm.



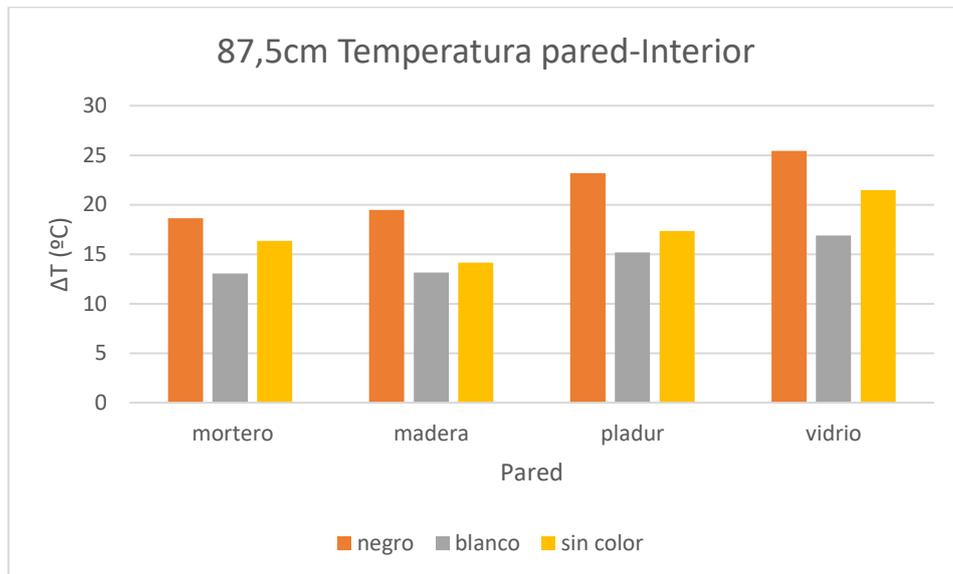
Gráfica 35. Representación de la temperatura en la pared interior para 75cm.



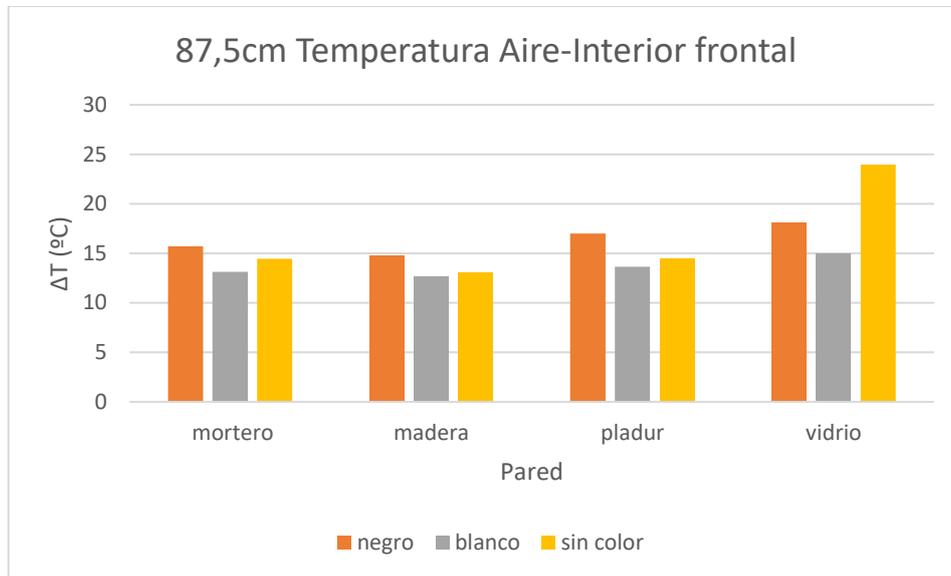
Gráfica 36. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 75cm.



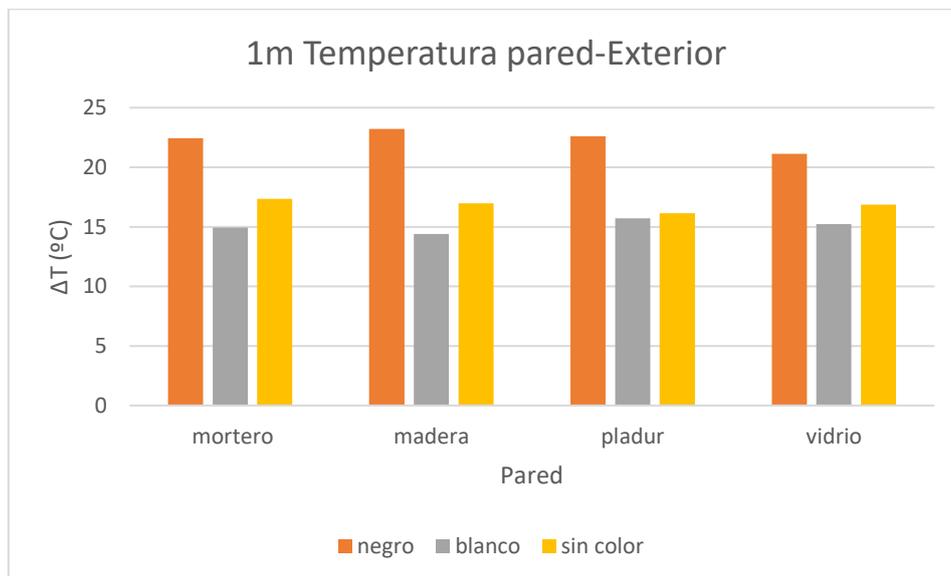
Gráfica 37. Representación de la temperatura en la pared exterior para 87,5cm.



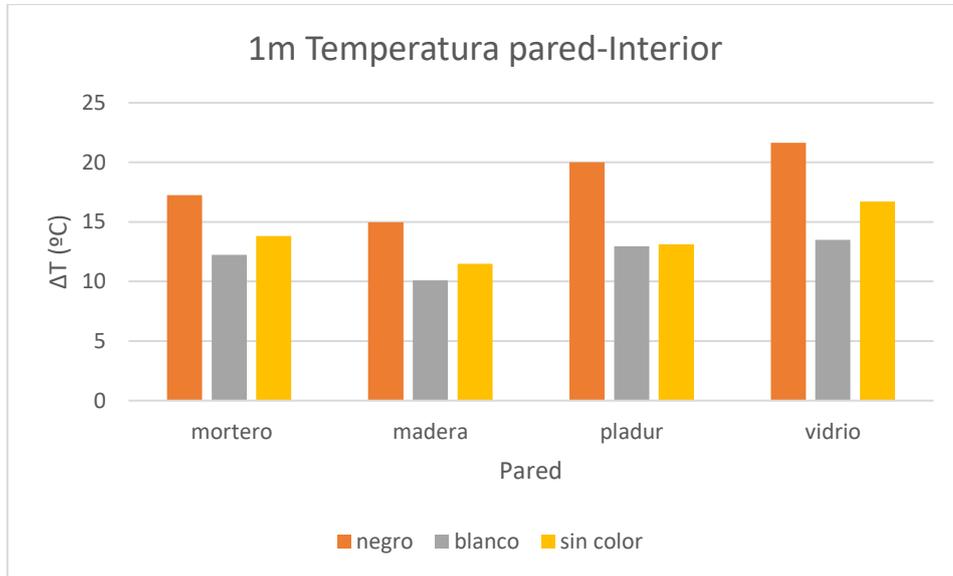
Gráfica 38. Representación de la temperatura en la pared interior para 87,5cm.



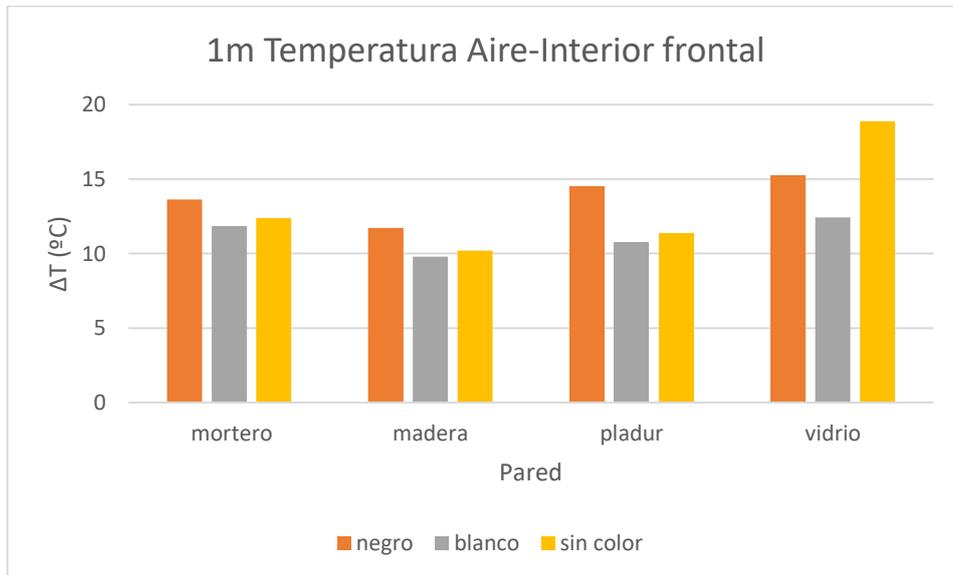
Gráfica 39. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 87,5cm.



Gráfica 40. Representación de la temperatura en la pared exterior para 1 m.



Gráfica 41. Representación de la temperatura en la pared interior para 1 m.



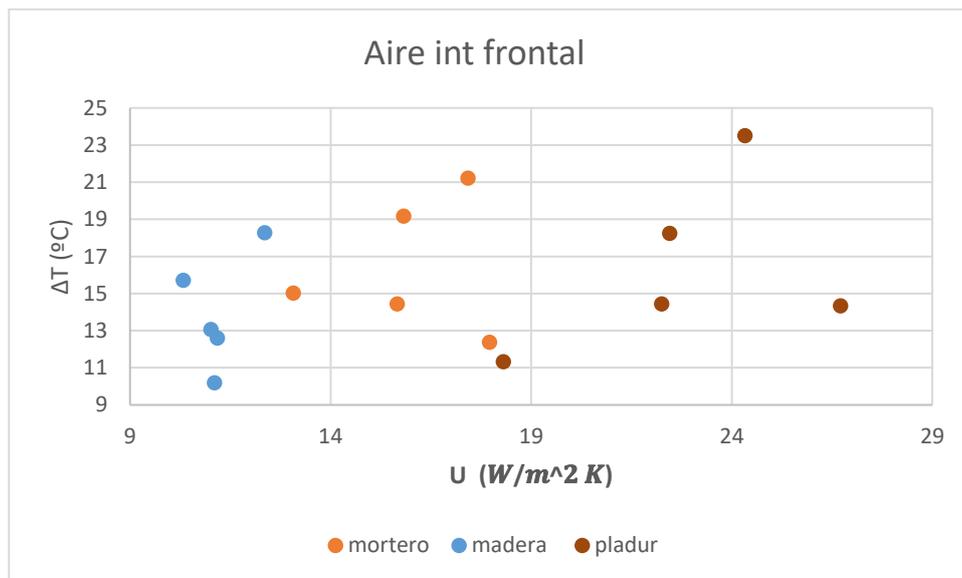
Gráfica 42. Representación de la temperatura en el aire interior frontal para 1 m.

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

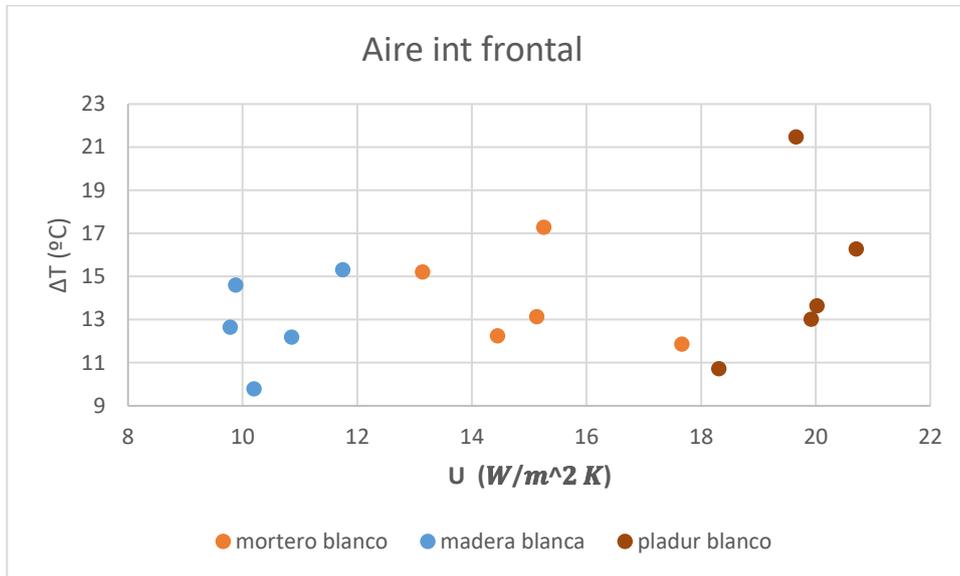
También se puede comprobar que, a mayor distancia donde la irradiancia va disminuyendo, la variación de temperatura y por tanto la temperatura máxima alcanzada es mucho más baja que para distancias menores.

Se realizaron también los diagramas de barras para el aire interior trasero, pero por la cantidad de representaciones obtenidas y con el fin de no alargar más el proyecto, como es la posición menos importante para los cálculos térmicos no se presentarán.

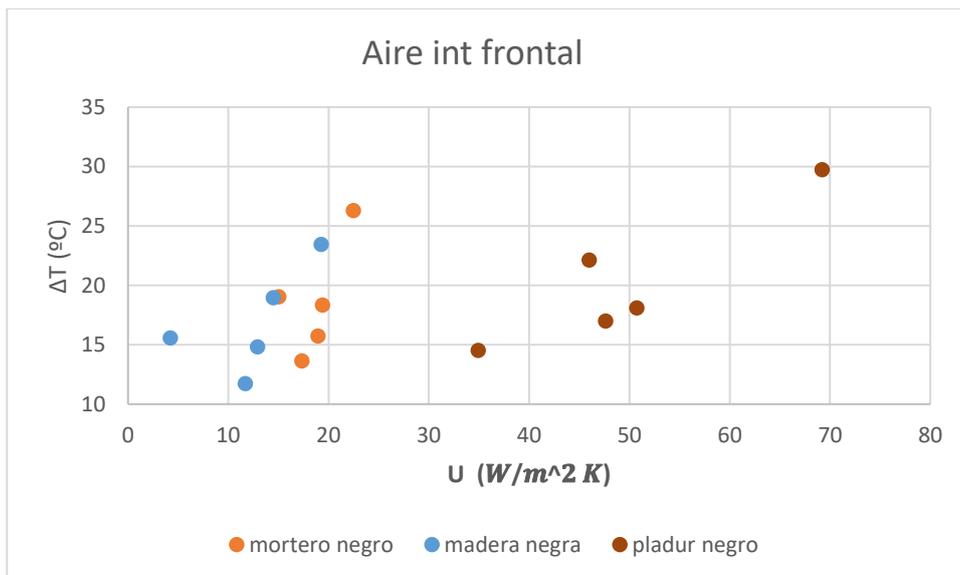
Para ver la diferencia entre los materiales, sin tener en cuenta su espesor, se ha representado la variación de temperatura frente al coeficiente global de transmisión del calor.



Gráfica 43. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal.



Gráfica 44. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal.



Gráfica 45. Representación del coeficiente global de transmisión del calor en el aire interior frontal.

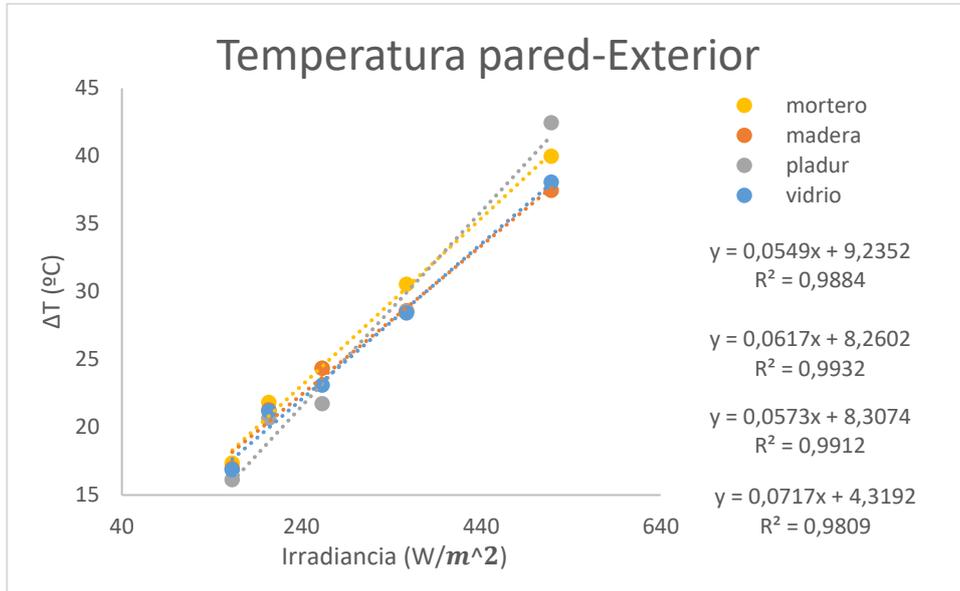
Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

Se puede ver como cada material tiene su rango para el coeficiente global de transmisión del calor, independientemente de la distancia. El más alto para todos los colores es el pladur, y alcanza mayores temperaturas también. La madera, al ser el más aislante, tiene el coeficiente más bajo y concentrado entre los diferentes datos. Se ve como el que más varía es el mortero, porque es una loseta con aire.

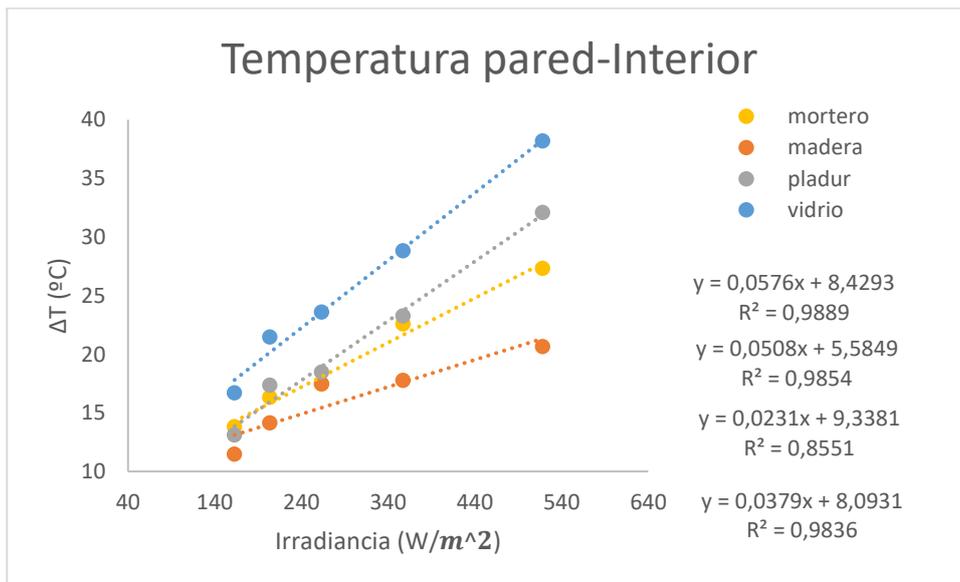
Existe diferencia en el coeficiente según los colores, el color negro aumenta el coeficiente y la variación de temperatura para una misma distancia, y el color blanco hace lo contrario.

### **6.3 Efecto del material empleado en la temperatura final alcanzada**

Para un análisis más amplio de los datos obtenidos, se realizaron también, tanto para las primeras gráficas con tendencia lineal como para las del tiempo, más representaciones con otra agrupación de datos. Se hicieron para las mismas variables, pero con la agrupación del mismo color de pared en una misma gráfica, es decir, todas las sin pintar juntas, las negras en otras y por último las blancas. Todo esto para las mismas posiciones que las anteriores, pared exterior, interior, aire interior frontal y trasero. Como se han obtenido tanta cantidad y las relaciones se observaban mejor en las expuestas, no se han colocado todas ellas. Solo para las paredes sin pintar, la de la pared exterior y las de la pared interior.



Gráfica 59. Representación de la temperatura en la pared exterior para las paredes sin pintar.



Gráfica 60. Representación de la temperatura en la pared interior para las paredes sin pintar.

Uso de materiales termocrómicos en edificación: impacto en la eficiencia energética.

En estas dos representaciones se puede ver que, en la pared exterior, la pendiente del ajuste lineal que siguen los datos para cada una, son muy parecidas, siendo la que más difiere la del vidrio. Esto es normal ya que en este caso solo influye la distancia a la que este el foco y en menor escala la pequeña diferencia de color que tengan. Sin embargo, en la pared interior sí que hay más diferencia en la pendiente de cada una de las paredes. Se puede decir que el tipo de material de las paredes influye en la variación de temperatura del interior de la pared. Estos resultados son esperados debido a la conductividad térmica de los materiales usados, puesto que en la variación de temperatura del interior de la pared influye la conductividad térmica del material. Viéndose que la madera como es la más aislante queda con una menor variación de la temperatura.

#### **6.4 Evolución de las constantes de tiempo**

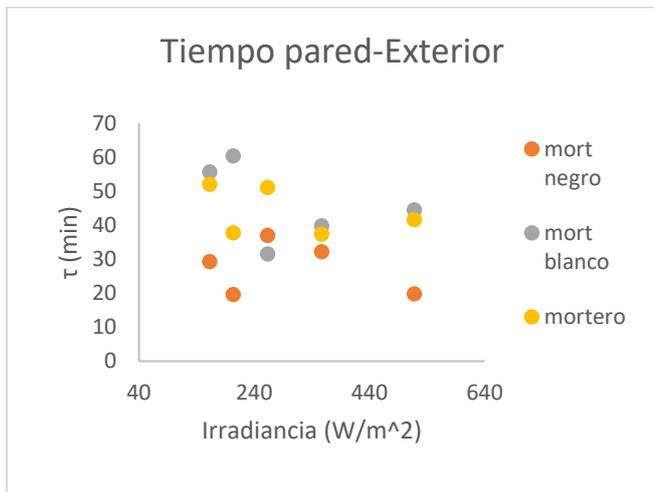
Se analizó representándolo gráficamente el tiempo en el que se alcanza el régimen estacionario, pero los datos no seguían ninguna tendencia, lo único que se pudo sacar es que, para una misma pared, independientemente de la distancia del foco, el tiempo que tarda en llegar al estacionario es similar.

Se va a exponer una tabla con la media de los tiempos para un mismo material en todas las distancias, con el ajuste según su desviación típica, y el error que presentaría. Así se puede ver numéricamente lo que se presenta en las representaciones.

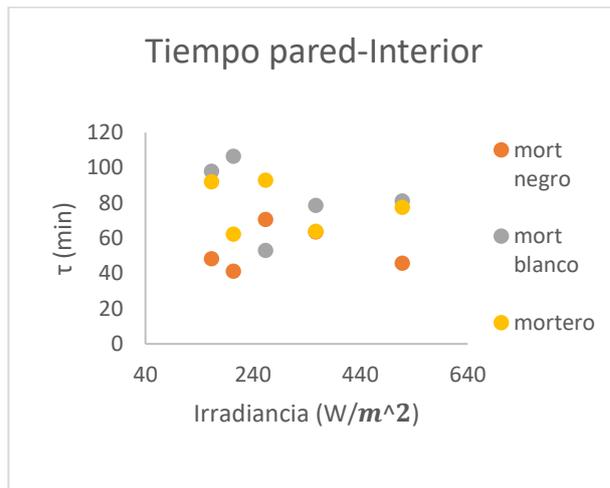
| <b>pared</b>              | <b>Media<br/>aire<br/>interior<br/>frontal</b> | <b>Media<br/>aire<br/>interior<br/>trasero</b> | <b>Media<br/>pared<br/>exterior</b> | <b>Media<br/>pared<br/>interior</b> | <b>Error<br/>aire<br/>interior<br/>frontal</b> | <b>Error<br/>aire<br/>interior<br/>trasero</b> | <b>Error<br/>pared<br/>exterior</b> | <b>Error<br/>pared<br/>interior</b> |
|---------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>mortero</b>            | 150  | 170  | 44                                  | 80                                  | 10   | 9  | 3                                   | 7                                   |
| <b>mortero<br/>negro</b>  | 100  | 120  | 28                                  | 50                                  | 4  | 13   | 3                                   | 6                                   |
| <b>mortero<br/>blanco</b> | 140  | 160  | 50                                  | 80                                  | 17   | 20   | 5                                   | 9                                   |
| <b>madera</b>             | 130  | 150  | 40                                  | 80                                  | 6  | 9  | 8                                   | 8                                   |
| <b>madera<br/>negra</b>   | 100  | 110  | 17                                  | 60                                  | 10   | 8  | 2                                   | 6                                   |
| <b>madera<br/>blanca</b>  | 130  | 150  | 30                                  | 80                                  | 12   | 13   | 6                                   | 11                                  |
| <b>pladur</b>             | 80   | 80   | 30                                  | 40                                  | 8  | 9  | 5                                   | 6                                   |
| <b>pladur<br/>negro</b>   | 70   | 80   | 17                                  | 26                                  | 4  | 6  | 2                                   | 1                                   |
| <b>pladur<br/>blanco</b>  | 80   | 90   | 30                                  | 40                                  | 12   | 14   | 6                                   | 8                                   |
| <b>vidrio</b>             | 60   | 70   | 40                                  | 50                                  | 8  | 7  | 5                                   | 5                                   |
| <b>vidrio<br/>negro</b>   | 70   | 70   | 27                                  | 34                                  | 7  | 5  | 4                                   | 4                                   |
| <b>vidrio<br/>blanco</b>  | 70   | 70   | 30                                  | 40                                  | 13   | 17   | 6                                   | 8                                   |

Tabla 8. Media de la constante de tiempo y error.

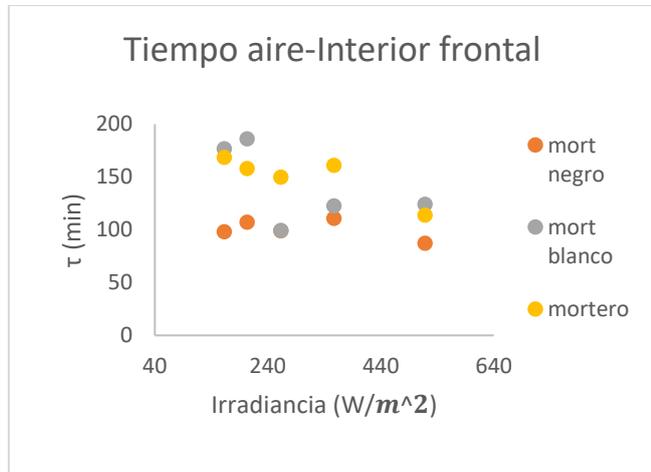
Para la pared del mortero:



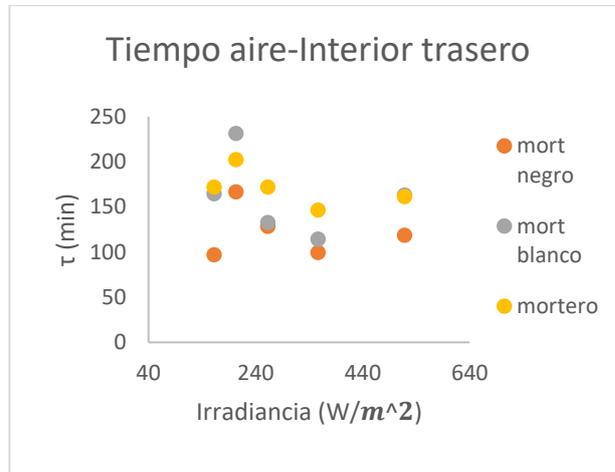
Gráfica 43. Representación del tiempo en la pared exterior.



Gráfica 44. Representación del tiempo en la pared interior.

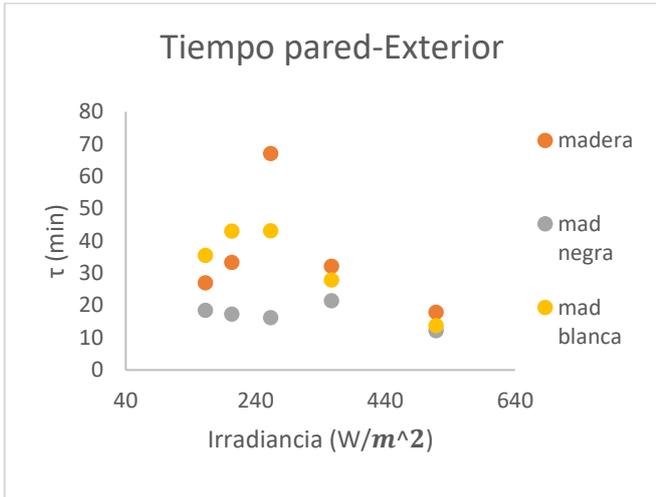


Gráfica 45. Representación del tiempo en el aire interior frontal.

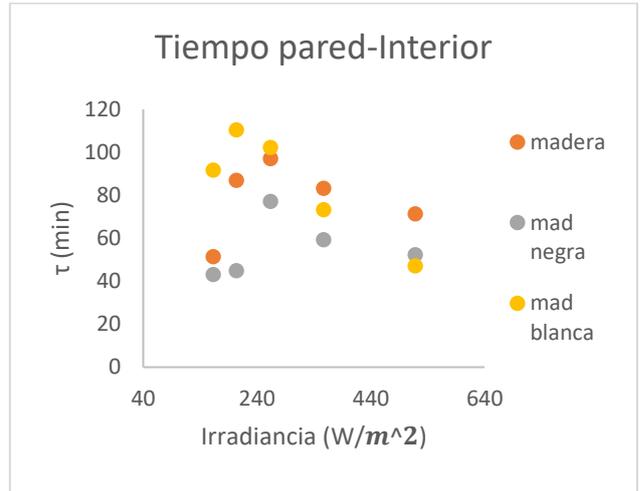


Gráfica 46. Representación del tiempo en el aire interior trasero.

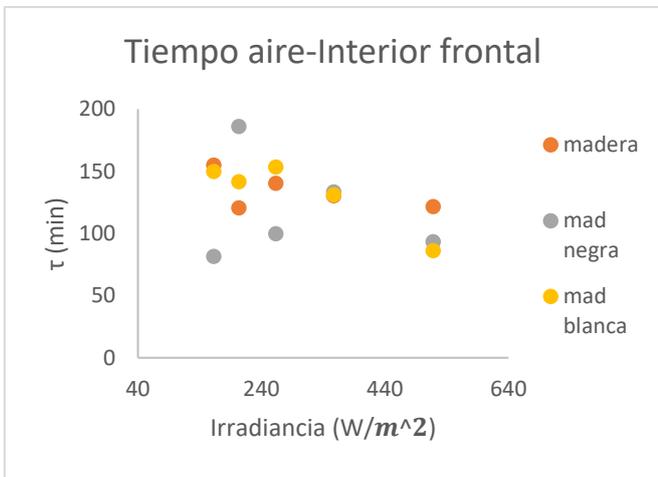
Para la pared de la madera:



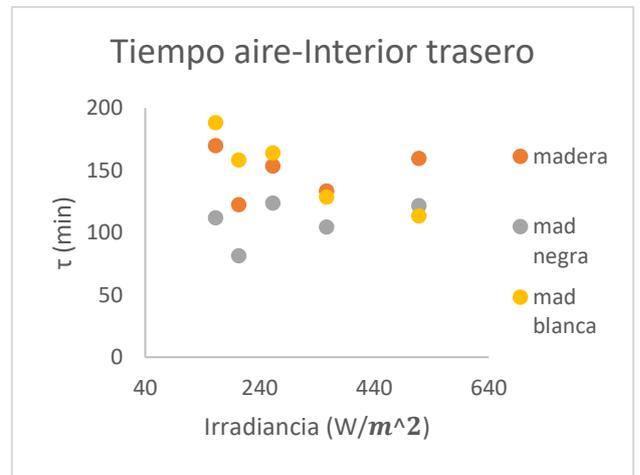
Gráfica 47. Representación del tiempo en la pared exterior.



Gráfica 48. Representación del tiempo en la pared interior.

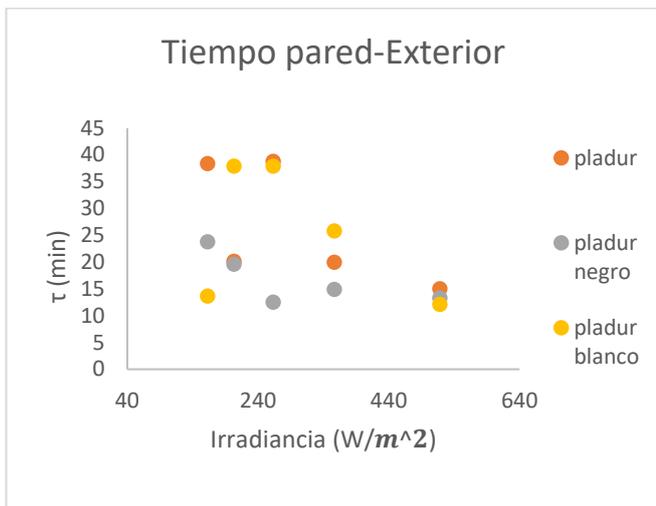


Gráfica 49. Representación del tiempo en el aire interior frontal.

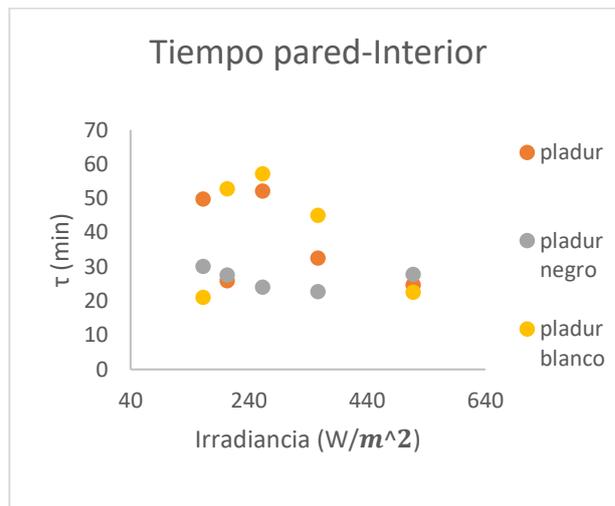


Gráfica 50. Representación del tiempo en el aire interior trasero.

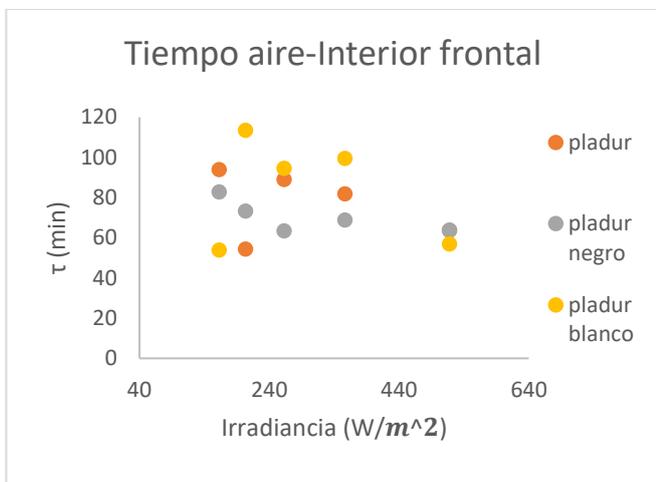
Para la pared del pladur:



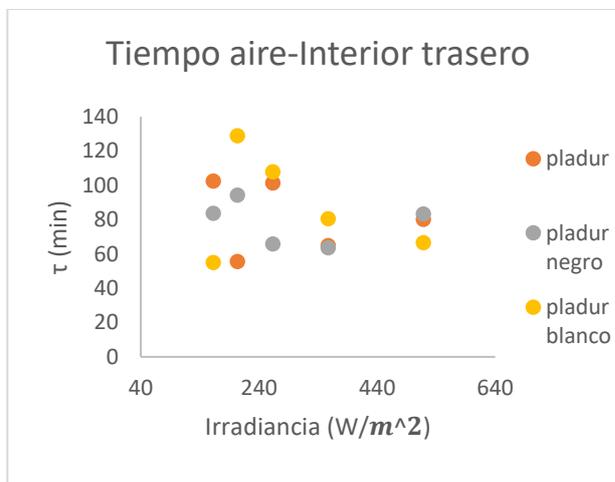
Gráfica 51. Representación del tiempo en la pared exterior.



Gráfica 52. Representación del tiempo en la pared interior.

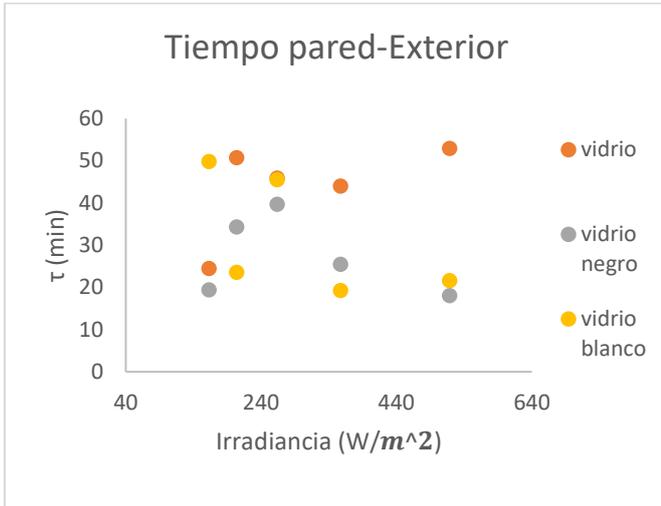


Gráfica 53. Representación del tiempo en el aire interior frontal.

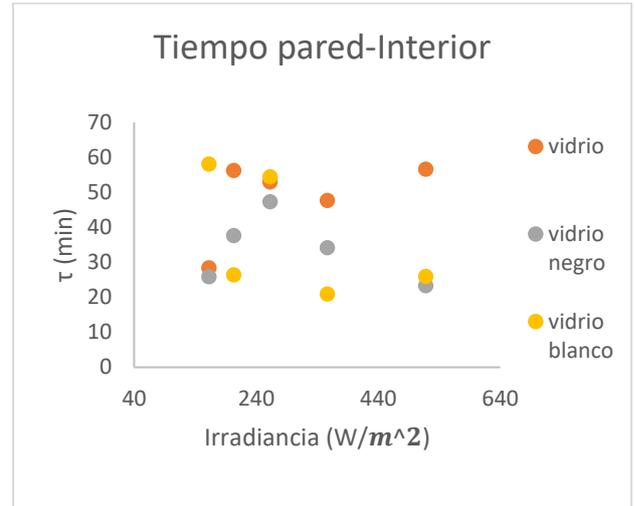


Gráfica 54. Representación del tiempo en el aire interior trasero.

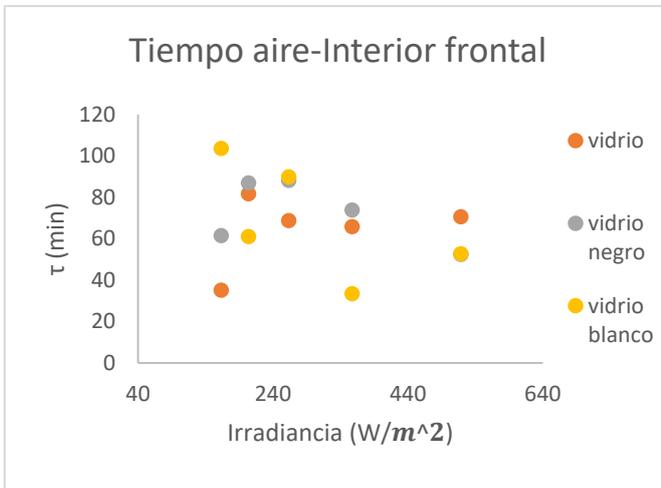
Para la pared del vidrio:



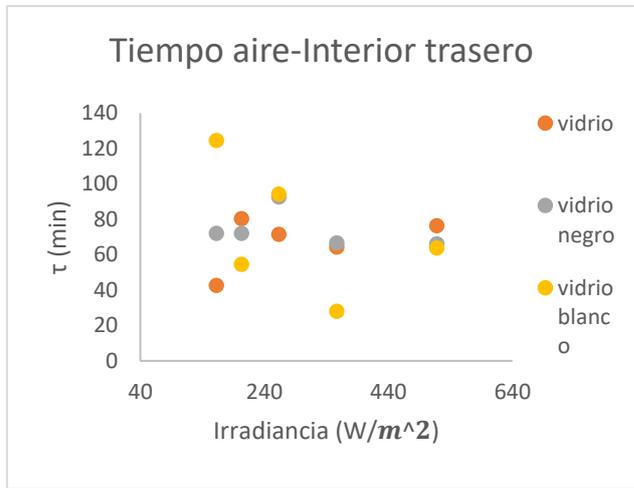
Gráfica 55. Representación del tiempo en la pared exterior.



Gráfica 56. Representación del tiempo en la pared interior.



Gráfica 57. Representación del tiempo en el aire interior frontal.



Gráfica 58. Representación del tiempo en el aire interior trasero.

Se puede observar que no guarda ninguna relación el tiempo con la irradiancia, y por lo tanto con las distancias. Tampoco el tiempo con el color de la pared. Se podría decir que, para una misma pared, indistintamente del color del exterior y de la distancia del foco, el tiempo que tarda en llegar al estacionario podría ser una media de todos los datos obtenidos para esa pared y esas distancias.

En donde sí se puede apreciar diferencia en el tiempo de alcanzar el estacionario, es en la situación del termopar, pared exterior, pared interior, aire interior frontal, aire exterior frontal. El exterior de la pared es lo que, para todos los tipos de paredes, tarda menos tiempo en llegar al estacionario. Conforme se van pasando capas de pared y de aire, es decir, al ir introduciéndose en la casa térmica, más va tardando en llegar al estacionario. En el paso del aire interior frontal al aire interior trasero, hay menos diferencia en el tiempo que tarda, ya que en el aire la variación de temperaturas es menor.

Entre los tipos de paredes también hay comparación, para la pared de pladur y vidrio, que son las de menor espesor, son las que, entre la parte exterior e interior de la pared hay menos diferencia entre el tiempo. Estas dos paredes son también las que presentan menor tiempo en llegar al estacionario en la parte interior de la pared. Sin embargo, para el mortero con ladrillo y la madera, al tener mayor espesor, también hay mayor diferencia entre el tiempo de la pared exterior e interior, siendo el tiempo de la pared interior mucho mayor que para las otras dos paredes. Por lo tanto, se puede concluir que el espesor de la pared tiene una relación directa con el tiempo que tarda en llegar al estacionario el fluido interior.

## 7. Conclusiones

- El efecto de los tres colores empleados en la temperatura final alcanzada es el siguiente: temperatura mayor para el negro porque este color presenta mayor absorción, seguida de la pared sin pintar, y por último la pared blanca tiene la reflexión más alta. Con la excepción de la pared de vidrio.
- La pared de vidrio sin pintar presenta una condición diferente al resto porque es el más transmisor y deja pasar toda la radiación electromagnética. Mientras que al pintarlo vuelve a comportarse como el resto porque minimizamos esa cualidad.
- La regresión lineal que siguen todos los datos es creciente porque conforme aumenta la irradiancia o flujo de calor la variación de temperaturas de todas las paredes, indistintamente del color, va aumentando.
- El tiempo que tarda una pared en llegar al estacionario, no guarda ninguna relación con la irradiancia, y por lo tanto con las distancias, ni con el color de la pared.
- El tipo de material de las paredes influye en la variación de temperatura del interior porque cada una tiene un coeficiente de conductividad térmica o de transmisión del calor distinto.
- El coeficiente de película no presenta mucha variación, ya que estamos en convección libre, aumentando con la irradiancia.
- Respecto de la temperatura del aire exterior irradiado varía con el color de la pared y la distancia del foco.
- Al pintar una pared se modifica su coeficiente global de transmisión del calor porque se le añade una película que cambia sus propiedades (absorción, reflexión), aumentando en negro y disminuyendo en blanco.
- Respecto del rango del coeficiente global de transmisión del calor observamos que el valor el pladur es mayor por ser el menos aislante, seguido de la loseta con mortero por ser un cuerpo compuesto, y por último la madera por ser el más aislante.

## 8. Bibliografía

Para el análisis de los datos y la búsqueda de información de las diferentes técnicas y materiales usados se ha recurrido a diversos libros y páginas de internet como:

1. TRANSMISIÓN DEL CALOR. C, Nicolás Madrid García, José Ramón Navarro Andreu. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela técnica superior de ingeniería industrial. Departamento de Física Aplicada.
2. TRANSFERENCIA DE CALOR. J.P. Holman. Editorial C. E. C. S. A.
3. HISTÓPICA. Portal dedicado al mundo de la óptica.  
Disponible en: <https://histoptica.com/apuntes-de-optica/conceptos-basicos/luz/color-absorcion-y-reflexion/>
4. FOTONOSTRA. Como son percibidos los colores de los objetos.  
Disponible en: <https://www.fotonostra.com/grafico/coloresobjetos.htm>
5. ENERGYNEWS. ¿Qué son y para qué sirven los piranómetros?  
Disponible en: <https://www.energynews.es/que-son-y-para-que-sirven-los-piranometros/>