



GENERALITAT
VALENCIANA

iVACE
INSTITUTO VALENCIANO DE
COMPETITIVIDAD EMPRESARIAL



Cofinanciado por
la Unión Europea

E4.1 Resultados de la evaluación de sistemas comerciales e innovadores para rehabilitación

ROOFTILES II. Estudio de monitorización de soluciones constructivas horizontales cerámicas para su evaluación energética

Castellón, septiembre 2023

Índice

1. Introducción.....	2
2. Evaluación multicriterio de los sistemas	3
3. Simulación energética	5
3.1. Metodología.....	5
3.2. Resultados de simulación	6
4. Monitorización de los sistemas en los prototipos experimentales	9
4.1. Variables registradas	9
4.2. Sistemas implementados en los prototipos	11
5. Evaluación de los sistemas en los prototipos experimentales.....	14
5.1. Sistemas de referencia vs STE (ventilado) vs STE (ventilado)	15
5.2. Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs Suelo Técnico Elevado (STE).....	22
5.3. Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs aplacado (PA)	24
5.4. Sistemas innovadores	30
6. Conclusiones.....	40
6.1. Evaluación multicriterio	40
6.2. Simulación energética	41
6.3. Evaluación experimental	41

1. Introducción

En este informe se resumen los principales resultados obtenidos tras el análisis de los datos monitorizados en los prototipos durante la segunda anualidad y que se corresponden con las tareas Tarea “4.1 Tratamiento datos y validación prototipo”, Tarea “4.2 Resultados y conclusiones demanda refrigeración y calefacción” y Tarea “4.3 Evaluación de los productos o sistemas”.

Con los datos adquiridos tanto en periodos fríos como cálidos en la monitorización de los distintos sistemas ensayados, se ha analizado el comportamiento en términos de confort térmico de las cubiertas cuando se plantea la rehabilitación de edificios con soluciones comerciales existentes o con sistemas innovadores. Se ha realizado para ello la evaluación comparativa con los sistemas tradicionales presentando los resultados en función de la solución constructiva ensayada y las variables analizadas.

En el informe se incluye también los resultados obtenidos en el análisis multicriterio de los dos sistemas constructivos (cubierta invertida con pavimento cerámico sobreelevado y cubierta invertida con pavimento cerámico adherido) propuestos para la rehabilitación de cubiertas planas, con el objetivo de identificar aquellos puntos débiles que se podrían mejorar en cada una de las soluciones evaluadas.

También se ha realizado un estudio de simulación termodinámica paramétrica para la rehabilitación de tres tipologías de edificios residenciales, en tres zonas climáticas distintas, considerado dos escenarios de rehabilitación, uno en el que se rehabilita únicamente la cubierta y otro en el que se rehabilita toda la envolvente con el objetivo de conocer el potencial que puede tener la rehabilitación de la cubierta. Los principales resultados obtenidos se incluyen en este informe.

En el documento se incluyen las principales conclusiones obtenidas en cada uno de los apartados con las propuestas de líneas futuras de actuación. En los anexos del documento se incluyen todos aquellos datos técnicos e información complementaria que apoyan los resultados; Anexo 1. Evaluación de los productos o sistemas, Anexo 2. Simulación energética y Anexo 3. Monitorización del sistema.

2. Evaluación multicriterio de los sistemas

Se ha llevado a cabo un análisis multicriterio de dos sistemas constructivos (cubierta invertida con pavimento cerámico sobreelevado y cubierta invertida con pavimento cerámico adherido) para la rehabilitación de cubiertas planas, considerando aspectos ambientales (aislamiento térmico, recuperación y reciclaje), económicos (coste de inversión inicial y mantenimiento) y prestacionales (facilidad de colocación y peso del sistema).

Para ello se ha caracterizado constructivamente los dos sistemas que se plantean como soluciones de rehabilitación de cubiertas existentes. Se han definido todos sus componentes y se han calculado algunos parámetros característicos como el peso del sistema, su transmitancia térmica o el coste de inversión inicial que supone este tipo de rehabilitación.

Con los criterios de evaluación definidos, organizados en 6 indicadores diferentes, y las soluciones constructivas caracterizadas; se ha valorado cada uno de estos indicadores en una escala de 1 a 5, siendo el valor 1 el más desfavorable, y el 5 el más favorable. La tabla inferior muestra los valores adoptados para cada criterio y en cada tipo de solución constructiva. Se muestran en rojo los valores menos deseables, y en verde los mejores valores.

Tabla 1. Valoración de cada uno de los criterios para las soluciones definidas

Criterios evaluados	Pavimento sobreelevado	Pavimento adherido
A.1. Aislamiento térmico - Ahorro de energía	5,00	5,00
A.2. Recuperación - Reciclaje	5,00	1,00
E.1. Coste inversión inicial	1,00	2,00
E.2. Mantenimiento (durabilidad-coste-periodicidad)	4,00	3,00
P.1. Facilidad ejecución	4,00	3,00
P.2. Peso del sistema	2,00	3,00
Total (promedio)	3,50	2,83

A nivel ambiental, el sistema sobreelevado es una solución claramente preferible al adherido, debido principalmente al criterio de "Recuperación y Reciclaje". No ocurre lo mismo a nivel prestacional ni económico donde ambas soluciones manifiestan un comportamiento similar.

Una vez analizadas las dos propuestas de rehabilitación para cubierta planas, se identifican aquellos puntos débiles que se podrían mejorar en cada una de las soluciones evaluadas para proponer nuevos sistemas innovadores que venga a cubrir aquellos criterios peor valorados. Estos sistemas son: baldosas cerámicas delgadas sobre soporte aislante y sistema de recrecido aligerado.

Para más información al respecto, consultar el documento “E4.1_AnexoI_Evaluación multicriterio” donde se expone este análisis de una manera mucho más detallada.

Por otra parte, el grupo de investigación TECASOS de la UJI ha realizado un “Análisis de la influencia de los sistemas de rehabilitación de cubiertas planas con acabado cerámico en el comportamiento energético de los edificios” que se ha estructurado en tres partes fundamentales:

- Selección del área de estudio, con el fin de poder **caracterizar el parque edificatorio** que pueda ser objeto de rehabilitación en el área, selección el edificio estadísticamente representativo en el área y simulación energética con la solución de cubierta original.
- **Simulación energética** del edificio representativo con las distintas soluciones de rehabilitación con acabado cerámico, definidas previamente en el proyecto ROOFTILES.
- Análisis del **retorno de la inversión**. Extrapolación de los resultados al área de análisis, para poder estimar resultados a nivel urbano.

El informe técnico muestra los resultados de cada una de estas partes en detalle y las principales conclusiones obtenidas, que a continuación se resumen:

- Los programas informáticos oficiales utilizados para realizar las certificaciones energéticas de los edificios no son adecuados para obtener datos a efectos de investigación al ser herramientas que no permiten la definición de soluciones constructivas no convencionales.
- Al rehabilitar la cubierta del edificio, suponiendo ésta alrededor del 20% de la superficie del total de la envolvente térmica, se consiguen ahorros en el consumo global de energía primaria no renovable en torno al 5 o 6%, y para la zona climática seleccionada (B3).
- Con los supuestos de partida, los periodos del retorno de inversión están en torno a los 10-12 años en el mejor de los casos, y en torno a los 15-17 años en el peor de los escenarios.
- Las inversiones necesarias son elevadas, unos 150€/m² de cubierta, por lo que sería interesante analizar las ayudas existentes para la mejora de eficiencia energética de edificios.
- Si se extrapolan los resultados obtenidos para el edificio estadísticamente representativo a la escala barrio, se obtiene un ahorro anual en emisiones de casi 440 Tn de CO₂ y una disminución de consumo de energía de 1.640.132,98 kWh.

Para más información al respecto, consultar el documento “**E4.1_AnexoI_Evaluación de los sistemas**” donde se expone este análisis de una manera mucho más detallada.

3. Simulación energética

3.1. Metodología

Se ha llevado a cabo un estudio de simulación termodinámica paramétrica para la rehabilitación de tres tipologías de edificios residenciales (unifamiliar, plurifamiliar bajo, plurifamiliar alto), en tres zonas climáticas distintas de España (Sevilla-A4, Castellón-B3, Burgos-E1), modificando las siguientes variables: orientación de las fachadas y color de la envolvente.

Además, se han considerado dos escenarios de rehabilitación, uno en el que se rehabilita únicamente la cubierta y otro en el que se rehabilita toda la envolvente (cubierta, fachadas y carpintería exterior).

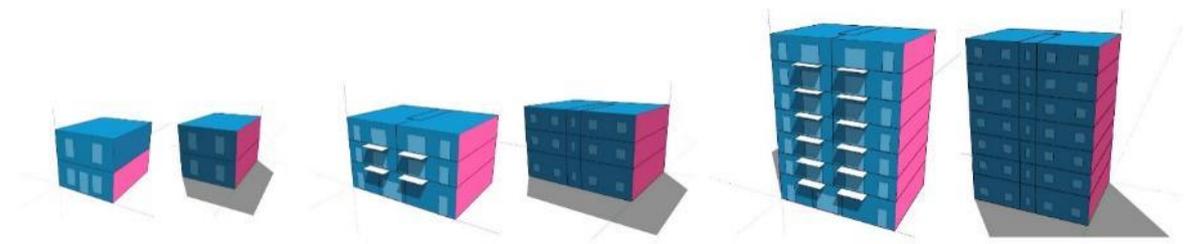


Ilustración 1. Modelos térmicos de simulación de las tipologías edificatorias. Izquierda (Residencial Unifamiliar-RU), centro (Residencial Plurifamiliar Bajo- RPB), derecha (Residencial Plurifamiliar Alto- RPA)

A continuación se muestra un resumen de los escenarios considerados en la primera simulación paramétrica:

“Inputs” para la simulación paramétrica

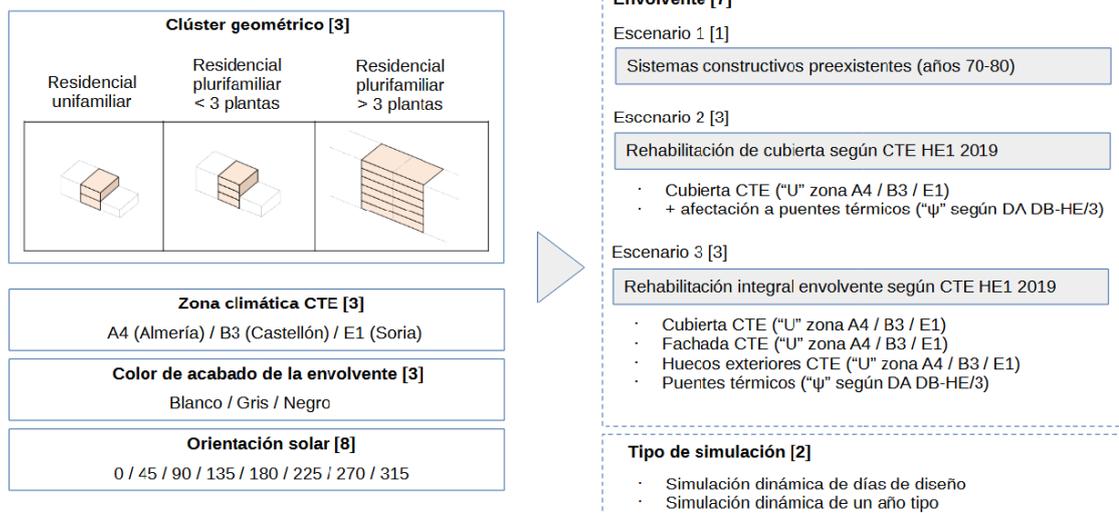


Ilustración 2. Resumen de “inputs” para la simulación paramétrica

A continuación se muestra un resumen de los distintos parámetros considerados en las primeras simulaciones:

Hipótesis de cálculo			(1) Década 1980			(2) Cubierta CTE2019			(3) Envolvente CTE2019			
Envolvente tipo para zona climática			A4	B3	E1	A4	B3	E1	A4	B3	E1	
Características térmicas de los cerramientos opacos												
Muros en contacto con el aire exterior	UM1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	0,50	0,39	0,23
Suelos en contacto con el aire exterior	US1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19	3,19
Cubiertas en contacto con el aire exterior	UC1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,92	1,92	1,92	0,44	0,33	0,19	0,44	0,33	0,19
Muros en contacto con el terreno	UTM1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
Muros en contacto con espacios no habitables	UTM2	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
Suelos en contacto con el terreno	UTS1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
Suelos en contacto con espacios no habitables	UTS2	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Cubiertas en contacto con el terreno	UTC1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Cubiertas en contacto con espacios no habitables	UTC2	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12	2,12
Medianeras o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica	UMD1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Particiones interiores horizontales entre mismo uso	PHMU1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
Particiones interiores verticales entre mismo uso	PVMU1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Particiones interiores horizontales entre distinto uso	PHDI1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
Particiones interiores verticales entre distinto uso	PVDU1	Transmitancia térmica [1]	[W/m²K]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Características térmicas de los huecos y puertas exteriores												
Marco de huecos exteriores	UH,m	Transmitancia térmica	[W/m²K]	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20
	q100	Permeabilidad al aire	[m³/hm²100Pa]	50	50	50	50	50	50	9	9	9
Vidrio de huecos exteriores	Ugl	Transmitancia térmica [2]	[W/m²K]	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	3,30	2,54	1,66	1,04
	ggl,swi	Factor solar [2]	[%]	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,60	0,60
Transmitancia térmica lineal vidrio-marco	ψv	Transmitancia térmica lineal [3]	[W/mK]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,08	0,08
Porcentaje de marco respecto área total de hueco	AH,m		[%]	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Conjunto marco-vidrio de huecos exteriores	UH	Transmitancia térmica global del hueco [1]	[W/m²K]	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	3,08	2,70	2,00	1,50
	Ugl	Factor solar conjunto marco-vidrio	[%]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,48	0,48
	ps-B	Índice de reflexión [4]	[%]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Protecciones solares móviles de huecos exteriores	S.pr	Ubicación del sistema de protección solar	[int/Ext]	Ext	Ext	Ext	Ext	Ext	Ext	Ext	Ext	Ext
	Isol	Consigna de irradiación solar de activación [5]	[W/m²]	>300	>300	>300	>300	>300	>300	>300	>300	>300
	ggl,shwi	Transmitancia total de energía solar	[%]	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,32	0,30	0,28
Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50%	UP	Transmitancia térmica	[W/m²K]	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
Características térmicas de los puentes térmicos constructivos												
Fachada con frente de forjado interior	ψi,db1	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,17	0,13	0,08
Fachada con cubierta	ψi,db2	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,00	0,00	0,00	1,01	1,04	1,05	0,32	0,28	0,24
Esquina (saliente y entrante) de fachada	ψi,db3	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fachada con forjado exterior	ψi,db4	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,79	0,78	0,75
Pilares integrados en fachada	ψi,db5	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00
Fachada con suelo en contacto con el terreno	ψi,db6	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Jamba de huecos exteriores	ψi,db7	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,05	0,05	0,04
Dintel de huecos exteriores	ψi,db8	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11	0,10	0,08
Antepecho de huecos exteriores	ψi,db9	Transmitancia térmica lineal [6]	[W/mK]	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
Geometría y color de acabado exterior de la envolvente												
Porcentaje de huecos respecto al área bruta total de muros exteriores	WW1	Clúster unifamiliar	[%]	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%
	WW2	Clúster plurifamiliar < 3 plantas	[%]	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%	23%
	WW3	Clúster plurifamiliar > 3 plantas	[%]	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%	27%
	color	Absortividad solar y visible (claro)	[%]	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
		Absortividad solar y visible (medio)	[%]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
		Absortividad solar y visible (oscuro)	[%]	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
Retranqueo de fachada en huecos exteriores	Ret	Retranqueo de fachada a vidrio	[m]	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Ventilación e infiltraciones												
	Iwin4	Por área de ventanas [7]	[m³/hm²100Pa]	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	9,0	9,0	9,0
Infiltraciones	Iwin4	Por área de muros exteriores [7]	[m³/hm²100Pa]	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	16,0	16,0	16,0
	Iwin4	Por área de suelos exteriores [7]	[m³/hm²100Pa]	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0	29,0
	Iwin4	Por área de cubiertas exteriores [7]	[m³/hm²100Pa]	29,0	29,0	29,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
	VMq	Caudal de aire exterior [8]	[m³/h]	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Ventilación mecánica	VM,a	Rendimiento recuperación de calor sensible	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VM,i	Rendimiento recuperación de calor latente	[%]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	VM,fc	Free-cooling mecánico	[S/Ino]	No	No	No	No	No	No	No	No	No
Ventilación natural [nocturna durante periodo de verano]	VN,q	Caudal de aire exterior [9]	[m³/h]	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Ilustración 3. Resumen de datos contemplados en la primera simulación

Posteriormente, se llevó a cabo una segunda simulación en la que se consideraron las siguientes variables:

- Zonas climáticas CTE escenario IPCC 2050 (A4, B3 y E1)
- Rehabilitación de cubierta con cubierta aplacada y con cubierta ventilada

3.2. Resultados de simulación

Los resultados obtenidos en las simulaciones se han estructurado de la siguiente forma:

- Relación entre demanda de refrigeración y calefacción anual (filtrado por: tipología de envolvente, por zona climática, por color de acabado de la envolvente, por orientación del edificio, etc)
- Relación entre la carga de refrigeración y ganancias por cubiertas (filtrado por: tipología de envolvente, por zona climática, por color de acabado de la envolvente, por orientación del edificio, etc)
- Relación entre la carga de calefacción y pérdidas cubiertas (filtrado por: tipología de envolvente, por zona climática, por color de acabado de la envolvente, por orientación del edificio, etc)

- Variabilidad de resultados de demanda energética (filtrado por: zona climática, tipología de envolvente, etc)
- Variabilidad de resultados de cargas térmicas (filtrado por: zona climática, tipología de envolvente, etc)
- Variabilidad de resultados de ganancias y pérdidas por cubierta (filtrado por: zona climática, tipología de envolvente, etc)

3.2.1. Ejemplo de resultados obtenidos para un escenario

Debido a la extensión del estudio, a continuación se presentan los resultados del siguiente escenario: Rehabilitación de la cubierta, fachada principal con orientación **sur** y color de la envolvente del edificio sin rehabilitar con una **absortancia de 0,5** (color medio). En la Tabla 2 se recogen los valores de transmitancia térmica considerados para la simulación:

Características térmicas de los cerramientos opacos	Edificio sin rehabilitar 1980 (W/m ² K)			Edificio Rehabilitación cubierta (W/m ² K)		
	A4	B3	E1	A4	B3	E1
Cubiertas en contacto con aire exterior	1,79			0,44	0,33	0,19
Muros en contacto con aire exterior	1,33					

Tabla 2. Valores de transmitancia del edificio original y del rehabilitado (según Anejo E del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE del CTE).

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para este caso. Se muestran, por una parte, los valores de demanda energética de los edificios sin rehabilitar (kWh/m²) en las diferentes zonas climáticas y por otra, los porcentajes de variación de la demanda energética (%) que se pueden alcanzar en cada caso mediante la rehabilitación de la cubierta. Se ha considerado que la rehabilitación de la cubierta en zonas climáticas cálidas se realiza con piezas claras y en zonas climáticas frías con piezas oscuras.

Zona climática	Tipología Edificatoria	Demanda energética Edificio sin rehabilitar (kWh/m ²)			Color cubierta rehabilitada (Absortancia)	Variación Demanda energética Cubierta rehabilitada (%)		
		Calefacción	Refrigeración	Total		Calefacción	Refrigeración	Total
A4	RU	15,1	35,8	51	Claro (0,3)	-15%	-32%	-27%
	RPB	9,6	29,4	39		-54%	-26%	-33%
	RPA	3,4	25,8	29,3		-37%	-16%	-19%
B3	RU	28,1	22,4	50,5	Claro (0,3)	-16%	-37%	-26%
	RPB	19,6	18,2	37,8		-49%	-30%	-40%
	RPA	8	16,2	24,2		-30%	-19%	-22%
E1	RU	149,1	2,1	151,2	Oscuro	-29%	+16%	-28%

RPB	119,8	1,6	121,4	(0,7)	-42%	+21%	-41%
RPA	73,1	1,7	74,8		-25%	+28%	-24%

Tabla 3. Variación demandas energéticas en rehabilitación, en función de la zona climática, la tipología edificatoria y el color de la envolvente

Al comparar los resultados obtenidos para este escenario, en las distintas zonas climáticas para las diferentes tipologías edificatorias, se puede observar el **potencial de ahorro energético** que supondría la rehabilitación de la cubierta del edificio, que permite alcanzar **reducciones de la demanda global** que varían entre el **19% y el 41%**.

Si nos centramos en las **demandas de calefacción**, se alcanzan reducciones en todos los casos, con valores comprendidos entre el **16% y el 54%**, mientras que, en el caso de las **demandas de refrigeración**, se observan mejoras que pueden alcanzar el **37%** en zonas **climáticas cálidas (A4, B3)**.

Cabe destacar que, en **zonas climáticas frías (E1)**, se observan incrementos de demanda de refrigeración próximos al 30%. Estos incrementos pueden deberse principalmente a la influencia del color de la envolvente y al efecto del aislamiento que reduce las pérdidas de calor del interior al exterior durante la noche. Como se observa en los resultados de demanda global, la influencia de este incremento es mínima, ya que los valores de refrigeración son muy bajos respecto a los de calefacción.

Para más información sobre los resultados de la simulación energética, consultar el documento **"E4.1_AnexoII_Simulación Energética"** donde se expone este análisis de una manera mucho más detallada.

4. Monitorización de los sistemas en los prototipos experimentales

Tal y como se ha comentado en el Entregable “E2.1”, para llevar a cabo la monitorización de los sistemas instalados en los prototipos, se ha implementado un sistema de adquisición de datos que permite recoger los valores generados por los sensores instalados en cada uno de los prototipos.

Para la visualización y análisis de los datos obtenidos en los prototipos, se ha implementado una plataforma (Thingsboard) que permite realizar un seguimiento del comportamiento de los sistemas en tiempo real a través del desarrollo de *dashboards* personalizados.



Ilustración 4. Plataforma visualización de datos durante periodo de monitorización (Dashboard)

4.1. Variables registradas

Las principales variables de temperatura recopiladas para cada uno de los prototipos han sido:

- Baldosín (**Tp**)
- Pieza cerámica superior (**Tps**)
- Muro interior (**Tmi**),
- Muro superior (**Tms**),
- Aire interior del prototipo (**Ti**),
- aire en la cámara del suelo técnico elevado (**Tac**).

Además, también se han instalado sensores de flujo de calor en el interior de los muros de cada prototipo. Por otra parte, se han recopilado las variables relacionadas con las condiciones ambientales: Temperatura ambiente (**Tamb**), **radiación solar**, velocidad y dirección de viento. A continuación, se muestra una sección con los sensores principales instalados en los diferentes sistemas y un gráfico de un día tipo con las variables registradas:

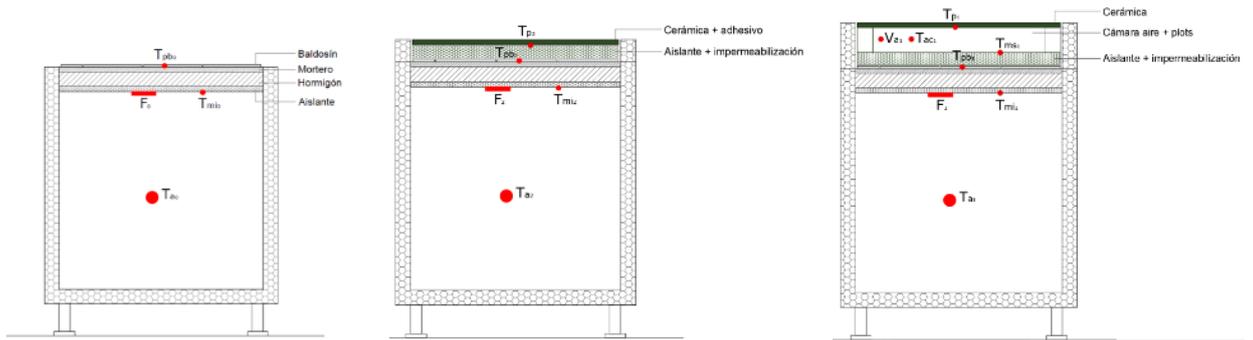


Ilustración 5. Sistema de referencia sin rehabilitar (izq.) Sistema de rehabilitación mediante aplacado (ctro.) y mediante pavimento sobreelevado (dcha.). Secciones transversales con detalles de los sensores.

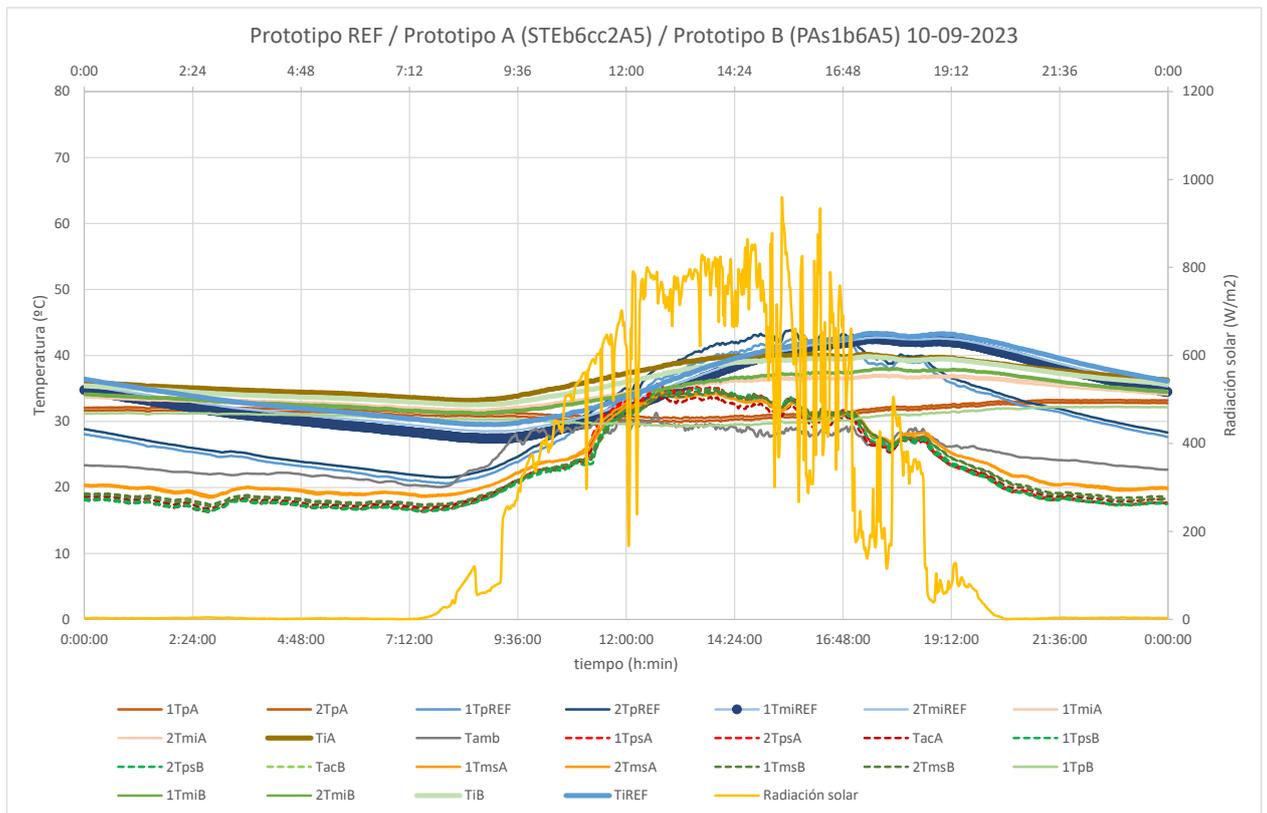


Ilustración 6. Gráfico recopilación datos prototipos

4.2. Sistemas implementados en los prototipos

Los sistemas implementados en los prototipos se han monitorizado durante diferentes periodos (fríos, templados o cálidos) y se han ido combinando diferentes variables (color, espesor de piezas, espesor de aislamiento, ventilación, etc) de los sistemas constructivos considerados (aplacados, suelo técnico elevado). A modo de resumen, se muestran varias tablas con los periodos de monitorización realizados, agrupados en función del sistema constructivo.

Sistema de Referencia vs Sistema aplacado (PA) vs Sistema aplacado (PA)

Monitorización	Prototipo A (REHABILITADO)						Prototipo B (REHABILITADO)										
	Sistema	Pieza	Espesor pieza (mm)	Canal	Altura canal	Espesor Aislamiento (mm)	Sistema	Pieza	Espesor pieza (mm)	Canal	Altura canal	Espesor Aislamiento (mm)					
Aplacado vs aplcado vs cubierta de Referencia	Sistema aplcado (1)	Negro	6	-	-	50	Sistema aplcado (3)	Negro	6	-	-	30					
		Blanca						blanca									
		Blanca						blanca									
	Sistema aplcado (0)	Negra	8				-	-	-			Sistema aplcado (0)	blanco Reflectivo	8	-	-	-
		Blanco											blanco Reflectivo				
	Sistema aplcado (3)		6						30			Sistema aplcado (1)	blanco	6			50

Tabla 4. Variables contempladas en monitorización sistema aplacado vs sistema aplacado

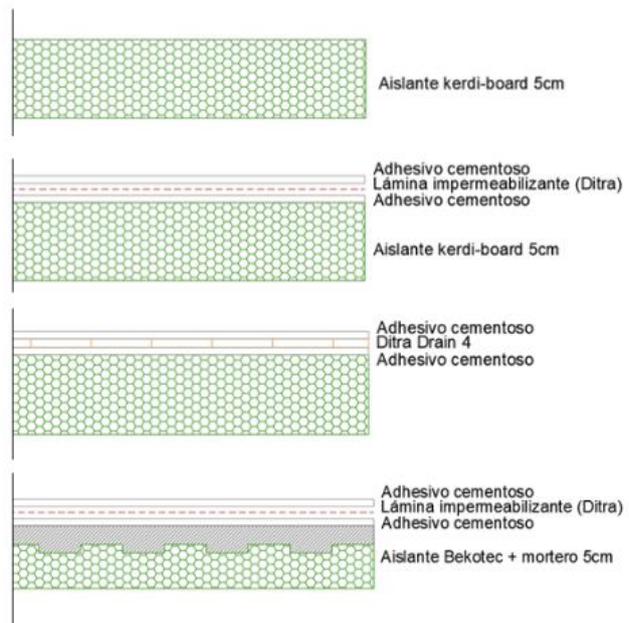
Los sistemas aplacados considerados se describen a continuación:

Sistema 0 (Referencia: **PA**). Formado por:
Aislante XPS de 5cm + Pieza cerámica

Sistema 1 (Referencia: **PAs1**). Formado por:
Aislante XPS de 5cm + lámina impermeabilización+ adhesivo cementoso + Pieza cerámica

Sistema 2 (Referencia: **PAs2**). Formado por:
Aislante XPS de 5cm + lámina impermeabilización y drenaje con cámara + adhesivo cementoso.

Sistema 3 (Referencia: **PAs3**). Formado por:
Aislante XPS con pivotes relleno de mortero, lámina impermeabilización + adhesivo cementoso.



A continuación se muestra una imagen con los sistemas instalados:



Ilustración 7. Sistemas instalados en los prototipos

Comparación: Sistema referencia vs Sistema aplacado (PA) vs suelo técnico elevado (STE)

Monitorización	Prototipo A (REHABILITADO)						Prototipo B (REHABILITADO)					
	Sistema	Pieza	Espesor pieza (mm)	Canal	Altura canal (mm)	Espesor Aislamiento (mm)	Sistema	Pieza	Espesor pieza	Canal	Altura canal (mm)	Espesor Aislamiento
Suelo técnico elevado vs aplacado vs cubierta de Referencia	Sistema aplacado (1)	Negro	6	-	-	50	Suelo técnico elevado	Negro	6	Cerrado	20	50
	Sistema aplacado (0)	blanco std	8	-	-			Blanco Reflectivo	8			-
	Suelo técnico elevado	blanco	6	Cerrado	20		Sistema aplacado (1)	blanco	6	-	-	50

Tabla 5. Variables contempladas en monitorización sistema aplacado vs sistema suelo técnico elevado

A continuación se muestra una imagen con los sistemas instalados:



Ilustración 8. Sistemas instalados en los prototipos

Comparación: Sistema de Referencia vs Sistema suelo técnico elevado (STE) vs STE

Monitorización	Prototipo A (REHABILITADO)						Prototipo B (REHABILITADO)									
	Sistema	Pieza	Espesor pieza (mm)	Canal	Altura canal (mm)	Espesor Aislamiento (mm)	Sistema	Pieza	Espesor Pieza (mm)	Canal	Altura canal (mm)	Espesor Aislamiento (mm)				
Suelo técnico elevado vs cubierta de Referencia	Suelo técnico elevado	Negro	12	Abierto	20	-	Suelo técnico elevado	Negro	12	Abierto	20	-				
				Semi-abierto						semi-abierto		-				
				Cerrado						Cerrado		-				
												-				
												-				
												-				
		Negro	6	Cerrado				-	Blanco	6	6	Cerrado	20	50		
								50						50		
								-								80
					Semi-abierto	semi-abierto		-								
								-								-
								-								-
		Blanco	Cerrado			-		Blanco	6	6	Cerrado	20	50			
		Negro				50										
				80									80			
		Gris +núcleo aislante	6+20 PET	Cerrado				50	Blanco +núcleo aislante	6+20 PET	6+20 PET	Cerrado	20	50		
Blanco	6	Cerrado			50										-	
					-							-				

Tabla 6. Variables contempladas en monitorización de sistemas de STE vs STE

A continuación se muestra una imagen con los sistemas instalados:



Ilustración 9. Sistemas instalados en los prototipos

Para más información sobre la monitorización de los sistemas, se puede consultar el documento "E4.1_Anexo III_Monitorización" donde se recogen en detalle los datos recogidos en los prototipos.

5. Evaluación de los sistemas en los prototipos experimentales

Los distintos sistemas se han monitorizado a lo largo de todo un año con el objetivo de poder estudiar su comportamiento térmico en diferentes condiciones ambientales: Periodos fríos referenciados como (F), periodos templados referenciados como (T) y periodos cálidos referenciados como (C).

Se ha evaluado cada día monitorizado eligiéndose para el análisis de los datos los días soleados, en los cuales se ha analizado como se ralentiza la transferencia de calor desde la superficie del prototipo hacia su interior en función del sistema aplicado en cada uno de los prototipos. Para ello se han obtenido las diferencias de temperaturas en superficie exterior, muro e interior respecto al sistema de referencia no rehabilitado.

Durante los periodos más cálidos se han instalado unos sistemas de refrigeración en el interior de los prototipos para mantener constante su temperatura y determinar así el flujo de temperatura hacia el exterior.

Se han analizado todas las variables contempladas en el estudio de forma semanal para cada sistema mediante el desarrollo de balances. En la Tabla 7 se muestra el análisis realizado a modo de ejemplo en uno de los sistemas a lo largo de una semana. Se muestran los valores promedio de algunas variables, así como valores máximos y mínimos junto con las diferencias de temperatura promedio respecto al sistema de referencia obtenidos durante el día.

Los resultados obtenidos en la evaluación se han dividido en cuatro grandes bloques:

- Sistemas de referencia vs suelo técnico elevado STE (ventilado) vs STE (ventilado).
- Sistemas de referencia vs suelo técnico elevado STE (ventilado) vs PA (suelo aplacado).
- Sistemas de referencia vs suelo aplacado PA vs PA (suelo aplacado).
- Sistemas innovadores.

Sistema 3.1T	Config.	Periodo Dia (salida a puesta de sol)							Diferencias DIA	
		Tamb Med (°C)	Radiación solar máx (W/m2)	Tps Med (°C)	T _{ps} Max (°C)	Tps Min (°C)	Tmi Med (°C)	Tai Med (°C)	T ps - TpREF	T mi - TmREF
07/04/2023	Baldosín	17.7	828.1	21.7	31.0	5.9	18.8	18.4	-	-
07/04/2023	PAs1n6A5	17.7	828.1	33.8	53.4	2.0	15.8	17.3	12.1	-3.0
07/04/2023	PAs3n6A3m	17.7	828.1	34.1	51.8	2.6	16.3	17.5	12.4	-2.5
08/04/2023	Baldosín	17.8	839.4	21.2	28.9	7.8	18.7	18.2	-	-
08/04/2023	PAs1n6A5	17.8	839.4	31.0	48.9	4.1	16.1	17.6	9.8	-2.7

08/04/2023	PAs3n6A3m	17.8	839.4	30.2	45.0	4.7	16.6	17.7	9.0	-2.1
09/04/2023	Baldosín	18.0	1089.7	23.1	32.2	12.4	20.7	20.2	-	-
09/04/2023	PAs1n6A5	18.0	1089.7	33.3	58.7	11.5	16.6	18.4	10.2	-4.1
09/04/2023	PAs3n6A3m	18.0	1089.7	33.4	55.4	11.5	17.3	18.8	10.3	-3.4
10/04/2023	Baldosín	18.5	882.4	23.9	32.0	11.5	21.0	20.4	-	-
10/04/2023	PAs1n6A5	18.5	882.4	35.2	56.2	11.2	17.1	18.9	11.4	-3.9
10/04/2023	PAs3n6A3m	18.5	882.4	34.9	53.3	10.7	17.9	19.3	11.0	-3.1
11/04/2023	Baldosín	19.2	844.0	25.6	34.2	13.1	22.6	21.9	-	-
11/04/2023	PAs1n6A5	19.2	844.0	36.3	56.4	12.6	17.9	19.8	10.8	-4.6
11/04/2023	PAs3n6A3m	19.2	844.0	36.9	54.9	12.3	18.8	20.3	11.4	-3.7
12/04/2023	Baldosín	20.5	851.4	24.6	34.8	9.5	21.4	20.9	-	-
12/04/2023	PAs1n6A5	20.5	851.4	36.0	56.5	7.0	18.2	19.9	11.4	-3.2
12/04/2023	PAs3n6A3m	20.5	851.4	35.2	53.5	7.3	18.8	20.1	10.6	-2.6

Tabla 7. Ejemplo de datos evaluados recogidos durante una semana para cada uno de los sistemas

5.1. Sistemas de referencia vs STE (ventilado) vs STE (ventilado)

En primer lugar, para validar el comportamiento de los prototipos A y B, se rehabilitaron con la misma solución técnica constructiva, (STEn12ca2A0). Con los resultados obtenidos durante el periodo de monitorización, pudo comprobarse que ambos prototipos presentaron un comportamiento térmico idéntico, pudiendo así validar la correcta monitorización de los prototipos.

Tras esta primera comprobación, se evaluó térmicamente el comportamiento de rehabilitar con un sistema de suelo técnico elevado (**STE**) con pieza cerámica de 6 mm de espesor de color negra (n6) o blanca (b6), con la cámara cerrada (cc) y con varios espesores de aislamiento, respecto al sistema sin rehabilitar de referencia (REF: Baldosín).

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos en función de la variable analizada.

5.1.1. Efecto del aislante

Para analizar el efecto del aislante se han comparado los valores promedios de días **soleados** para los sistemas del grupo (**1.5** y **1.7**) en clima templado (T) y Cálido (C), considerando tres variables de aislamiento: sin aislante (A0), con 50mm (A5) y con 80mm de aislamiento (A8), tal y como se recoge en la Tabla 8.

De entre todas las variables analizadas experimentalmente, se han seleccionado los valores durante el periodo diurno de: temperatura ambiente y radiación solar, temperatura de pieza superior "**Tpieza**" (promedio y máximo), temperatura de aire de la cámara ventilada "**Tcanal**" y temperatura de muro

interior “**Tmuro**”. Además, se incluye la diferencia de la temperatura del muro en los prototipos rehabilitados respecto al sistema sin rehabilitar (REF: Baldosín).

Se observa que, tanto en climas templados como en cálidos cuando se **rehabilita con el sistema STE** (con o sin aislante), aunque la temperatura en la superficie de las piezas cerámicas negras es mayor que la del baldosín, las **temperaturas en el muro interior son menores** respecto a la registrada en el prototipo de referencia **debido a la reducción de las ganancias por radiación solar** producidos por el efecto de la cámara ventilada y el aislante. En **climas templados** se observan diferencias de temperatura en el muro del orden de 1°C cuando se pasa de un sistema sin aislante respecto a un sistema con 50mm de aislamiento (1.5), pero **apenas se aprecian diferencias cuando se pasa de 50mm a 80mm de aislamiento (1.7)**.

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m ²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	Tpieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
1.5 Templado	REF	Baldosín	421	21.8	23.1	30.6	-	21.2	-
	A	STEn6cc2A0			33.3	49.2	24.9	20	-1.3
	B	STEn6cc2A5			35.4	54.0	32.5	19.1	-2.2
1.7 Templado	REF	Baldosín	442	18.6	21.8	29.9	-	19.7	-
	A	STEn6cc2A5			32.6	53.6	29.3	17.0	-2.7
	B	STEn6cc2A8			33.5	54.6	30.4	17.2	-2.5
1.5 Cálido	REF	Baldosín	501	25.3	31.2	41.4	-	28.4	-
	A	STEn6cc2A0			38.6	59.2	31.9	25.6	-2.7
	B	STEn6cc2A5			40.8	66.6	39.0	23.0	-5.4

Tabla 8. Comparativa de temperaturas diurnas en STE con diferente espesor de aislante

En **clima cálido (1.5C)** las **reducciones de temperatura en el muro interior** del sistema STE con 50mm de aislamiento respecto al de referencia son importantes, alcanzando valores **superiores a 5°C**. En este caso, los valores de diferencia negativos indican que la temperatura en el muro de los sistemas rehabilitados se encuentra por debajo de las del prototipo sin rehabilitar (REF) debido a la reducción de la ganancia de calor que proporciona el sistema STE con aislante. **Estas reducciones de ganancias térmicas diurnas favorecen la reducción de la demanda en refrigeración** en clima cálido.

En la siguiente figura se muestra la evolución de temperaturas registradas junto con la radiación solar. Las temperaturas más altas se corresponden con las temperaturas superficiales de las piezas negras y las temperaturas en el canal del suelo técnico elevado.

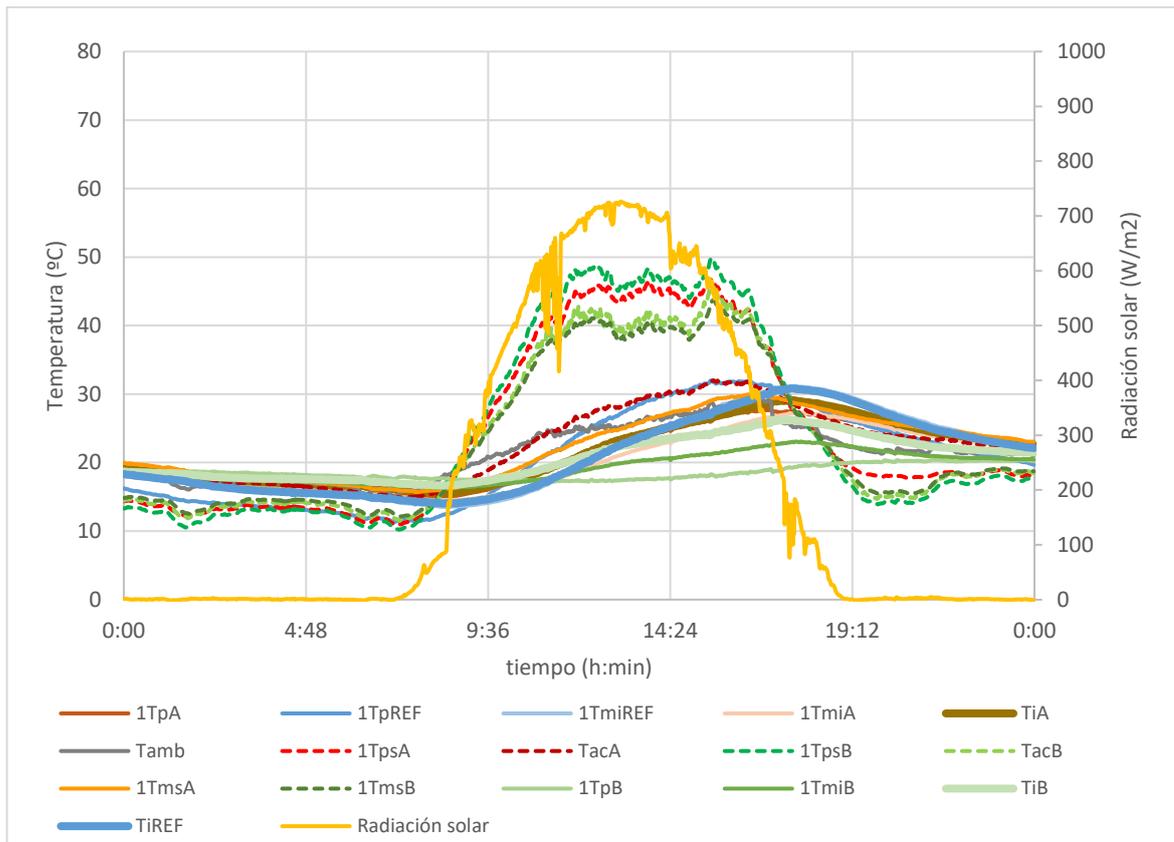


Figura 1. Sistema 1.5.: Prototipo REF / Prototipo A (STEn6cc2A0) / Prototipo B (STEn6cc2A5) 10-03-2023

Para poder analizar el **efecto** que produce tanto el **aislante** como la **cámara cerrada** del suelo técnico elevado se ha representado para el mismo día que en la figura anterior las temperaturas obtenidas en la superficie del muro interior de los prototipos, Figura 2. Se ha marcado sobre este gráfico en azul las diferencias máximas de temperatura registradas durante todo el día en el muro del prototipo de referencia que no está aislado, observándose una oscilación de 16°C. Cuando se rehabilita con suelo técnico elevado pero sin aislante (**1TmiA**), esta oscilación se reduce a 13°C. Cuando se rehabilita con aislante conjuntamente con el suelo técnico elevado (**1TmiB**), la atenuación es mayor, obteniéndose una oscilación a lo largo del día de unos 7 °C, señalado en color verde.

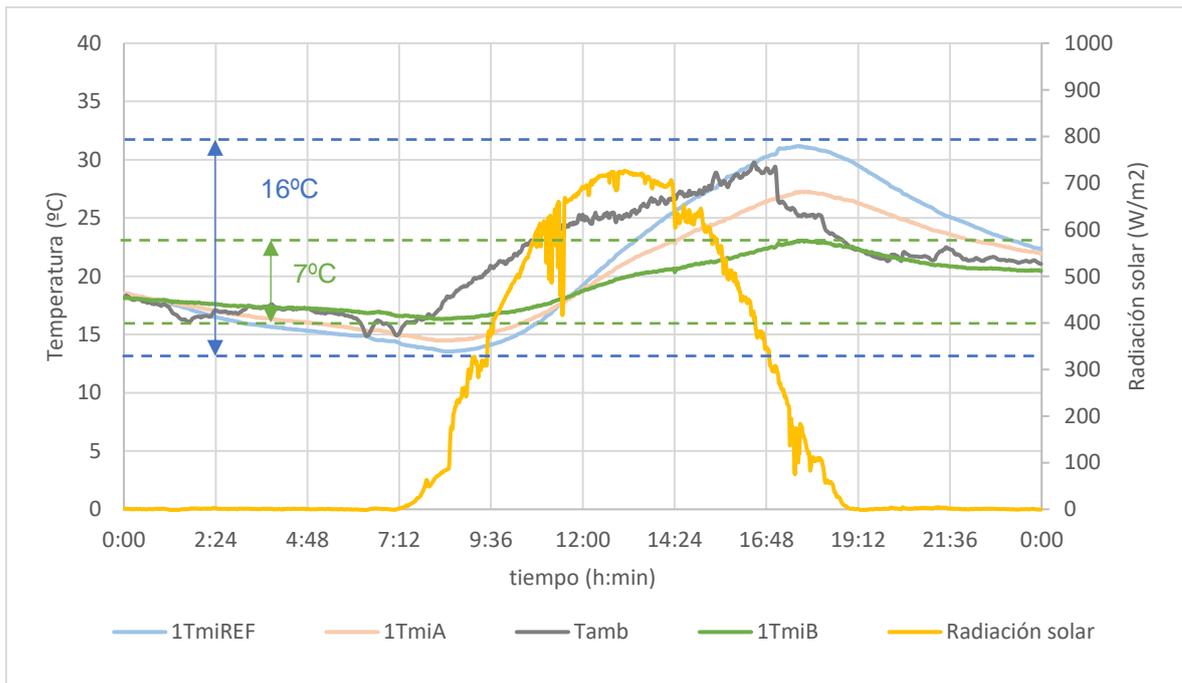


Figura 2. Prototipo REF / Prototipo A A0 +STE / Prototipo B A5 +STE 10-03-2023 Pieza Negra

5.1.2. Efecto del color de la pieza

Como puede observarse en la Tabla 9, en **clima templado** (1.6T) la pieza de color negro absorbe más radiación y alcanza una temperatura mayor que la de referencia (12°C de promedio y 24°C en pico máximo), pero el efecto de la cámara del STE y del aislante reduce considerablemente la transmisión de calor, siendo finalmente la temperatura del muro inferior a la del muro sin rehabilitar (REF). La **diferencia de temperatura** en el muro entre los dos sistemas rehabilitados **con piezas de diferente color es de 1°C**, alcanzándose mayor temperatura en el muro cuando se rehabilita con pieza oscura.

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	Tpieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
1.6 Templado	REF	(Baldosín)	446	19.3	21.8	30.1	-	19.6	-
	A	STEn6cc2A5			33.9	53.9	30.7	16.7	-2.8
	B	STEb6cc2A5			16.4	23.7	16.6	15.7	-3.9
1.6 Cálido	REF	(Baldosín)	473	28.2	35.9	45.7		33.7	-
	A	STEn6cc2A5			45.1	66.6	42.9	28.9	-4.8
	B	STEb6cc2A5			28.6	37.0	29.3	28.0	-5.7

Tabla 9. Comparativa de temperaturas promedio diurnas en STE con pieza negra y blanca

En el **clima cálido** (1.6C) se observa la misma tendencia, es en el prototipo rehabilitado con STE con pieza blanca donde se consigue mayor amortiguación y se alcanza menores temperaturas en pieza, canal y muro interior. Como se observa en el gráfico, Figura 3, aunque las diferencias de temperatura entre las piezas negra y blanca son muy significativas, las diferencias en la temperatura de muro en el sistema STE apenas presentan diferencias debido al **efecto del aislamiento**. Si se comparan las diferencias de temperatura entre el muro de referencia y el rehabilitado al final del día, Figura 4, se observa como en el prototipo sin rehabilitar **la temperatura del muro (1TmiREF) está casi 12°C por encima de la del muro con sistemas rehabilitados (1TmiA y 1TmiB)**.

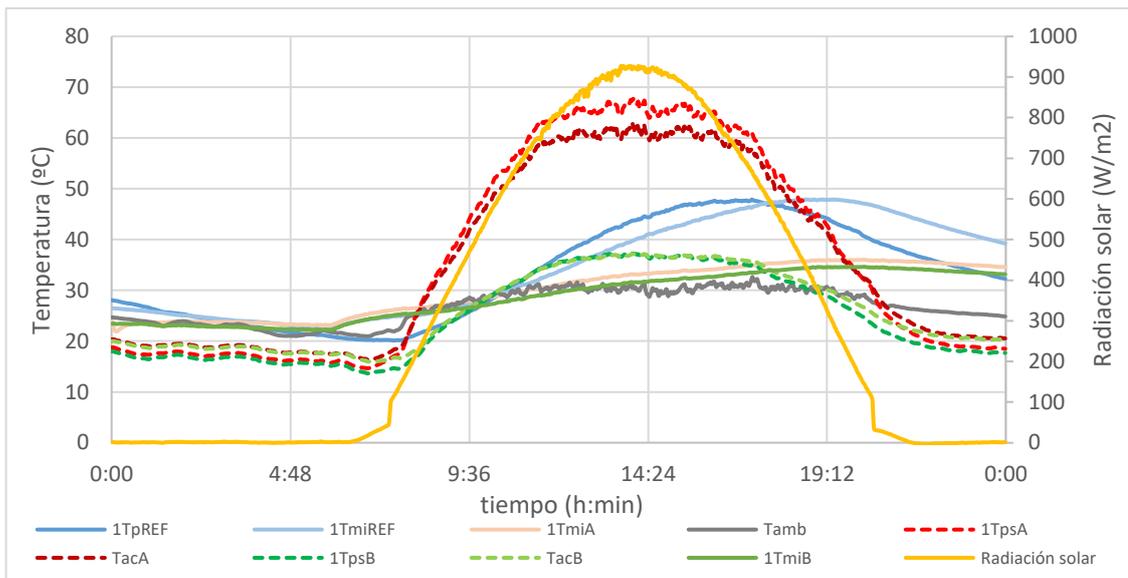


Figura 3. SISTEMA 1.6C: Prototipo REF / Prototipo A (STEn6cc2A5) / Prototipo B (STEb6cc2A5) 24-06-2023

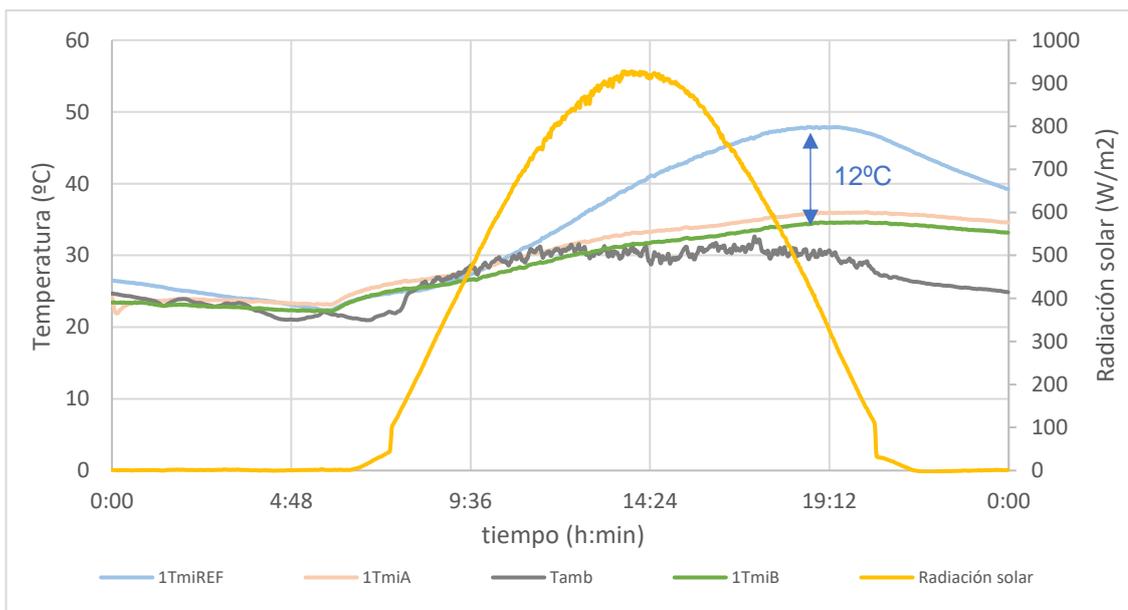


Figura 4. SISTEMA 1.6C: Prototipo REF / Prototipo A (STEn6cc2A5) / Prototipo B (STEb6cc2A5) 24-06-2023

5.1.3. Efecto de la apertura del canal

Se ha comparado el efecto que tiene la abertura del canal cuando se instala un STE, y se ha podido comprobar que las temperaturas que se alcanzan en el **canal cerrado** están 1.5 °C por encima de la Temperatura ambiente, ver Tabla 10. Cuando el canal está abierto la temperatura se reduce, y pasan a estar por debajo de la T ambiente 0.8 °C. Si analizamos la temperatura de la pieza negra en el canal cerrado durante el día, esta se sitúa unos 9°C por encima que la de referencia, mientras que en el canal abierto está más fría, 1°C por debajo. Aunque la temperatura de la pieza en la superficie sí que se reduce, tener el canal abierto o cerrado no afecta a la temperatura del muro, pues las diferencias en muro e interior entre canal cerrado y abierto no son significativas. Se ha observado que la cámara del suelo técnico elevado sí que ralentiza la transferencia de calor pues se consigue que la temperatura promedio en muro esté siempre 1°C por debajo que el sistema de referencia, a pesar de no tener aislante.

Tabla 10. Tabla resumen comparación apertura de canal en sistema con STE

Grupo	Prototipo	DIA							
		Radiación	Tamb.	TPieza	Tpieza max.	Tcanal	T muro	Taire interior	Dif. muro Trehab-Tref
1.1F	REF (Baldosín)	Soleado	15.7	13.5	20.5	-	12.2	12.6	-
	STEn12ca2A0			12.8	20.2	14.5	10.9	13.0	-1.3
	STEn12ca2A0			12.3	19.9	14.5	10.9	12.8	-1.4
1.3F	REF (Baldosín)	Soleado	13.1	12.7	19.5	-	11.7	11.9	-
	STEn12cc2A0			21.7	36.9	14.5	10.7	12.3	-1.0
	STEn12cc2A0			22.7	38.1	14.9	10.8	12.3	-0.9

5.1.4. Análisis del efecto del aislante en la rehabilitación con prototipos climatizados

Para poder analizar el efecto del aislante en la rehabilitación de los prototipos como barrera no sólo ante la transferencia de calor recibida por el sistema por la radiación sino como barrera ante las pérdidas de energía, se han dotado a los sistemas de un equipo de refrigeración con el objetivo de mantener constante la temperatura en el interior de los prototipos y situarla en torno a los 20 °C.

Este sistema se ha aplicado en los dos prototipos rehabilitados y en el prototipo de referencia durante el periodo cálido. En la Figura 5, se ha representado la temperatura interior (TiA, TiB y TiREF) de los tres prototipos junto con las otras temperaturas. Se observa como en ambos prototipos la temperatura interior se mantiene estable alrededor de los 20°C presentando ligeras oscilaciones debido al control interno del equipo utilizado como sistema de refrigeración. Esta oscilación también afecta a la temperatura del muro.

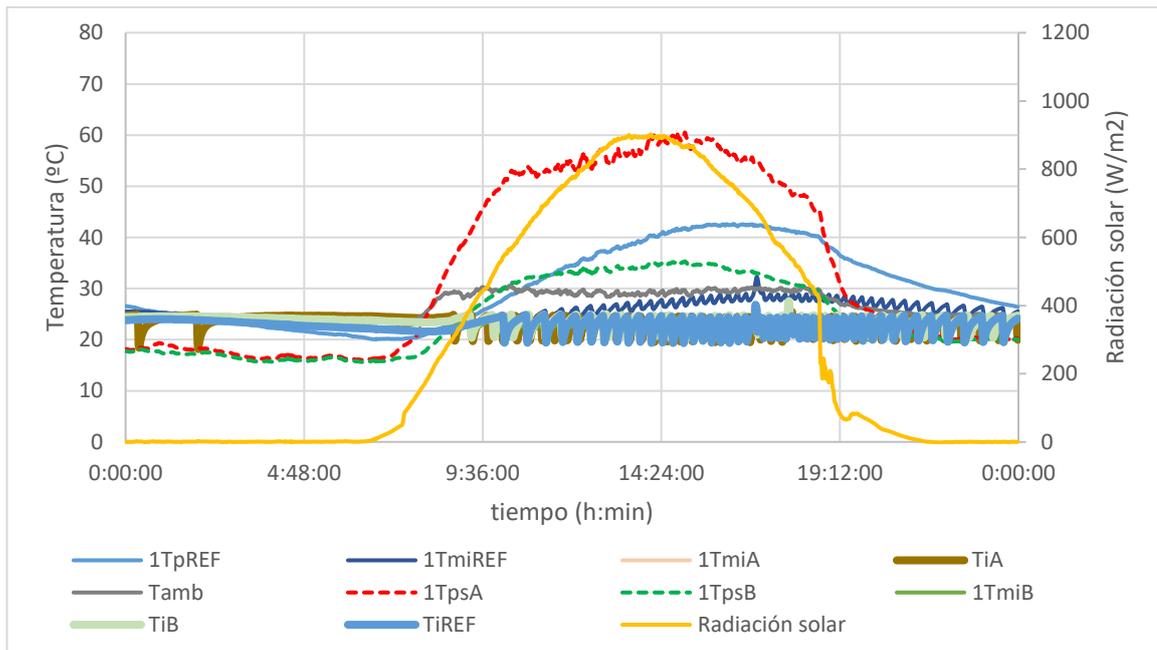


Figura 5. Temperaturas registradas Prototipo REF / Prototipo A (STEb6cc2A8) / Prototipo B (STEb6cc2A8) 27-06-2023

Para poder analizar el efecto del aislante sobre la transferencia de calor en la cubierta durante el periodo de radiación solar, se han representado conjuntamente los flujos medidos sobre la parte inferior de la cubierta, instalados en la cara interior del muro. Estos flujos registrados durante un día con el sistema de climatización activo aparecen representados gráficamente en la Figura 7. Los prototipos presentan valores de flujo cercanos al cero, con elevada fluctuación debido a las oscilaciones en la temperatura interior ocasionada por el sistema de climatización, pero sin embargo en el prototipo de referencia donde no se tiene aislante, el flujo adquiere valores elevados debido a la ganancia de calor a través de la cubierta llegando a su punto máximo sobre las cinco de la tarde, cuando la temperatura del baldosín junto con la del muro de referencia presentan su máximo.

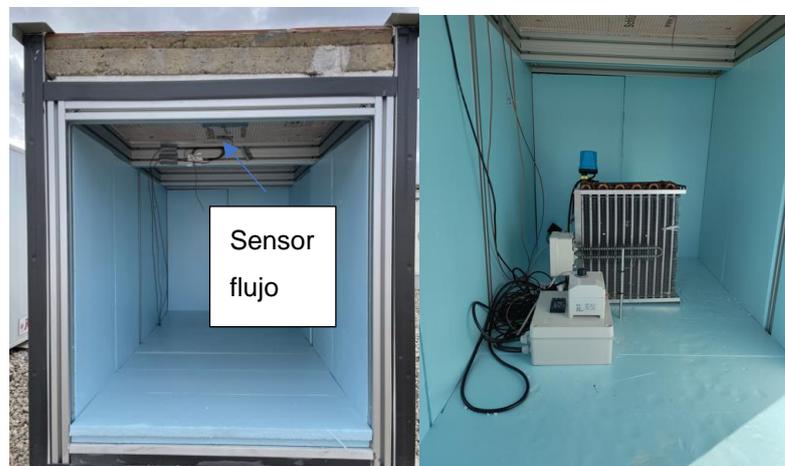


Figura 6. Sensores de flujo en prototipos izda. Sistema de climatización en los prototipos. Derecha.

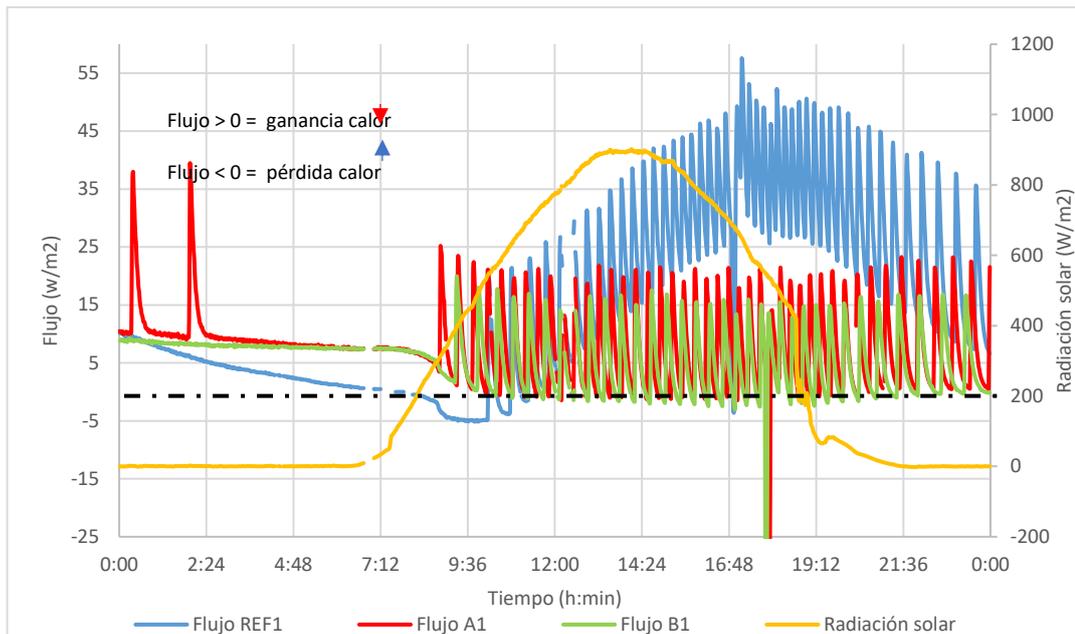


Figura 7. Comparativa flujos prototipos. Prototipo REF / Prototipo A (STEb6cc2A8) / Prototipo B (STEb6cc2A8)
27-06-2023

5.2. Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs Suelo Técnico Elevado (STE)

Disponer de tres prototipos ha permitido comparar en las mismas condiciones climáticas externas el efecto de los distintos sistemas cerámico para la rehabilitación de cubiertas: suelo aplacado (PA) frente a suelo técnico elevado (STE). Se ha evaluado el comportamiento del sistema para rehabilitación de suelo técnico elevado (STE) junto con el sistema de pavimento aplacado (PA) ambos con pieza cerámica de 6 mm de espesor de color negra (n6) o blanca (b6), y con 5 cm de aislamiento (A5). Los sistemas estudiados han sido 2.1T, 4.3.C y 2.2.C

Si se compara el sistema PA con el STE en **periodo templado** con **pieza negra** (2.1T) se observa como el sistema STE presenta una temperatura promedio en el muro casi un grado mayor que cuando se rehabilita el pavimento aplacado, Figura 12, debido a que **la temperatura del aire en la cámara** (T_{ac}) es mucho **mayor que la temperatura ambiente** (T_{amb}), Tabla 11.

En **periodo cálido** (2.2C) se han comparado los sistemas con **pieza blanca** y se aprecia como en los tres prototipos las temperaturas alcanzadas en el muro interior superan los 30°C debido al calor acumulado en estos periodos con elevadas temperaturas nocturnas. Si comparamos los sistemas rehabilitados, se observa cómo **las diferencias de temperatura en el muro interior son similares**, aunque ligeramente inferiores en el sistema STE, Tabla 11.

Grupo	Prototipo	Sistema	DÍA						
			Radiación media (W/m ²)	Tambiente media (°C)	TPieza media (°C)	Tpieza máx. (°C)	Tcanal media (°C)	T muro media (°C)	Dif. muro Trehab-Tref (°C)
2.1T	REF	Baldosín	497	17.3	21.1	30.3	-	18.2	-
	A	PAs1n6A5			34.3	53.1	-	15.7	-2.6
	B	STEn6cc2A5			35.3	53.9	32.3	16.5	-1.7
2.2C	REF	Baldosín	424	27.4	34.0	42.4	-	35.8	-
	B	PAs1b6A5			26.9	34.5	-	35.3	-0.5
	A	STEb6cc2A5			27.2	35.3	26.8	34.8	-1.0

Tabla 11. Comparativa temperaturas promedio diurnas entre sistemas: STE y AP con pieza negra y blanca.

En los casos estudiados se ha observado que **el sistema STE con pieza negra en clima templado y con pieza blanca en clima cálido tiene un mejor comportamiento térmico** que un sistema aplacado (PA). En las siguientes figuras se muestra la evolución de la temperatura y la comparativa de la temperatura de muro entre sistema suelo aplacado y suelo técnico elevado, con pieza negra Figura 8 y con pieza blanca Figura 9. Cuando estamos en clima templado, la temperatura en el muro (serie en color verde) es algo más alta con el STE que con el suelo aplacado, Figura 8 . Cuando el **clima es cálido**, la Temperatura en muro en el STE (serie en color verde Figura 9) es algo menor que en el sistema aplacado, lo cual favorece pues se consigue mantener algo más fría la temperatura interior. Las **diferencias en temperatura máxima de muro interior en verano** cuando se rehabilita con STE con pieza blanca respecto al sistema de referencia **alcanzan los 6°C**.

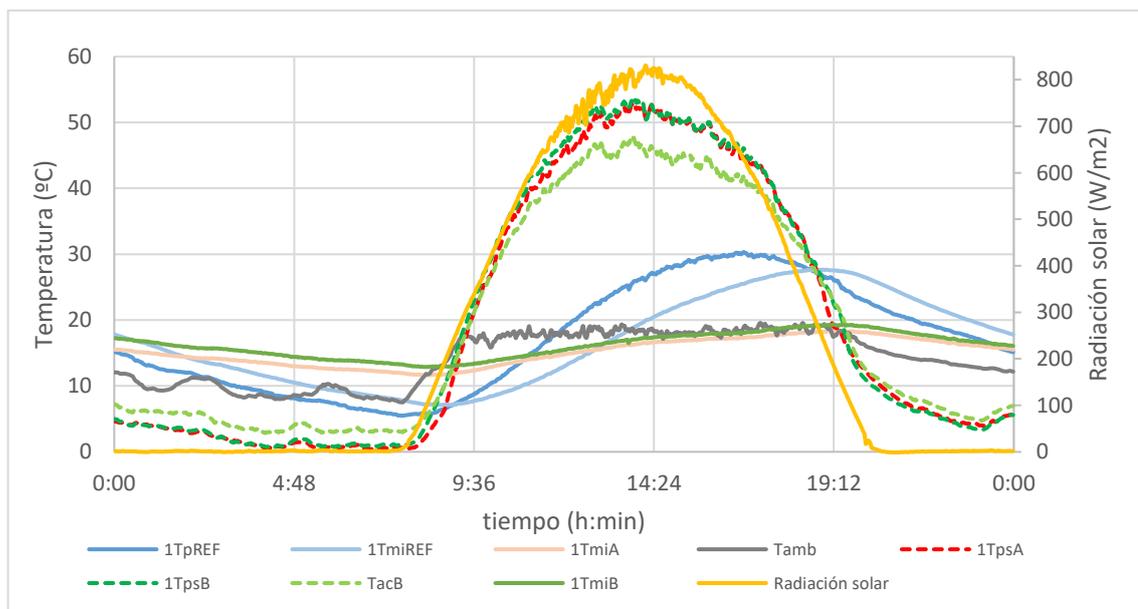


Figura 8. Comparativa AP y STE con **pieza negra clima templado**. SISTEMA 2.1T NEGRA: Prototipo REF / Prototipo A (PAs1n6A5) / Prototipo B (STEn6cc2A5) 04-04-202

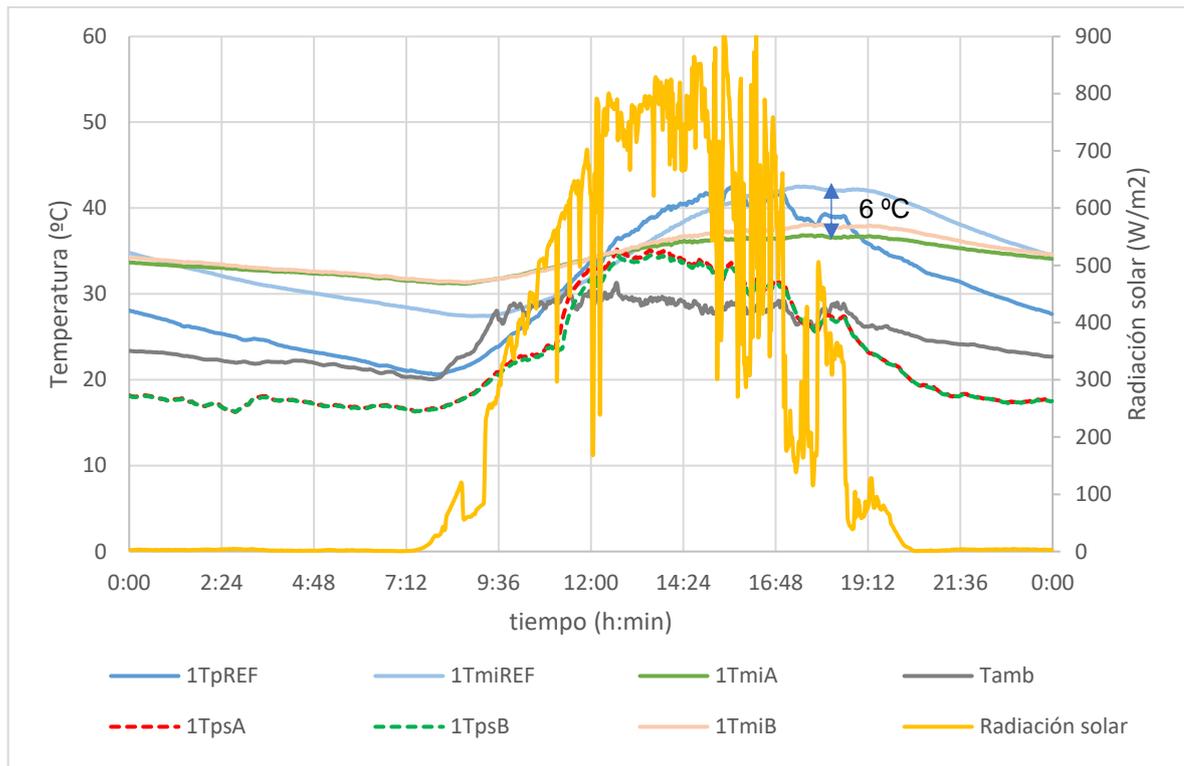


Figura 9. Comparativa AP y STE con **pieza blanca clima cálido**. Prototipo REF / Prototipo A (STEb6cc2A5) / Prototipo B (PAs1b6A5) 10-09-2023

5.3. Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs aplacado (PA)

Para el estudio de pavimento aplacado se han utilizado cuatro tipos de sistemas:

- **Sistema 0 (Referencia: PA)**
Formado por: Aislante XPS de 5cm + Pieza cerámica
- **Sistema 1 (Referencia: PAs1)**
Formado por: Aislante XPS de 5cm + lámina impermeabilización+ adhesivo cementoso + Pieza cerámica
- **Sistema 2 (Referencia: PAs2)**
Formado por: Aislante XPS de 5cm + lámina impermeabilización y drenaje con cámara + adhesivo cementoso.
- **Sistema 3 (Referencia: PAs3)**
Formado por: Aislante XPS con pivotes relleno de mortero, lámina impermeabilización + adhesivo cementoso.

Se han analizado los cuatro sistemas en clima templado, 3.1T, 3.2T, 3.3T y 3.4T, repitiendo el sistema 3.2 en clima cálido. En la Tabla 12, se resumen las diferencias en temperatura promedio obtenidas en pieza, muro y aire interior en los prototipos rehabilitados respecto al prototipo de referencia.

Sistemas aplicados			DIA (valores negativos TREF mayor)				
REf.	Descripción	Sistema	Tprom.exterior	Tpieza- TpREF	Tmi -TmREF	Tai- TaiREF	Dif T muro sistemas
3.1T	PAs1n6A5	Sistema 1	19	10.9	-3.3	-1.1	
3.1T	PAs3n6A3m	Sistema 3		10.9	-2.6	-0.8	-0.7
3.4 T	PAs1n6A5	Sistema 1	20.6	9.1	-4.2	-1.5	
3.4 T	PAs2n6A5	Sistema 2		9.9	-3.7	-1.2	-0.4
3.2 T	PAs1b6A5	Sistema 1	21.5	-7.1	-5.2	-2.4	
3.2 T	PAs3b6A3m	Sistema 3		-7.3	-5.1	-2.6	-0.1
3.3 T	PAs1b6A5	Sistema 1	19.8	-6.5	-5.0	-2.2	
3.3 T	PAs2b6A5	Sistema 2		-6.6	-4.7	-2.0	-0.3
3.2C	PAs3b6A3m	Sistema 3	26.2	-4.5	-2.3	0.8	
3.2C	PAs1b6A5	Sistema 1		-4.1	-0.5	1.2	-1.8

Tabla 12. Comparativa sistemas estudiados con pavimento aplacado.

5.3.1. Efecto del aislante y espesor del aislamiento

Si analizamos las diferencias de temperatura, cuando se rehabilitan los prototipos con los sistemas de pavimento aplacado S1, S2 y S3, las temperaturas en el muro son inferiores a las de temperatura de referencia pues **el aislante actúa como barrera a la transferencia de calor**, Tabla 12. Si comparamos entre sistemas, las diferencias son algo mayores cuando se comparan los sistemas S1 y S3, pues el sistema S3 tiene menos espesor de aislante y una capa más conductora formada por el mortero. En **clima templado con pieza negra (3.1T)**, el sistema **S3** alcanza una temperatura en muro algo más alta, con diferencias respecto al **S1** de 0,7°C. Cuando se compara el sistema S1 con el sistema S2 que solo incluye una microventilación, las diferencias entre sistemas como se observa en la tabla son mínimas.

En la siguiente tabla se muestra a modo de ejemplo algunas de las variables monitorizadas durante el periodo **Templado** en el que se instaló el **sistema 3.1T**, en el que se compara con el sistema de referencia, el sistema aplacado S1 (espesor aislamiento 5 cm) con pieza negra vs sistema aplacado S3 (espesor aislamiento 3 cm) con pieza negra. Se muestran las diferencias de temperatura promedio de ambos sistemas durante las horas con radiación con el de referencia (últimas tres columnas) en pieza, muro e interior. Por el día las **temperaturas alcanzadas en la superficie (Tps)** en los sistemas rehabilitados son iguales y unos **10°C superiores que el sistema de REF**, por ser piezas negras con elevada absorción de radiación. Sin embargo, **la temperatura en muro e interior es inferior respecto a la de referencia** (valores negativos) por el aislante, reduciendo la ganancia

de calor en momentos de exposición a radiación solar. Este efecto reduce la temperatura alcanzada en el interior de la cámara, **siendo desfavorable cuando el clima es templado** pues se requerirá durante el día un aumento en la demanda de calefacción. Entre los dos sistemas utilizados en la rehabilitación, el sistema que presenta mayores diferencias es el sistema S1 con mayor espesor de aislante por actuar este como una barrera al paso de flujo de calor.

Tabla 13. Sistema 3.1T, aplacado con pieza negra, sistema 1 y sistema 3 Vs REF

Sistema 3.1T	Config.	Periodo Dia (salida a puesta de sol)							Diferencias DIA	
		Tamb Med (°C)	Radiación solar máx (W/m2)	Tps Med (°C)	Tps Max (°C)	Tps Min (°C)	Tmi Med (°C)	Tai Med (°C)	T pieza - TpREF	T mi - TmREF
Fecha	Referencia									
07/04/2023	Baldosín	17.7	828.1	21.7	31.0	5.9	18.8	18.4	-	-
07/04/2023	PAs1n6A5	17.7	828.1	33.8	53.4	2.0	15.8	17.3	12.1	-3.0
07/04/2023	PAs3n6A3m	17.7	828.1	34.1	51.8	2.6	16.3	17.5	12.4	-2.5
08/04/2023	Baldosín	17.8	839.4	21.2	28.9	7.8	18.7	18.2	-	-
08/04/2023	PAs1n6A5	17.8	839.4	31.0	48.9	4.1	16.1	17.6	9.8	-2.7
08/04/2023	PAs3n6A3m	17.8	839.4	30.2	45.0	4.7	16.6	17.7	9.0	-2.1
09/04/2023	Baldosín	18.0	1089.7	23.1	32.2	12.4	20.7	20.2	-	-
09/04/2023	PAs1n6A5	18.0	1089.7	33.3	58.7	11.5	16.6	18.4	10.2	-4.1
09/04/2023	PAs3n6A3m	18.0	1089.7	33.4	55.4	11.5	17.3	18.8	10.3	-3.4
10/04/2023	Baldosín	18.5	882.4	23.9	32.0	11.5	21.0	20.4	-	-
10/04/2023	PAs1n6A5	18.5	882.4	35.2	56.2	11.2	17.1	18.9	11.4	-3.9
10/04/2023	PAs3n6A3m	18.5	882.4	34.9	53.3	10.7	17.9	19.3	11.0	-3.1
11/04/2023	Baldosín	19.2	844.0	25.6	34.2	13.1	22.6	21.9	-	-
11/04/2023	PAs1n6A5	19.2	844.0	36.3	56.4	12.6	17.9	19.8	10.8	-4.6
11/04/2023	PAs3n6A3m	19.2	844.0	36.9	54.9	12.3	18.8	20.3	11.4	-3.7
12/04/2023	Baldosín	20.5	851.4	24.6	34.8	9.5	21.4	20.9	-	-
12/04/2023	PAs1n6A5	20.5	851.4	36.0	56.5	7.0	18.2	19.9	11.4	-3.2
12/04/2023	PAs3n6A3m	20.5	851.4	35.2	53.5	7.3	18.8	20.1	10.6	-2.6
13/04/2023	Baldosín	18.0	861.3	23.9	32.6	10.5	21.1	20.5	-	-
13/04/2023	PAs1n6A5	18.0	861.3	35.2	54.9	6.6	18.1	19.5	11.3	-3.0
13/04/2023	PAs3n6A3m	18.0	861.3	35.7	52.7	7.6	18.8	19.9	11.9	-2.3
14/04/2023	Baldosín	20.1	1069.6	23.0	34.3	9.1	20.5	20.3	-	-
14/04/2023	PAs1n6A5	20.1	1069.6	33.4	59.6	4.7	17.6	19.3	10.4	-2.9
14/04/2023	PAs3n6A3m	20.1	1069.6	33.4	58.8	5.9	18.3	19.7	10.4	-2.2
15/04/2023	Baldosín	22.1	808.6	22.9	30.2	11.6	21.3	21.3	-	-
15/04/2023	PAs1n6A5	22.1	808.6	33.4	52.1	5.7	18.9	20.7	10.4	-2.4
15/04/2023	PAs3n6A3m	22.1	808.6	32.8	49.6	7.6	19.6	21.1	9.8	-1.7
16/04/2023	Baldosín	19.4	882.4	24.9	33.1	11.0	22.3	21.8	-	-
16/04/2023	PAs1n6A5	19.4	882.4	35.8	56.6	9.2	19.2	20.6	10.9	-3.2
16/04/2023	PAs3n6A3m	19.4	882.4	36.1	52.0	9.7	19.9	21.1	11.2	-2.4

5.3.2. Efecto del color de la pieza en sistemas aplacados

PIEZA NEGRA 3.1T y 3.4T

Con el **sistema S3** y **pieza negra** aplicada, Figura 10, la atenuación de la ganancia de calor en clima templado por el día es menor, debido a la capa de mortero mucho más conductora que aporta el sistema. Con el **sistema S3** la reducción máxima respecto al sistema de referencia es de **8°C**, mientras que con el sistema **S1** se obtiene una reducción máxima de **10°C**, ver Figura 11.

Cuando se utiliza el sistema S2, con mismo espesor aislante pero con la lámina **ditra-drain**, las diferencias entre sistemas son menores, pero parece que con el sistema S2 la atenuación de la ganancia es menor.

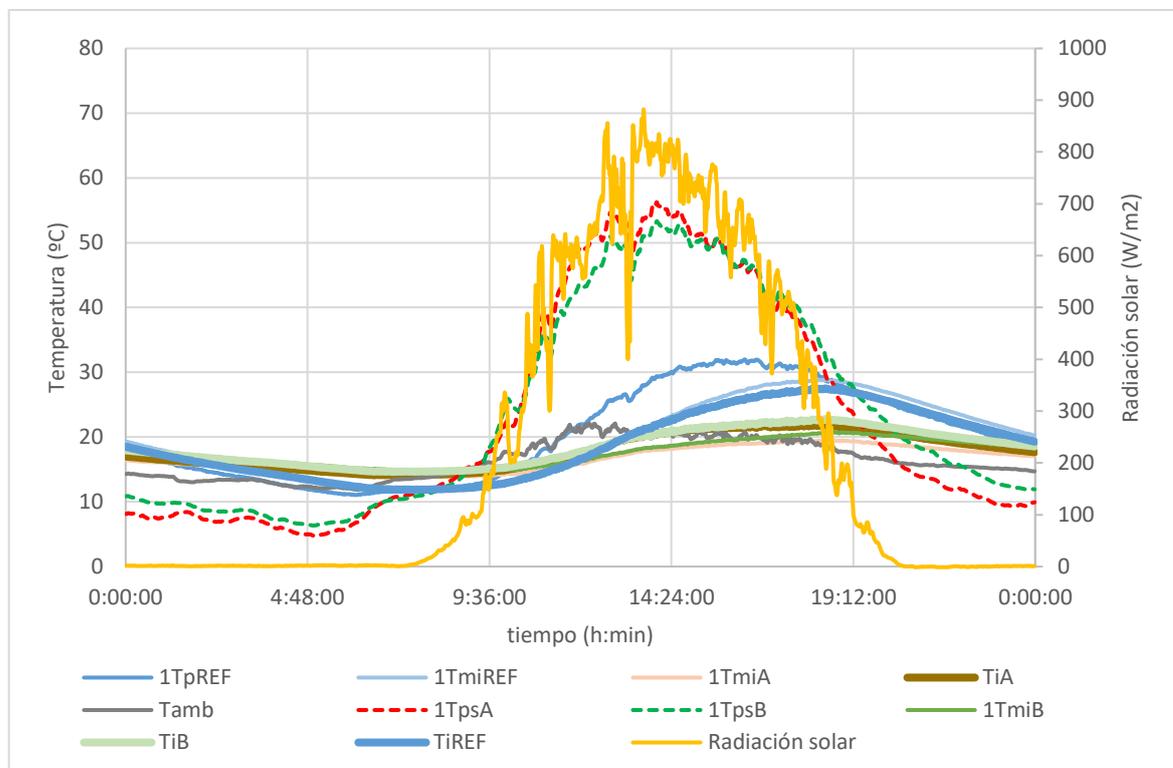


Figura 10. SISTEMA 1 vs SISTEMA 3 NEGRA. Prototipo REF / Prototipo A (PAs1n6A5) / Prototipo B (PAs3n6A3m) 10-04-2023

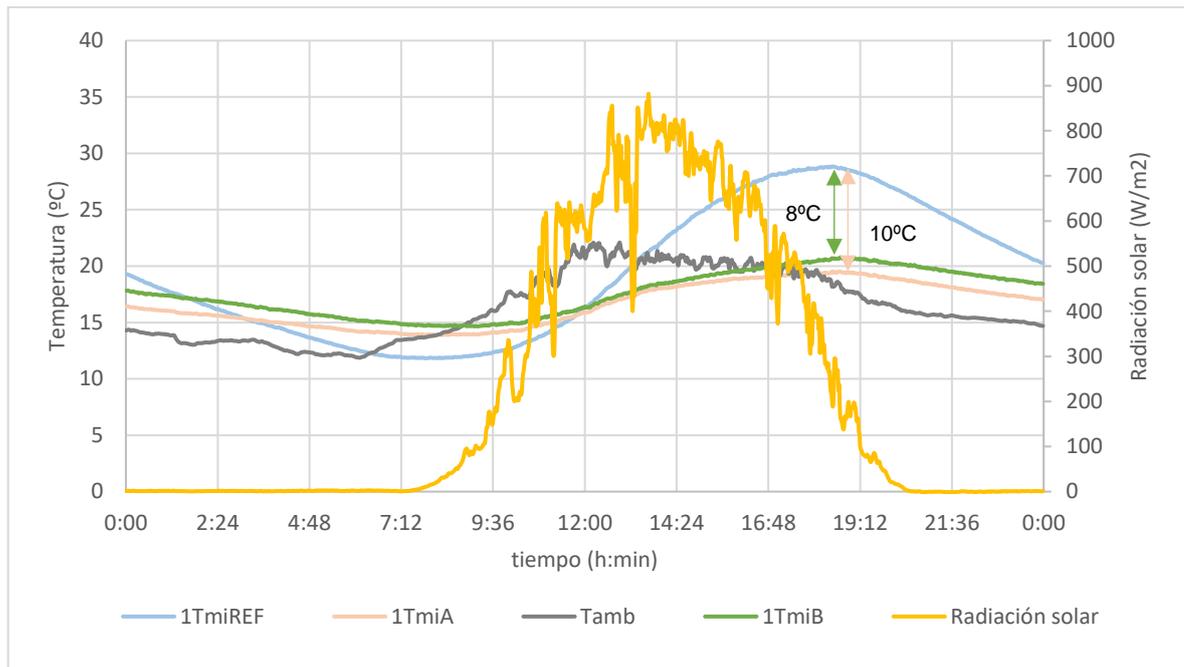


Figura 11. Diferencias en Temperatura muro interior Pieza NEGRA A: SISTEMA 1 y B: SISTEMA 3 respecto REF. 10-04-2023.

PIEZA BLANCA 3.2T y 3.3T

Con **pieza blanca** y **clima templado** las diferencias sistema S1 y sistema S3 y con sistema S1 y sistema S2 apenas son significativas, ver gráficos Figura 13 y Figura 14. Pero las diferencias máximas que presentan respecto el sistema de referencia sí que son relevantes. Estas diferencias máximas, pueden alcanzar hasta los 12°C.

Con **pieza blanca** y **clima cálido** la temperatura alcanzada por las piezas es menor y los prototipos rehabilitados con S1 y S3 presentan una temperatura en muro menor que el de referencia, siendo el sistema S3 el que presenta mayor diferencia, ver Tabla 12. En **clima cálido y pieza blanca**, **cuanto menor es el espesor de aislante mejor se comporta el sistema térmicamente.**

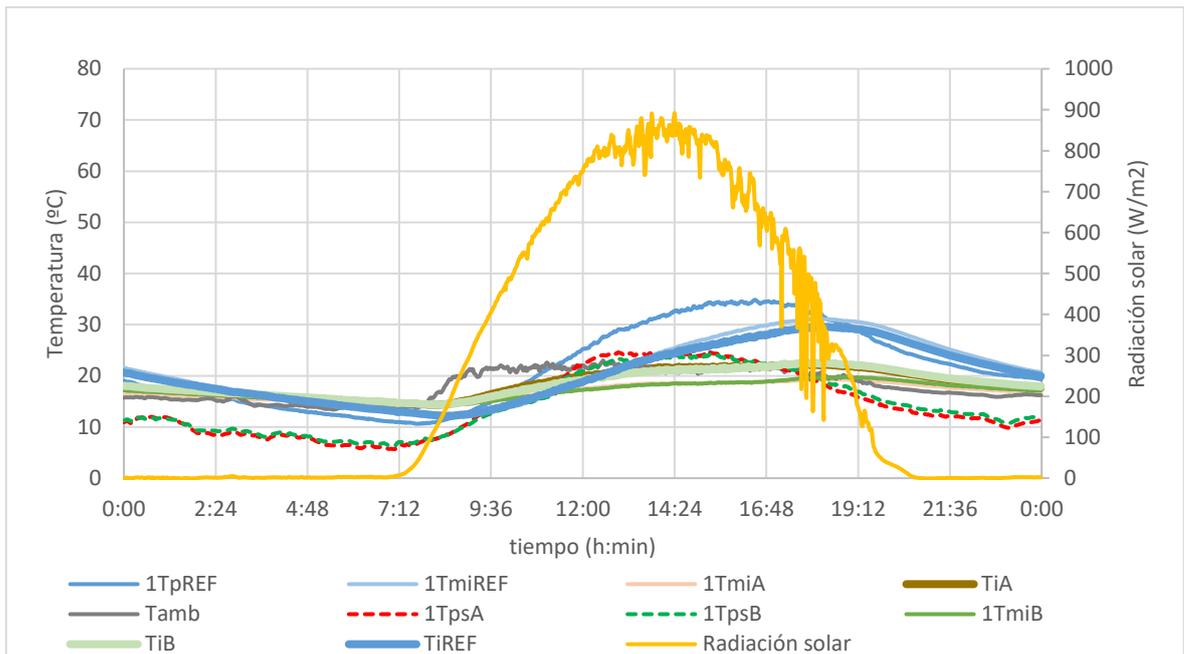


Figura 12. SISTEMA 1 vs SISTEMA 3 BLANCA. Prototipo REF / Prototipo A (PAs1b6A5) / Prototipo B (PAs3b6A3m) 21-04-2023

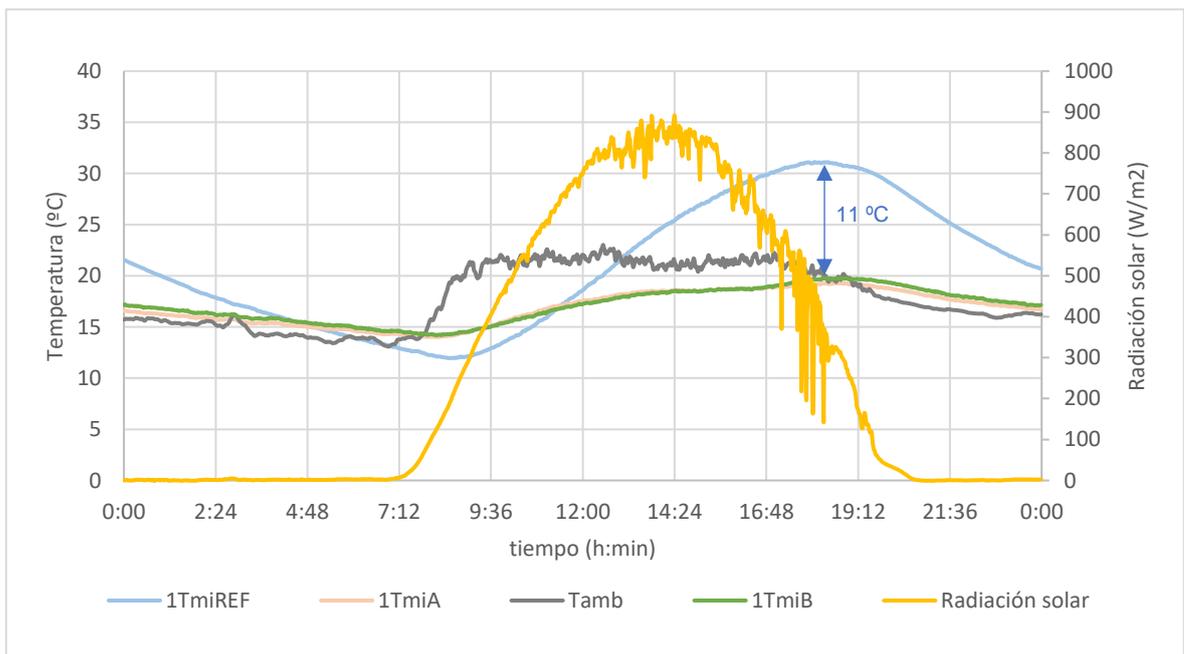


Figura 13. Diferencias en Temperatura muro interior Templado A: **SISTEMA 1** y **B:SISTEMA 3** respecto REF. Pieza **BLANCA** 21-04-2023.

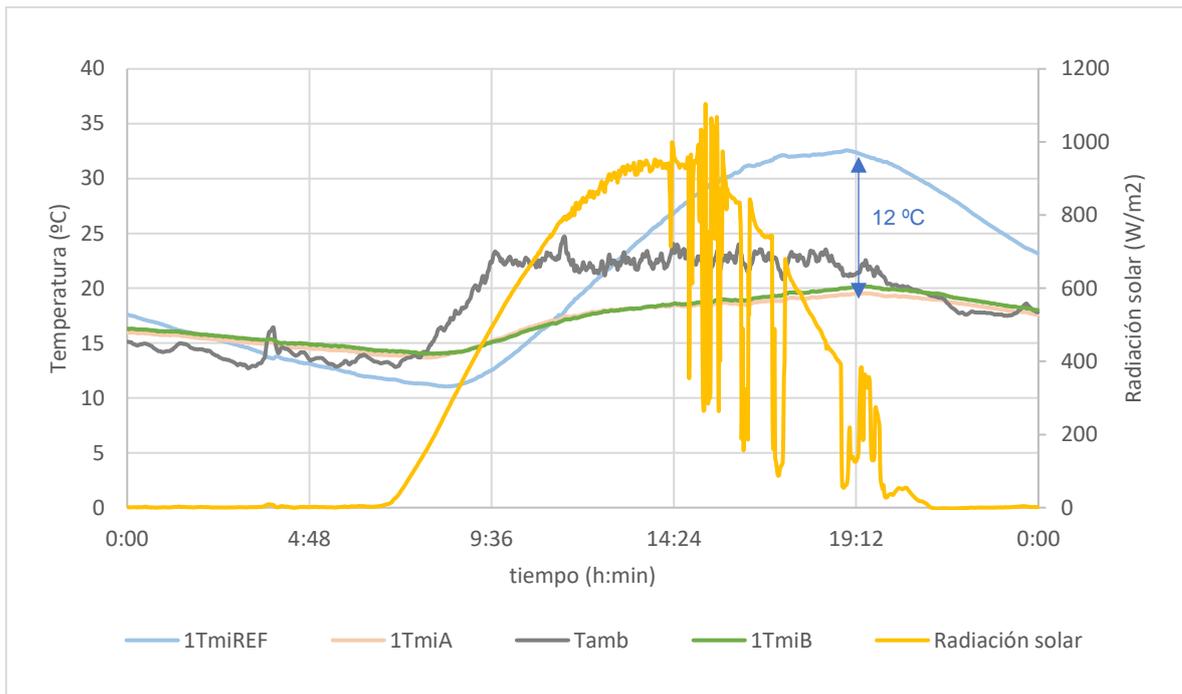


Figura 14. Diferencias temperaturas muro templado. **SISTEMA 1 vs SISTEMA 2 BLANCA** Prototipo REF / Prototipo A (PAs1b6A5) / Prototipo B (PAs2b6A5) 14-05-2023

5.4. Sistemas innovadores

5.4.1. Rehabilitación de la cubierta con piezas Reflectivas

Uno de los sistemas innovadores validado en el estudio ha sido la utilización de **superficies con un elevado coeficiente de reflexión**, también conocidas como superficies COOL, las cuales permiten reflejar parte de la radiación incidente evitando su calentamiento superficial. Se han ensayados dos tipos de piezas con un esmalte reflectivo, piezas alveolares y piezas extruidas planas (aportadas por la empresa ColorEsmalt).

En la siguiente tabla se muestran los valores de índice de reflexión, absorptancia y emisividad de las piezas. El **aumento en el índice de reflexión** alcanzado con estos esmaltes innovadores es del **22%**.

Tabla 14. Valores de absorptancia, reflectancia y emisividad de las piezas estudiadas

Referencia pieza	Absortancia solar	Reflectancia solar	Emisividad térmica
Pieza extruida blanca STD	0.36	0.64	0.83
Pieza extruida blanca Reflectiva	0.22	0.78	0.83

Las piezas alveolares Figura 15, se ensayaron al principio del proyecto cuando sólo se disponían de dos prototipos, por lo que se compararon en ese estudio la pieza STD de color blanco sin el esmalte reflectivo y la pieza con el esmalte reflectivo colocadas en sistema suelo técnico elevado (STE) y también aplacadas.



Figura 15. Vista general del prototipo rehabilitado con piezas extruidas blancas

En las siguiente Tabla 15, se resumen los datos obtenidos cuando estas piezas extruidas reflectivas y STD instaladas con el sistema de Suelo Técnico Elevado se comparan con el sistema de referencia (baldosín). La temperatura promedio durante el día de la pieza reflectiva, está siempre un grado por debajo que la temperatura del baldosín (entre 1 y 2 °C en temperaturas promedio y hasta 4 °C en temperatura máxima) debido a su color y a su elevado índice de reflectancia. Cuando se coloca una pieza igual, pero sin esmalte reflectivo, blanca extruida STD, la diferencia es menor (menor de un grado en temperatura promedio y 2 °C en temperatura máxima). Esta menor temperatura superficial junto con el aislante que actúa como barrera consiguen que la temperatura del muro este siempre por debajo de la temperatura del muro de referencia (entre 1 y 2 °C en temperatura promedio) y hasta 5 -6°C en Temperatura máxima (Figura 16 y Figura 17). Este efecto conjunto permite reducir la ganancia de calor en el sistema en los meses de verano, clima cálido.

Tabla 15. Resumen de temperaturas alcanzadas por los sistemas con piezas extruidas STE con piezas reflectiva y estándar.

Prototipo	Fecha	Config. Observaciones	Dia						
			T _{AExMed} (°C)	Radiación m (W/m ²)	T _{PzaMed} (°C)	T _{PzaMax} (°C)	T _{CTCMed} (°C)	T _{MurMed} (°C)	T _{AlnMed} (°C)
A	23/09/2022	0.7 C_ext_Reflectiva_STE	25.4	343.9	26.8	30.5	25.8	24.9	22.7
REF	23/09/2022	REF. baldosin	25.4	343.9	27.7	34.9		25.3	23.9

A	27/09/2022	0.7 C_ext_Reflectiva_STE	25.0	529.2	25.8	32.2	25.2	22.8	21.3
REF	27/09/2022	REF.baldosin	25.0	529.2	27.6	35.0		24.1	22.8
A	28/09/2022	0.7 C_ext_Reflectiva_STE	26.2	413.1	26.4	31.6	25.9	23.8	22.4
REF	28/09/2022	REF.baldosin	26.2	413.1	27.3	34.3		24.8	23.4
A	29/09/2022	0.7.1 C_ext_STD_STE	24.9	463.9	27.4	33.0	26.1	24.1	22.4
REF	29/09/2022	REF.baldosin	24.9	463.9	27.3	34.4		24.5	23.0
A	02/10/2022	0.7.1 C_ext_STD_STE	23.9	503.4	26.7	32.4	25.2	22.7	21.5
REF	02/10/2022	REF.baldosin	23.9	503.4	27.1	34.1		24.1	22.8

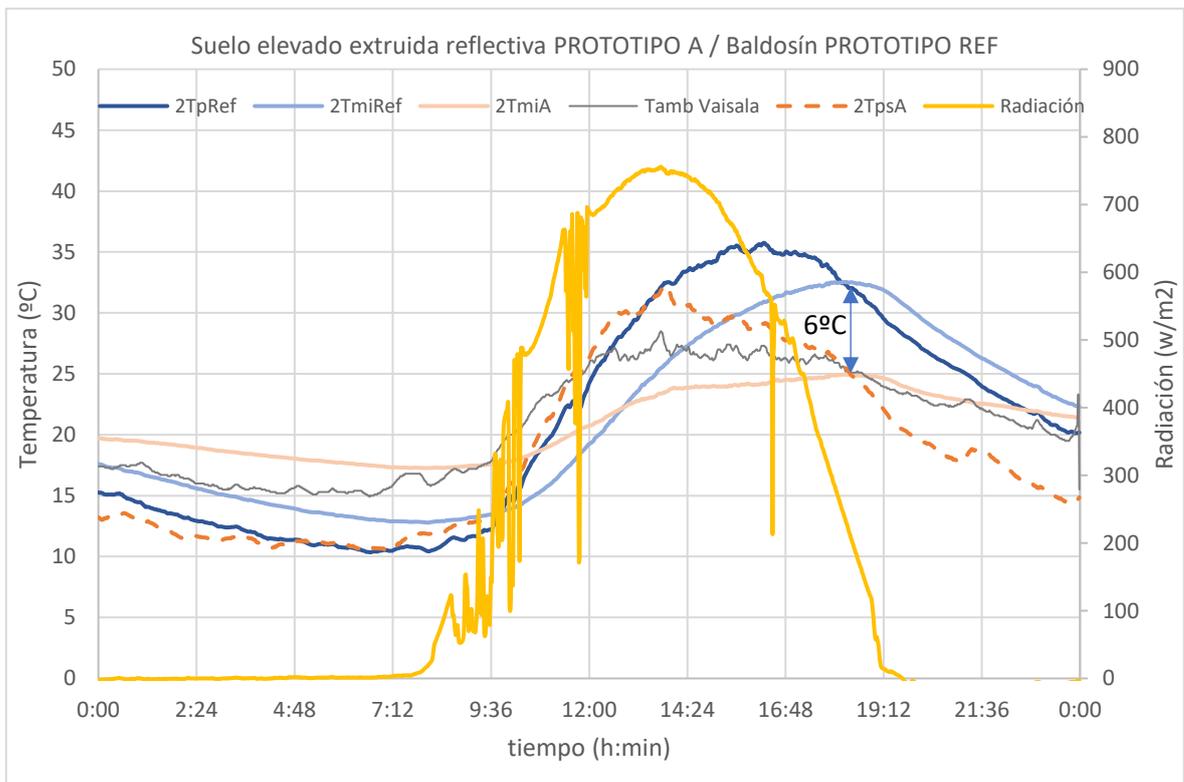


Figura 16. Comparativa prototipo rehabilitado con **pavimento sobreelevado canal** (extruida reflectiva) y el prototipo referencia. (27 septiembre 2022).

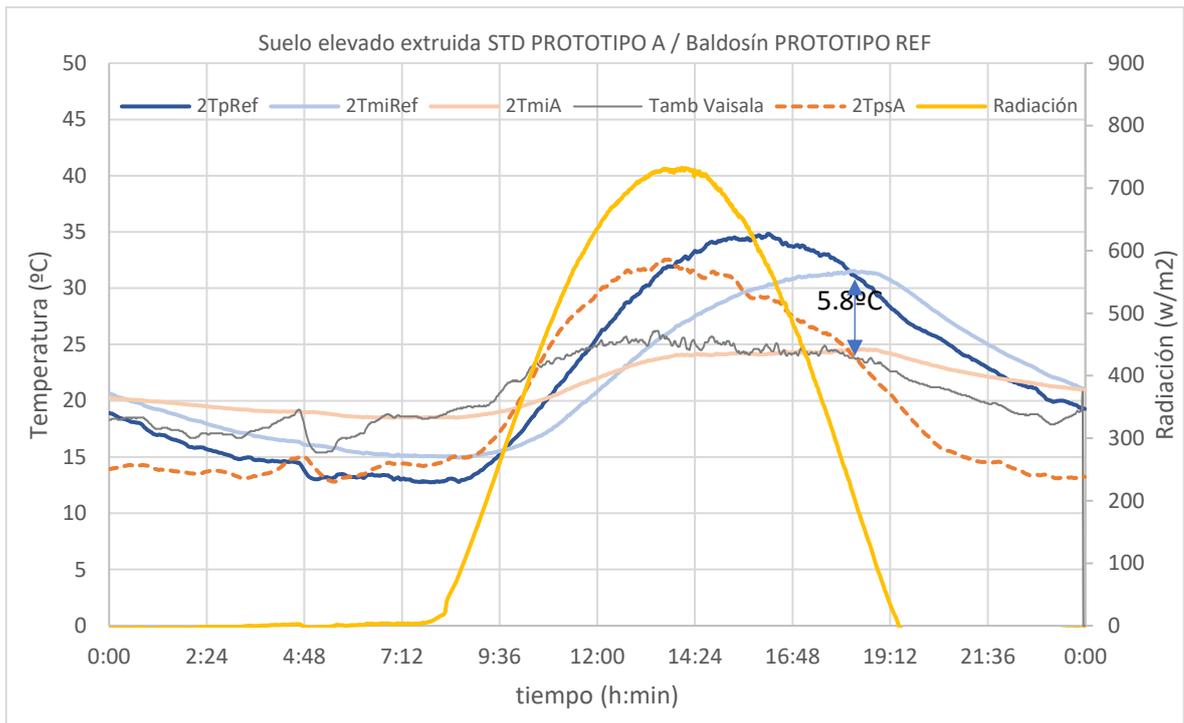


Figura 17. Comparativa prototipo rehabilitado con **pavimento sobreelevado canal** (extruida STD) y el prototipo referencia. (2 octubre 2022).

También se ha realizado el estudio de las superficies reflectivas, pero colocando la pieza aplacada (PA), como podemos observar en la siguiente imagen, Figura 18.



Figura 18. Pieza extruida alveolar reflectiva junto con prototipo de referencia baldosín catalán.

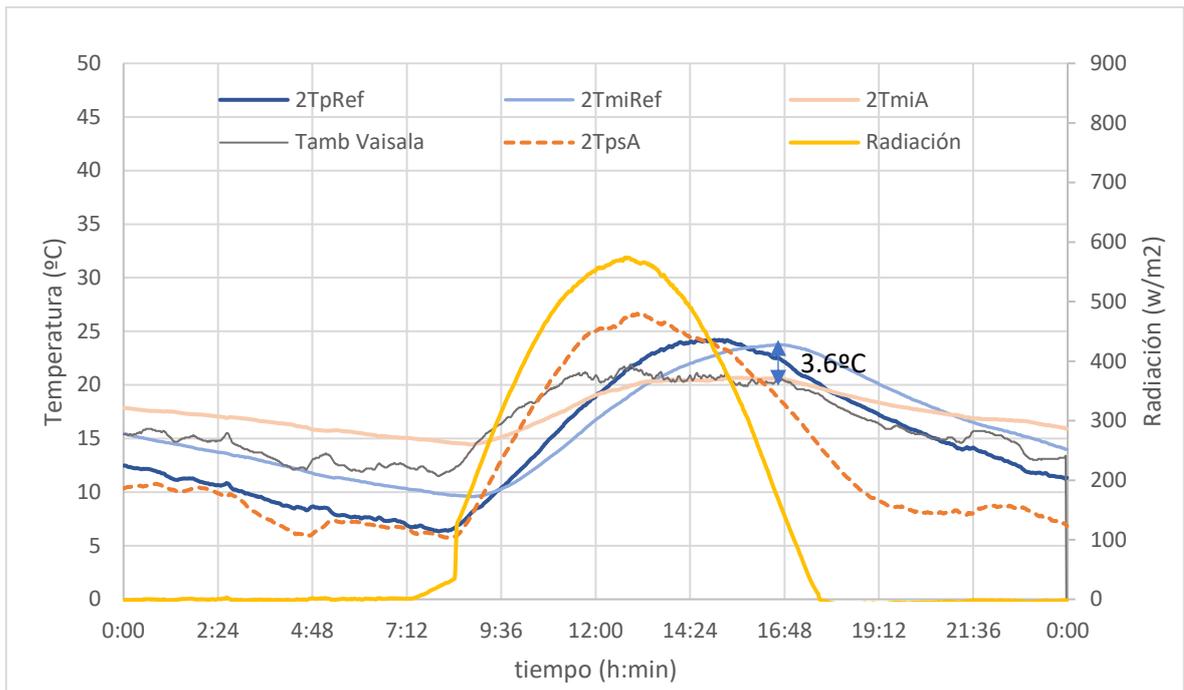


Figura 19. Comparativa prototipo rehabilitado con **pavimento aplacado (extruida STD)** y el prototipo referencia (5/11/2022)

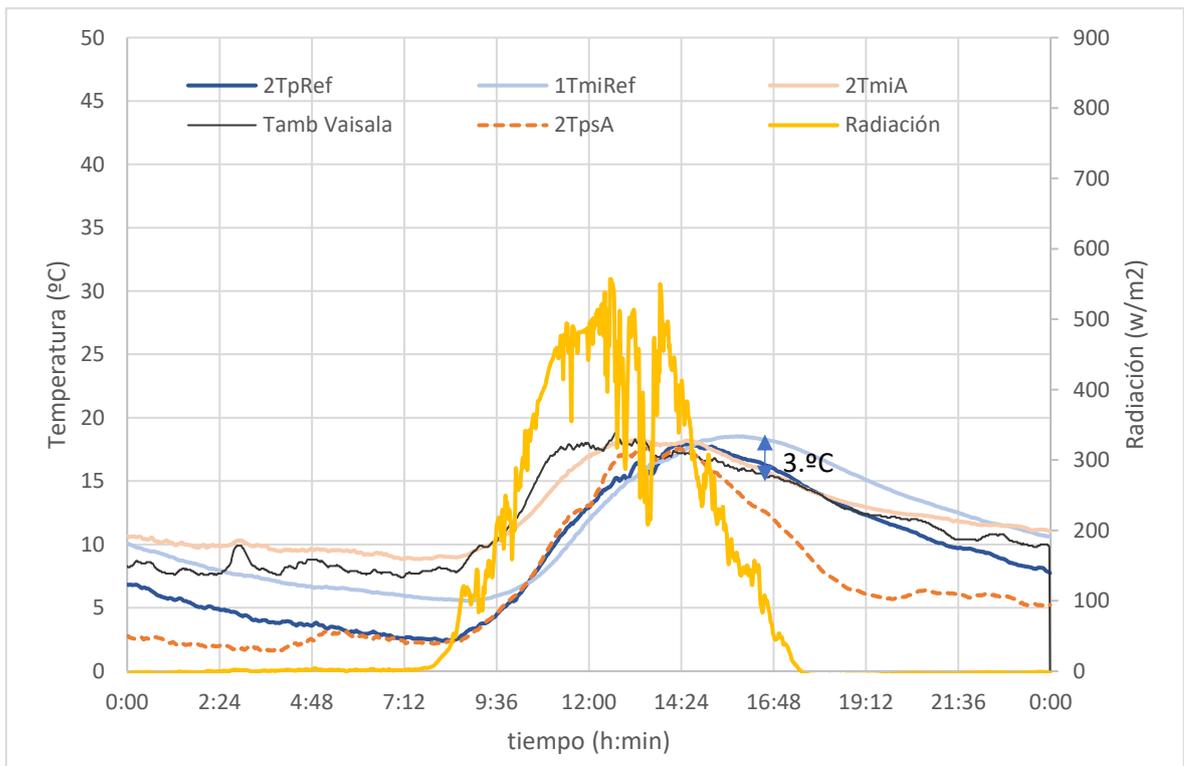


Figura 20 . Comparativa prototipo rehabilitado con **pavimento aplacado (extruida Reflexiva)** y el prototipo de referencia (27/11/2022)

Cuando el sistema de colocación de la pieza es **aplacado** las diferencias en temperaturas máximas en el muro se reducen, pasan a situarse entre 4 y 3 °C, presentando una menor diferencia cuando la pieza tiene una superficie más reflectante, Figura 19 y Figura 20.

En la siguiente Tabla 16 se resumen los valores de temperatura promedio obtenidos en los dos días representados en los gráficos anteriores, Figura 19 y Figura 20. Como puede observarse, las temperaturas en el muro (T_{MurMed}) son mayores en los prototipos rehabilitados que en el prototipo de referencia por el efecto del aislante.

Tabla 16. Resumen comparativo temperaturas durante el día en sistema Aplacado pieza STD y reflectiva

Prototipo	Fecha	Config. Observaciones	Dia					
			TAExMed (°C)	Radiación m (W/m ²)	T _{PzaMed} (°C)	T _{PzaMax} (°C)	T _{MurMed} (°C)	TAlnMed (°C)
A	05/11/2022	0.6.1. C_AP_ext. STD	19.4	407.3	20.5	26.5	18.7	16.8
REF	05/11/2022	Baldosín	19.4	407.3	18.2	23.6	17.7	16.3
A	27/11/2022	0.6.C_AP_ext. reflectiva	15.7	324.1	12.6	17.8	15.5	13.8
REF	27/11/2022	Baldosín	15.7	324.1	12.4	17.5	12.9	11.3

El estudio con dos prototipos no permitió realizar una comparativa entre las piezas reflectivas y las piezas estándar respecto al prototipo de referencia en las mismas condiciones climáticas, por lo que el estudio con el sistema innovador con pieza reflectiva **se monitorizó de nuevo cuando los tres prototipos** estuvieron construidos, utilizando en este caso piezas extrudidas planas.

5.4.1.1. Estudio pieza cerámica plana con superficie reflectiva

Tras el estudio previo realizado con las piezas alveolares con esmalte reflectivo, se prepararon unas piezas blancas planas para poder colocarse tanto en sistema aplacado como en un sistema de suelo técnico elevado y monitorizarse a la vez la pieza reflectiva respecto la pieza estándar y el prototipo de referencia. Se han ensayado tres tipos de sistemas:

- Pavimento aplacado
 - 4.1C, se compara prototipo de referencia, con pieza aplacada blanca y con pieza aplacada reflectiva ambas con aislante
 - 4.2C, se compara prototipo de referencia, con pieza aplacada blanca con aislante y con pieza aplacada reflectiva sin aislante para analizar el efecto que puede llegar a tener la pieza reflectiva sobre la temperatura del muro al actuar como barrera
- Suelo Técnico Elevado

- 4.3C se compara prototipo de referencia, con pieza STE blanca con aislante y con pieza STE reflectiva sin aislante para analizar el efecto que puede llegar a tener la pieza reflectiva sobre la temperatura del muro al actuar como barrera

En la Tabla 17 se muestran las temperaturas promedio obtenidas durante el día con cada uno de los tres sistemas propuestos, 4.1. C, 4.2C y 4.3C. En primer lugar, se analizó el efecto de la pieza reflectiva **en periodo cálido** realizando la comparativa con aislante (**4.1C**). En este caso, la diferencia entre sistemas, última columna, es de 1°C aunque la diferencia entre la temperatura de las piezas (blanca reflectiva) ha sido de 2°C. Sin embargo, cuando se realiza la misma comparativa pero sin colocar el aislante en la pieza reflectiva (**4.2C**) la diferencia detectada entre piezas se obtiene también en el muro, **alcanzándose diferencias de 3.6°C**. Cuando se coloca también sin aislante pero con suelo técnico elevado (4.3C), se obtiene también el mismo efecto pues la diferencia de temperatura entre la superficie piezas es igual a la obtenida en el muro.

Con **todos los sistemas** analizados **en periodo cálido la temperatura promedio en el muro está siempre por debajo de la temperatura de referencia** demostrándose así la efectividad de la pieza blanca, disminuye hasta 2,5°C en temperaturas promedio y de la pieza reflectiva que disminuye desde 2.5°C hasta 5°C cuando se coloca sin aislante.

Tabla 17. Tabla comparativa temperaturas promedio sistemas con piezas reflectivas

		DIA								
		Text. día	T _{ps} Med (°C)	T _{ps} Max (°C)	T _{mi} Med (°C)	T _{ai} Med (°C)	T pieza - T _p REF	T mi - T _m REF	Tai- TaiREF	Diferencia entre sistemas rehabilitados T _{mur}
4.1C	Baldosín	28.5	34.5	41.0	37.7	38.9	-	-	-	-
4.1C	PAb8A5	28.5	29.7	41.1	36.0	38.9	-4.9	-1.6	0.0	-
4.1C	PAbR8A5	28.5	28.2	37.9	35.0	38.6	-6.3	-2.6	-0.4	1
4.2C	Baldosín	26.6	33.5	42.9	35.3	36.6	-	-	-	-
4.2C	PAb8A5	26.2	29.7	39.7	33.9	36.8	-3.8	-1.4	0.2	-
4.2C	PAbR8A0	26.2	26.5	31.7	30.3	34.4	-6.9	-5.0	-2.2	3.6
4.3C	Baldosín	27.4	33.8	41.3	36.5	37.9	-	-	-	-
4.3C	PAb8A5	27.4	30.5	38.4	34.0	37.3	-3.2	-2.5	-0.6	-
4.3C	STEbR8cc2A0	27.4	28.4	33.5	31.7	35.9	-5.4	-4.9	-2.0	2.5

Si analizamos el comportamiento a lo largo de un día por ejemplo del sistema 4.3C, Figura 21, observamos como tras el periodo de radiación recibida, cuando las temperaturas en muro son mayores, sobre las 19:00 de la tarde, **las diferencias máximas de temperatura en muro pueden alcanzar los 8°C** cuando se instala el STE con pieza reflectiva.

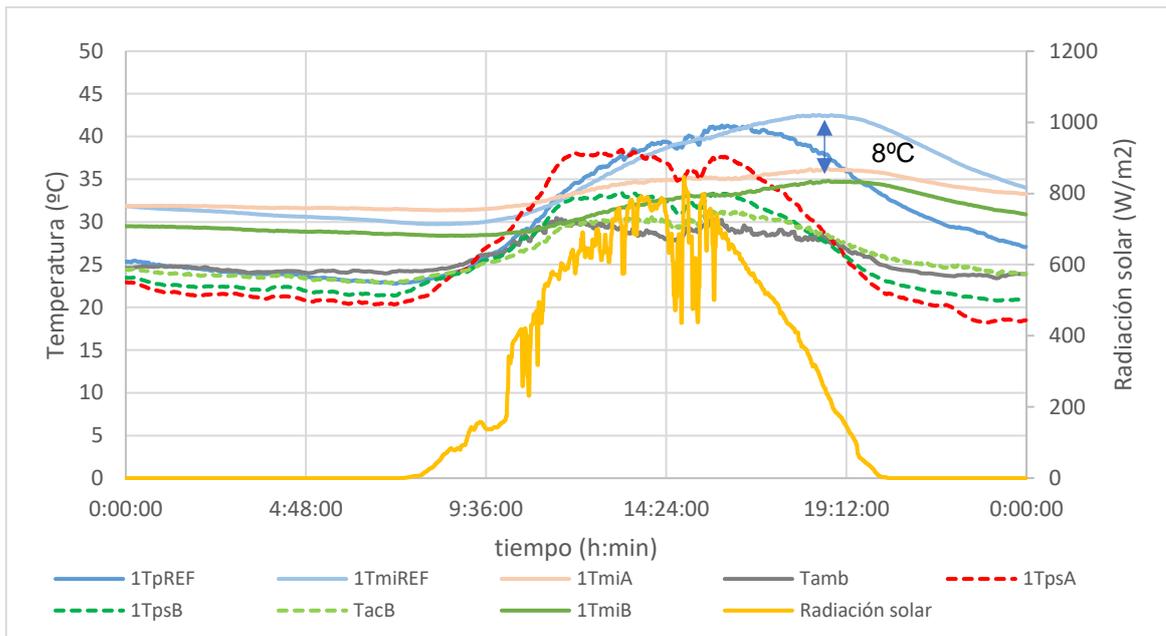


Figura 21. 4.3C : Prototipo REF / Prototipo A (PAb8A5) / Prototipo B (STEbR8cc2A0) 05-09-2023

5.4.2. Rehabilitación de la cubierta con sistemas técnicos aligerados

Se ha diseñado un prototipo de pieza, ver Figura 22, en la que se combina una pieza cerámica con un núcleo PET aligerado adherido a su trasdós. El objetivo de esta combinación es dotar a la pieza cerámica de mayor resistencia mecánica a la flexión gracias a este núcleo PET y poder utilizar de esta forma piezas cerámicas con un espesor reducido. De esta forma se consigue reducir el peso del sistema utilizado para rehabilitar con suelo técnico cerámico. Actualmente los sistemas cerámicos utilizan piezas espesadas de 20mm, que incrementan el peso total de la cubierta.

Se han ensayado dos sistemas, el **sistema 1.8 C** donde se han utilizado **piezas aligeradas colocadas en STE** con dos tonalidades, **blanca y gris**, y el **sistema 1.9.C** donde se ha comparado el sistema aligerado STE con pieza blanca con un sistema de STE con pieza blanca estándar.

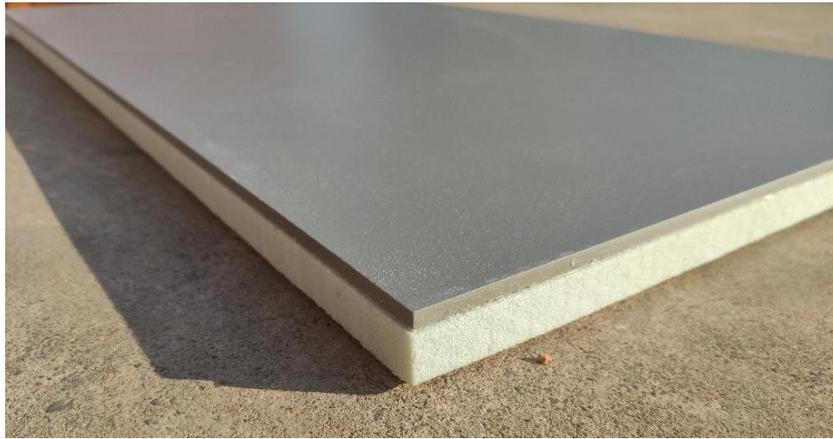


Figura 22. Sistema técnico aligerado (Pieza cerámica de 3 mm de espesor con sistema PET adherido)



Figura 23. Sistema 1.8 C pieza aligerada colocada como STE con cámara cerrada

En la Tabla 18 se resumen los resultados obtenidos con los sistemas cuando se utiliza en ellos la pieza aligerada con el núcleo PET. En el **sistema 1.8.C**, se observa que, aunque la pieza blanca consigue reducir hasta 5 °C la temperatura en su superficie respecto a la de referencia o la pieza gris, las diferencias de temperatura alcanzadas en el muro promedio son equivalentes, 35 °C, y están unos 5°C por debajo que en el muro sin rehabilitar. En clima cálidos, el sistema innovador reduce la temperatura de muro respecto al que se alcanza en el prototipo de referencia, independientemente del color de la pieza en la superficie.

Por otra parte, en el **sistema 1.9C**, se han comparado dos sistemas de suelo técnico elevado, uno con pieza blanca estándar y otro con pieza blanca con núcleo aligerado, incorporando en ambos casos un aislamiento térmico de 5cm de espesor. Como puede observarse en la tabla, Tabla 18, el núcleo PET de la pieza aligerada (prototipo B) permite reducir el peso del sistema, pero no se aprecia

su contribución como aislante, pues los resultados obtenidos son muy similares a los obtenidos en el prototipo A.

Tabla 18. Resumen sistemas con suelo técnico aligerado, temperaturas durante el DIA. Valores promedio.

Prototipo	Código	Referencia	Tamb Med (°C)	Radiación solar med (W/m ²)	Tps Med (°C)	Tmi Med (°C)	Tai Med (°C)	T pieza - TpREF	T mi - TmREF	Tai - TaiREF
REF	1.8 C	Baldosín	31.3	474.3	39.6	41.0	42.1	-	-	-
A	1.8 C	STEG6-20ccA5	31.3	474.3	39.9	35.6	40.1	0.2	-5.3	-2.0
B	1.8 C	STEb6-20ccA5	31.3	474.3	34.8	35.3	39.7	-4.8	-5.7	-2.4
REF	1.9 C	Baldosín	29.8	458.2	38.2	40.0	40.8	-	-	-
A	1.9 C	STEb6cc2A5	29.8	458.2	30.4	35.0	39.3	-7.8	-5.0	-1.6
B	1.9 C	STEb6-20ccA5	29.8	458.2	33.0	35.1	39.3	-5.2	-4.9	-1.5

En las siguientes figuras se muestran las temperaturas de pieza y muro alcanzadas en los prototipos a lo largo de un día, cuando se utilizan los sistemas innovadores con suelo aligerado. En el primer gráfico Figura 24 se observa como el color de la pieza utilizado en el sistema innovador de pieza aligerada con núcleo PET no afecta a la temperatura del muro obteniéndose idénticos resultados (serie verde y rosa claro casi superpuestas) gracias al efecto del aislante. Si que se observa que ambas se quedan muy por debajo de la temperatura de muro del sistema de referencia.

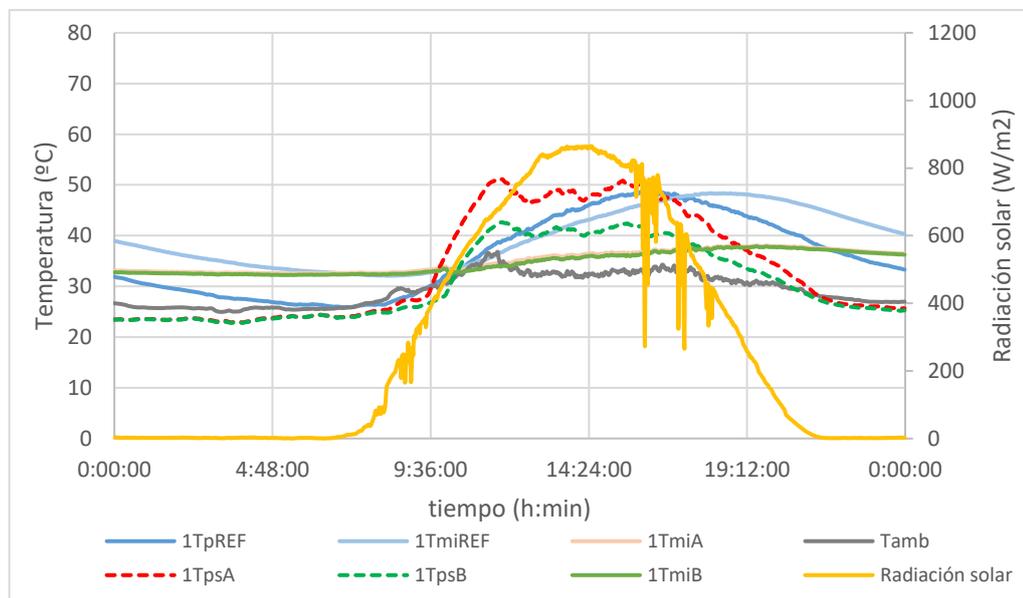


Figura 24. Sistema 1.8C: Prototipo REF / Prototipo A (STEG6-20ccA5) / Prototipo B (STEb6-20ccA5) 19-07-2023

Cuando se compara la pieza aligerada instalada con sistema de suelo técnico elevado con una pieza estándar del mismo tono (en este caso de color blanco), Figura 25, se observa que el sistema innovador tiene un comportamiento térmico muy similar al prototipo rehabilitado con STE, por lo que a priori no parece que el núcleo PET del sistema aligerado proporcione mayor capacidad de

aislamiento. Para poder determinar el efecto del núcleo PET como aislante se debería plantear la eliminación del aislamiento de 5 cm utilizado en la rehabilitación.

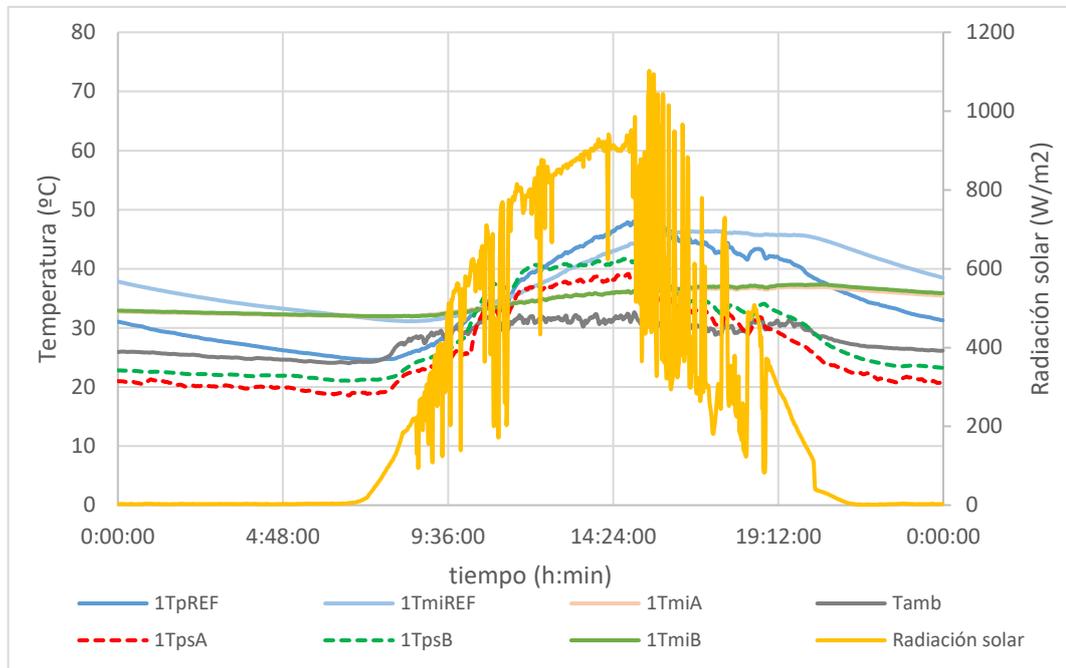


Figura 25. Sistema 1.9: Prototipo REF / Prototipo A (STEb6cc2A5) / Prototipo B (STEb6-20ccA5) 29-07-2023

6. Conclusiones

A continuación se resumen las principales conclusiones que pueden extraerse del presente estudio.

6.1. Evaluación multicriterio

Tal y como se muestra en la siguiente tabla, a nivel ambiental, el sistema sobreelevado es una solución claramente preferible al adherido debido principalmente al criterio de "Recuperación y Reciclaje". No ocurre lo mismo a nivel prestacional ni económico donde ambas soluciones manifiestan un comportamiento similar.

Criterios evaluados	Pavimento sobreelevado	Pavimento adherido
A. Ambientales	5,00	3,00
E. Económicos	2,50	2,50
P. Prestacionales	3,00	3,00
Total (A+E+P)	3,50	2,83

Tabla 19. Valoración promedio total y según el tipo de criterio (A, E y P)

Tras analizar las dos propuestas de rehabilitación para cubierta planas, se han identificado aquellos puntos débiles a mejorar en cada una de las soluciones evaluadas para proponer nuevos sistemas innovadores, entre los que destacamos:

- Pavimento sobreelevado | P.2. Peso del sistema | Propuesta de mejora: en lugar de utilizar baldosas de 20mm, utilizar un sistema aligerado formado por una lámina cerámica de 6mm adherida a un núcleo soporte ligero.
- Pavimento adherido | P.2. Peso del sistema | Propuesta de mejora: aligerar la capa de mortero de regulación utilizando aislamientos térmicos especiales.

6.2. Simulación energética

Si nos centramos en los resultados obtenidos en las distintas zonas climáticas para las diferentes tipologías edificatorias y escenarios contemplados, se obtiene que el **potencial de ahorro energético** que supondría la **rehabilitación de la cubierta** del edificio permite alcanzar **reducciones de la demanda global** que varían entre el **19% y el 41%**.

Por otra parte, si se consideran los resultados obtenidos en las simulaciones, considerando todos los escenarios y variables, se ha observado que:

- Cuando se rehabilita toda la envolvente (cubierta+fachada+ventanas), pueden alcanzarse valores de reducción de la demanda global próximos al 70% en zonas climáticas frías (E1) y al 50% en zonas climáticas cálidas (B3-A4).
- En determinados casos, la rehabilitación de la envolvente con aislamiento térmico puede llegar a producir incrementos de la demanda de refrigeración, tanto en zonas climáticas cálidas como en frías. Para lograr un comportamiento energético eficiente en la rehabilitación, **la incorporación del aislamiento térmico en la envolvente debe ir acompañado de otras medidas**, como pueden ser los **sistemas de protección solar** (principalmente en zonas climáticas cálidas) y los **sistemas de ventilación** controlados y eficientes mediante recuperadores de calor que garanticen las renovaciones de aire en el interior de los edificios.

6.3. Evaluación experimental

A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos tras la monitorización y evaluación de los datos registrados en los prototipos:

- Se ha **diseñado y construido tres prototipos de validación** a modo de laboratorio energético, completamente sensorizados y climatizados, que permiten la evaluación de sistemas para cubiertas planas en las mismas condiciones ambientales. Para la adquisición y visualización de los datos, se ha implementado una plataforma de monitorización y control basada en servicios privados cloud.

- Se han **monitorizado a nivel experimental diferentes sistemas cerámicos** (cubierta invertida con pavimento aplacado y con suelo técnico elevado), modificando diferentes variables (color pieza, espesor de aislamiento, ventilación de la cámara, etc), así como sistemas cerámicos innovadores (piezas de reducido espesor con refuerzos, sistemas mixtos de aislamiento y mortero, piezas reversibles, etc.).
- Los resultados obtenidos durante la monitorización han permitido evaluar la influencia del efecto de: el aislamiento, el color de las piezas cerámicas y de la cámara del suelo técnico elevado sobre las ganancias térmicas a través de la cubierta. El estudio comparativo de los sistemas evaluados respecto al sistema sin rehabilitar ha permitido cuantificar las diferencias de temperatura que se alcanzan en cada caso.

A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos para cada uno de los casos evaluados:

6.3.1. Conclusiones sistemas de referencia vs STE (ventilado) vs STE (ventilado)

Se ha observado que, **tanto en climas templados como en cálidos**, cuando se rehabilita con el sistema STE (con o sin aislante), aunque la temperatura en la superficie de las piezas cerámicas es mayor que la del baldosín, las **temperaturas en el muro interior son menores** respecto a la registrada en el prototipo de referencia debido a la reducción de las ganancias por radiación solar producidos por el efecto de la cámara ventilada y el aislante. En **climas templados** se observan diferencias de temperatura en el muro del orden de **1°C** cuando se pasa de un sistema sin aislante respecto a un sistema con 50mm de aislamiento. Dichas diferencias apenas se incrementan cuando se pasa de 50mm a 80mm de aislamiento, por lo que un aumento en el espesor pasando de 5 cm a cm no implica mejoras térmicas en la zona climática estudiada. En **clima cálido** las **reducciones de temperatura en el muro interior** del sistema STE con 50mm de aislamiento respecto al de referencia son importantes, alcanzando valores **superiores a 5°C**. Además, se ha constatado que **el aislante junto con la cámara, permiten reducir las oscilaciones térmicas a la mitad**, (en el prototipo de referencia sin aislar el gradiente térmico diario alcanza los 16°C).

Cuando se analiza el **color de la pieza** en estos sistemas, se observa que, aunque las **diferencias de temperatura entre las piezas** negra y blanca son muy significativas, **las diferencias en la temperatura de muro en el sistema STE apenas presentan diferencias** gracias al efecto del aislamiento.

También se ha analizado el efecto de la apertura del canal generado en la cámara al colocar el suelo técnico elevado, observándose que, aunque la temperatura de la pieza en la superficie sí que se reduce, **tener el canal abierto o cerrado no afecta a la temperatura del muro**, pues las diferencias en muro e interior entre canal cerrado y abierto no son significativas, debido también al efecto del aislamiento.

Se han instalado unos **sistemas de climatización** en el interior de los prototipos para mantener la temperatura constante y **cuantificar así** las ganancias de calor mediante los sensores de flujo. Se ha observado como los prototipos rehabilitados presentan valores de flujo cercanos al cero, con elevada fluctuación debido a las oscilaciones en la temperatura interior ocasionada por el sistema de climatización, **pero sin embargo en el prototipo de referencia donde no se tiene aislante, el flujo adquiere valores muy elevados debido a la ganancia de calor** a través de la cubierta, llegando a su punto máximo sobre las cinco de la tarde, cuando la temperatura del baldosín junto con la del muro de referencia presentan su máximo.

6.3.2. Conclusiones Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs Suelo Técnico Elevado (STE)

Si comparamos los sistemas rehabilitados, se observa cómo las diferencias de temperatura en el muro interior son similares, aunque ligeramente inferiores en el sistema STE. En los casos estudiados se ha observado que el **sistema STE con pieza negra en clima templado** y con **pieza blanca en clima cálido tiene un mejor comportamiento térmico** que un sistema aplacado PA. Las diferencias en temperatura máxima de muro interior en verano cuando se rehabilita con STE respecto al sistema de referencia alcanzan los 6°C.

6.3.3. Conclusiones Sistemas de referencia vs aplacado (PA) vs aplacado (PA)

Se han estudiado varios sistemas de colocación de pavimento aplacado, concretamente cuatro tipos. Si analizamos las diferencias de temperatura, cuando se rehabilitan los prototipos con los sistemas de **pavimento aplacado S1, S2 y S3, en todos ellos las temperaturas registradas en el muro son inferiores a las de temperatura de referencia** pues el aislante actúa como barrera a la transferencia de calor. Si comparamos entre sistemas, las diferencias son algo mayores cuando se comparan los sistemas 1 y 3, pues el sistema 3 tiene menos capa de aislante y una capa más conductora formada por el mortero. Este sistema 3 aísla algo menos y tiene una temperatura en muro algo más alta, obteniéndose unas diferencias promedio entre sistemas de 0,7°C. Hay muy poca diferencia cuando se compara el sistema s1 y con el sistema 2 que solo incluye una microventilación, las diferencias entre sistemas como se observa en la tabla son casi nulas. **El sistema 3 puede ser el sistema más indicado para climas templados.**

6.3.4. Conclusiones Sistemas innovadores

En relación a los **sistemas aplacados** propuestos, se han ensayado dos **sistemas innovadores**; el **sistema S3 (PAs3)** y el sistema 2 (Pas2), obteniéndose buenos resultados con el sistema S3 en climas templados. Este sistema está formado por: una **capa de aislante XPS con pivotes relleno de mortero**, una lámina de impermeabilización más un adhesivo cementoso y puede dar **buenos**

resultados al obtenerse en invierno una temperatura de muro algo más alta que cuando se utiliza un sistema con aislante convencional S1.

Respecto a las **piezas reflectivas**, se ha evaluado la eficacia de los esmaltes reflectivos para dos tonalidades de pieza (blanca y gris) en pavimentos aplacados colocados en horizontal durante los meses de verano. Se ha constatado que **el esmalte reflectivo reduce de forma significativa la temperatura de las piezas**, siendo **mayor su efecto** cuando el **color de la pieza es blanco**. La **reducción promedio** de temperatura en las horas centrales del día es de **4°C** para las piezas blancas y 2 °C para las piezas grises. También se han analizado las **diferencias de temperatura en picos máximos**, y se ha observado cómo las diferencias de temperatura entre piezas pueden alcanzar valores de **6 a 7°C**. Por este motivo las piezas reflectivas blancas son la solución óptima a utilizar en sistemas innovadores. Cuando el día está nublado las diferencias se reducen considerablemente pues el efecto de reflexión tiene menor peso.

Con todos los sistemas analizados con piezas reflectivas en periodo cálido la temperatura promedio en el muro está siempre por debajo de la temperatura de referencia (baldosín) demostrándose así la efectividad de la pieza blanca, disminuye hasta 2,5°C en **temperaturas promedio en muro** y de la **pieza reflectiva** que **disminuye desde 2.5°C hasta 5°C** cuando se coloca sin aislante. Si se analiza la temperatura tras un periodo de radiación diurna cuando las temperaturas en muro son mayores, sobre las siete de la tarde, las diferencias de temperatura en muro pueden alcanzar **los 8°C** cuando se instala el STE con pieza reflectiva.

En relación a los **sistemas aligerados** para soluciones de suelo técnico elevado, se ha comparado el **sistema innovador STE con núcleo aligerado** respecto al sistema de referencia junto con un STE con una pieza cerámica blanca STD ambos con aislante. **Se ha demostrado la eficacia de este sistema como barrera a la transferencia de calor**, pues logra reducir la temperatura del muro si se compara con el sistema de referencia. Estos resultados son similares a los obtenidos con un sistema STE con pieza cerámica STD. Se ha comprobado, que el núcleo PET de la pieza aligerada permite reducir el peso del sistema, pero en los casos monitorizados, no se ha apreciado su contribución como aislante, pues los resultados obtenidos son similares al sistema con pieza STD.

En los casos estudiados se ha observado un mejor comportamiento cuando se rehabilita con un sistema de Suelo Técnico Elevado con pieza negra en clima templado y con pieza blanca en clima cálido. Para optimizar el comportamiento de estos sistemas en la rehabilitación de cubiertas, tras el análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de los diferentes sistemas **se proponen dos soluciones innovadoras como líneas futuras**, una basada en el **aprovechamiento del aire caliente que se genera en la cámara del suelo técnico elevado** durante periodos fríos y la otra en el empleo de **piezas reversibles** (piezas cerámicas aligeradas con un núcleo PET entre ellas).