

ERAIKAL - 12

Promoción de la implantación y de la mejora de los sistemas de gestión de la calidad, fomento de la sostenibilidad y apoyo a la innovación en las empresas del sector de la edificación residencial de la CAPV

TECNALIA, Subproyecto D:

Estudio de investigación sobre eficiencia energética y viabilidad de la aplicación de fachadas ventiladas en soluciones de rehabilitación

Documento E1: Aspectos a considerar para la correcta ejecución y caracterización de las fachadas ventiladas

0- RESUMEN EJECUTIVO.

El Subproyecto D tiene como objeto la evaluación del comportamiento térmico dinámico de una fachada ventilada como solución de rehabilitación en la climatología del País Vasco.

La fachada ventilada es un sistema que consta de un revestimiento exterior, una subestructura metálica portante anclada a la superficie del edificio, una capa de aislamiento y una cámara de aire entre el revestimiento y el aislamiento. Esta cámara de aire está ventilada y evacua calor debido al efecto chimenea y al efecto del viento sobre la misma.

En la actualidad el análisis del comportamiento dinámico de la fachada ventilada resulta complejo por dos principales motivos¹:

- La poca información relacionada con las fachadas ventiladas
- La falta de herramientas de simulación que contemplen todos los fenómenos que tienen lugar.

Debido a la complejidad de los fenómenos que tienen lugar en lugar, el estudio tienen como objetivo evaluar mediante experimentación la mejora del comportamiento térmico de una zona, que emula la habitación de un edificio residencial construido antes de los años 80, tras ser rehabilitada con una solución de fachada ventilada. Estudiando por independiente el efecto de la eliminación de los puentes térmicos y la mejora de la propia envolvente por otro.

Este estudio se ha llevado a cabo en dos fases:

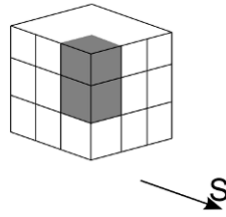
- Caracterización de la situación **anterior a la rehabilitación**,
- Caracterización de la **situación tras la rehabilitación con la solución de fachada ventilada**, evaluando la demanda energética de la zona acondicionada al ejecutarse la solución de fachada ventilada, y la caracterización térmica de la fachada ventilada incluido su estudio en altura.

Para ello, se han abordado sendas campañas experimentales en PASLINK y KUBIK, con objeto de desarrollar un modelo energético que permita el cálculo de la mejora de la eficiencia energética en el transcurso de un año ante distintas condiciones climáticas.

Dado que la experimentación en KUBIK se ha diseñado específicamente para este proyecto y ha requerido de la modificación física del edificio, previa a la campaña experimental en KUBIK se ha realizado **una fase inicial de calibración o test ϕ** acorde con los **requisitos** de la resolución del programa **ERAIKAL-12: 2010 con fecha 30/12/2010**. Cuyos resultados se recogen en el informe "E0: Calibración de la plataforma experimental KUBIK" con fecha de mayo del 2012

La experimentación en KUBIK by Tecnalia se ha llevado a cabo en dos celdas en vertical en la esquina Sur-Oeste del edificio, donde se ha ejecutado secuencialmente una fachada de doble fábrica de ladrillo, y su posterior rehabilitación mediante una solución de fachada ventilada, en la fachada Oeste de dichas celdas.

¹ F. Patania, Energy and Buildings 42, 2010, 1148.



Previo a este estudio y en el periodo de enero y marzo del 2012 se abordó una fase de calibración con una fachada muy aislante y sin inercia térmica para evaluar el comportamiento del resto de particiones de la celda.

Así, el montaje experimental se ha realizado partiendo de las siguientes premisas:

- El estudio se realiza sobre la fachada Oeste de las celdas F1S1 y F1S2.
- Se han estudiado tres fachadas secuencialmente:
 - Test de calibración
 - Fachada de doble fábrica de ladrillo
 - Fachada ventilada
- Incorporación de vigas de hormigón que simulan los frentes de forjado de los edificios con estructura de hormigón en la fachada Oeste.

La fase de diseño y ejecución parte de la situación existente en la infraestructura experimental KUBIK by Tecnalia de principios de 2011, por lo que se ha requerido de una fase previa de adecuación del resto de elementos de envolvente de las celdas de KUBIK.

Esta **demanda de energía** está determinada por las **pérdidas y ganancias** a través de los elementos que confinan la zona térmica y por las renovaciones de aire. Estos **flujos** a su vez, están condicionados por el salto térmico entre las distintas zonas con las que limita, por lo que el balance se circunscribe a las siguientes variables:

- Los elementos de envolvente de la celda en los que el flujo de energía tiene un componente básicamente unidimensional, como es el caso de los cerramientos de fachada, particiones interiores, techo y solera.
- Los puentes térmicos lineales 2D y puntuales 3D debidos a los encuentros entre elementos constructivos, la estructura u otras heterogeneidades constructivas, donde se manifiestan cambios en el flujo térmico y un cambio en las temperaturas superficiales.
- Las infiltraciones de aire a la zona objeto de estudio.

El origen de los datos de estas variables son las lecturas de los sensores específicos ubicados en KUBIK de acuerdo a la campaña experimental previamente definida para el presente proyecto.

Si bien en aquellos elementos o zonas donde es habitual que los flujos térmicos se manifiesten de forma compleja en dos o tres dimensiones- **puentes térmicos**-, una medida puntual no es representativa del flujo a través de los mismos, por lo que

requieren de un tratamiento diferenciado para el cálculo del valor de dicha variable dependiendo del tipo de puente térmico.

Para las **vigas de hormigón** que simulan el frente de forjado de los edificios con estructura de hormigón, los datos de las medidas de **sensores** de flujo y temperatura se han **correlacionado** con las pérdidas por el elemento de flanco con un **modelo** de diferencias finitas desarrollado en VOLTRA by Physibel .

La tercera variable, las pérdidas por **infiltraciones**, están determinadas por el caudal de aire intercambiado con las zonas adyacentes y con el salto térmico existente entre las mismas. Este valor está condicionado por la velocidad y dirección de viento en las fachadas expuestas. Dado que la medida instantánea representativa de este término es difícil de obtener, el tratamiento de las infiltraciones ha sido su **minimización y control**. Llevando a cabo para ello, una serie de **test de puerta soplante** hasta conseguir bajos niveles de infiltración y verificar que dichos niveles se han mantenido mediante un test al finalizar la campaña experimental.

Así, las variables físicas monitorizadas en KUBIK y utilizadas directamente en el estudio de la situación anterior y posterior a la rehabilitación, son:

- Los flujos unidimensionales interiores a través de los elementos planos de la celda de envolvente
- Los flujos de carácter bidimensional de los elementos de frente de forjado específicamente instalados para el presente proyecto.
- Los dinamismos en la cámara

De los valores tomados de las series experimentales, y de los cálculos realizados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Durante el **periodo de invierno** con demanda de calefacción, los **flujos** a través de la fachada rehabilitada con una solución de fachada ventilada con 5 cm de aislamiento y 5 cm de cámara de aire se ven **reducidos** a aproximadamente **la mitad** respecto a la solución base (doble fábrica de ladrillo)
Con una temperatura de confort **interior de 20°C** y un salto térmico entre el interior y exterior diarios de aproximadamente **15°C**, la solución rehabilitada pierde en torno a **6 W/m²** mientras que la doble fábrica de ladrillo, presentaba unas pérdidas de aproximadamente **16W/m²**.
- Para el periodo de invierno en el que se han llevado a cabo las campañas experimentales, la doble fábrica de ladrillo se ha comportado como un muro con una transmitancia aire-aire media 1,1W/m²K, mientras que la fachada ventilada se ha comportado como un muro con una transmitancia equivalente aire-aire de 0,5 W/Km² .
- De la caracterización dinámica se deduce que el **muro base** presenta una transmitancia superficie-superficie **U_{sup-sup}=1,89 W/m²K** e Interior –exterior de $U_{int-ext}=1,16$ W/m²K bajo las condiciones a las que está expuesta la fachada de KUBIK.
- De la caracterización dinámica se deduce que el **muro rehabilitado** presenta una transmitancia superficie-superficie de **U_{sup-sup}=0,67 W/m²K** e Interior –

exterior de $U_{\text{int-ext}} = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ calculado bajo las condiciones a las que está expuesta la fachada de KUBIK.

- La velocidad de aire a la que está sujeta la hoja exterior del aislamiento tras su rehabilitación es de 0,44 m/s (frente a los 0,67 m/s antes de su rehabilitación) reduciéndose el coeficiente convectivo sobre fachada de 7,8 W/m²K a 2,7 W/m²K, calculado como $h_c = 3,5 + 5,6v_{\text{proximo}}$, e incrementándose la **resistencia exterior**. El coeficiente radiante calculado para una temperatura media de 9°C es de 4,1 W/m²K, por lo que resistencia exterior calculada para la cámara de aire de la fachada ventilada es de **$R_{\text{ext-FV}} = 0,146 \text{ m}^2\text{K/W}$** , valor próximo al valor de la resistencia interior normativa de 0,13 m²K/W que recomienda la norma UNE-EN-ISO 6946 "método de cálculo de resistencia y transmitancia térmica de los elementos y componentes de la edificación" que se utilice para fachadas ventiladas.
- De acuerdo al modelo de caja gris, el valor de la resistencia superficial exterior equivalente para las condiciones a las que ha estado sujeta la fachada (R_{ext}) es de 0,0785 m² K/W . Siendo este un valor intermedio entre una resistencia superficial externa recomendado para las fachadas ventiladas (0,13 m² K/W) y el valor para una resistencia externa convencional (0,04 m²K/W) establecido en la norma UNE-EN-ISO 6946. Este valor está condicionado por la velocidad del viento, por lo que dependiendo del periodo utilizado en la resolución del sistema de ecuaciones, su valor puede variar.
- La R_{ext} del muro base calculada con la relación de $h_c = 3,5 + 5,6v_{\text{proximo}}$, es de 0,08 m²K/W. Por lo que cámara ventilada incrementa la resistencia exterior en 0,06m²K/W. Esto equivaldría en incrementar el aislamiento exterior en un centímetro.
- En el modelo que integra el efecto del sol sobre la fachada, **el sol tiene muy baja influencia** ($\rho = 0,003$), por lo que se puede considerar que en una fachada ventilada de junta abierta, el sol apenas tiene incidencia sobre el flujo de calor hacia el interior.
- La variabilidad intradiaria del flujo de calor a través de la fachada es significativa en la solución a rehabilitar (véase la figura siguientes), está oscilación intradiaria es significativamente menor para la fachada ventilada, lo que se traduce en unas temperaturas superficiales interiores más estables, mejorando las condiciones de confort interior
- En el conjunto de la fachada de 3,345 metros de altura y para el periodo estudiado, las pérdidas por los frentes de forjado representan entorno **al 20% de las pérdidas de calor por metro lineal** de fachada tanto antes como después de la rehabilitación y tienen especial importancia por presentar puntos fríos en el interior de la fachada, condicionados por su alta inercia, en los que se pueden producir condensaciones.
- En el **periodo de invierno**, el frente de forjado es siempre perdedor. Tras su **rehabilitación por el exterior las pérdidas de calor se ven reducidas a aproximadamente la mitad**. Cuando la temperatura de consigna interior se mantiene a 20°C, las pérdidas de calor se reducen de 3,5 a 1,2 W/m lineal de fachada.

- El movimiento del aire en cámara ventilada está más condicionado por el viento que por la radiación solar.
- La temperatura del aire en la cámara puede llegar a estar 10°C por encima de la temperatura exterior en los días con radiación elevada. Esta diferencia de temperaturas, en 8 metros de fachada podría llegar a crear una diferencia de tiro del orden de 3Pa, equiparable a la presión ejercida por una velocidad de viento no perturbado de 2 m/s.
- De los test de puerta soplante antes y después de la rehabilitación, no se observa una mejora en la estanqueidad tras la rehabilitación, si bien estos datos no se pueden extrapolar a la rehabilitación integral de todo el conjunto de fachada.

A tenor de los resultados obtenidos en las campañas experimentales con este sistema de fachada ventilada, expuesta a vientos moderados, podría decirse que es un buen sistema para reducir la demanda de refrigeración, pero para reducir la demanda de calefacción, posiblemente incrementar el espesor del aislamiento de la fachada tiene un mayor efecto.

ÍNDICE CONTENIDOS

0-	RESUMEN EJECUTIVO.....	1
1-	ENCUADRE.....	1
2-	OBJETO.....	2
3-	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL.....	3
3.1-	CONFIGURACIONES DE LA FACHADA OESTE EN LAS TRES FASES DE LA SECUENCIA DE FACHADAS.....	4
3.2-	FACHADA DE CALIBRACIÓN.....	5
3.3-	DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO.....	7
3.4-	FACHADA VENTILADA.....	9
4-	CAMPAÑA EXPERIMENTAL: DISEÑO Y RESULTADOS.....	12
4.1-	DISEÑO.....	12
4.1.1.	Medida de infiltraciones de aire.....	13
4.1.2.	Medida termográfica.....	13
4.1.3.	Medidas de las variables físicas de control del escenario.....	13
4.1.4.	Medida de la energía aportada por el sistema de climatización.....	20
4.1.5.	Medida de las variables meteorológicas.....	21
4.2-	REALIZACIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL Y RESULTADOS CON LA FACHADA DE DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO (A REHABILITAR) Y LA DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO Y LA FACHADA VENTILADA (SOLUCIÓN REHABILITADA).....	22
4.2.1.	Secuencia de las consignas de climatización con la doble fábrica de ladrillo.....	22
4.2.2.	Secuencia de las consignas de climatización con la fachada ventilada.....	23
4.2.3.	Medida de infiltraciones de aire.....	24
4.2.3.1.	Medida de infiltración con la doble fábrica de ladrillo.....	24
4.2.3.2.	Medida de infiltración con la fachada ventilada.....	25
4.2.4.	Medida termográfica.....	26
4.2.5.	Representatividad de las medidas de las variables físicas en el elemento de fachada.....	29
5-	RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA FACHADA DE DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO ANTES Y DESPUÉS DE SU REHABILITACIÓN CON UNA FACHADA VENTILADA.....	34
5.1-	COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS DE CALOR UNIDIMENSIONALES A TRAVÉS DE LA FACHADA. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	34
5.2-	COMPORTAMIENTO DE LOS FLUJOS DE CALOR BIDIMENSIONALES POR LOS FRENTES DE FORJADO.....	37
5.2.1.	Comportamiento de las temperaturas superficiales en los frentes de forjado.....	39

5.2.2.	Modelización de los puentes térmicos.....	41
5.3-	DINAMISMOS EN LA CÁMARA VENTILADA DE LA FACHADA VENTILADA.	43
6-	CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS FLUJOS A TRAVES DE LA FACHADA.....	47
6.1-	PARÁMETROS DINÁMICOS DE LA FACHADA DE DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO	49
6.1.1.	Parámetros térmicos de la doble fábrica de ladrillo aplicando el método de promedios.	51
6.1.2.	Parámetros térmicos dinámicos de la doble fábrica de ladrillo calculados con el <i>modelo CTSM de caja gris</i>	52
6.1.2.1.	RCR _{S1-S4} DFL: modelo equivalente de muro superficie interior - superficie exterior(S1-S4) para la doble fábrica de ladrillo	52
6.1.2.2.	Modelo equivalente S1-Exterior.....	54
6.1.2.3.	Modelo equivalente interior-exterior	55
6.2-	PARÁMETROS DINÁMICOS DE LA FACHADA DE DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO REHABILITADA CON UNA SOLUCIÓN SATE DE FACHADA VENTILADA.	56
6.2.1.	Parámetros térmicos de la de la solución de rehabilitación con fachada ventilada aplicando el método de promedios.....	59
6.2.1.1.	Modelo superficie S1-S5 con los datos empíricos de la FIS1.....	62
6.2.2.	Modelo equivalente Tint-Text.....	63
7-	CONCLUSIONES	64

1- ENCUADRE

El objeto del proyecto D es la evaluación fachada ventilada como solución de rehabilitación en la climatología del País Vasco mediante su caracterización dinámica del comportamiento térmico y la evaluación experimental de la eficiencia energética.

Se trata de estudiar mediante experimentación la mejora del comportamiento térmico de la fachada y de una zona, que emula la habitación de un edificio residencial construido antes de los años 80, tras ser rehabilitada con una solución de fachada ventilada. Estudiando por independiente el efecto de la eliminación de los puentes térmicos y la mejora de la propia envolvente por otro.

En lo que respecta la mejora de comportamiento térmico, la rehabilitación energética de edificios con actuaciones por el exterior contribuyen generalmente a

- Disminuir la transmisión de calor por la propia fachada
- Disminuir la transmisión de calor por los puentes térmicos de frente de forjado.
- Una posible reducción del nivel de infiltraciones con el exterior de la zona

Por lo que el estudio se ha planteado en dos fases:

- Caracterización de la situación anterior a la rehabilitación, incluyendo
 - Caracterización **térmica del cerramiento**
 - Evaluación de las **pérdidas** a través de una **fachada de doble fábrica ladrillo** característica de los edificios susceptibles de ser rehabilitados.
 - Evaluación de las **pérdidas** de calor por los **frentes de forjado** y el resto de los elementos del edificio.
- Caracterización de la situación tras la rehabilitación con la solución de fachada ventilada, incluyendo:
 - la caracterización **térmica de la fachada ventilada** incluido su estudio en altura.
 - Evaluación de las **pérdidas a través de la fachada** tras su rehabilitación con la solución por el exterior en el transcurso de un año
 - Evaluación de las pérdidas de calor por los **frentes de forjado** y el resto de los elementos del edificio.

Para ello, se han abordado sendas campañas experimentales en PASLINK y KUBIK, con objeto de desarrollar **un modelo** que permita el cálculo de la mejora de la eficiencia energética en el transcurso **de un año** ante distintas condiciones climáticas.

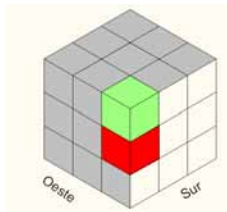
Dado que la experimentación en KUBIK está diseñada específicamente para este proyecto y ha requerido de la modificación física del edificio, previa a la campaña experimental en KUBIK se ha realizado una fase inicial de calibración o Test ϕ acorde con la resolución del programa ERAIKAL 12: 2010 con fecha 30/12/2010, cuyos resultados se recogen en el informe "E0: Calibración de la plataforma experimental KUBIK" con fecha de mayo del 2012.

2- OBJETO.

Se trata de estudiar **mediante experimentación** la idoneidad de la fachada ventilada como solución de rehabilitación para la climatología del País Vasco. Estudiando por independiente:

- El efecto sobre los flujos térmicos de la fachada
- El efecto sobre los flujos en los puentes térmicos de frente de forjado

Y determinar los aspectos a considerar para la correcta ejecución y caracterización de las fachadas ventiladas



Así este estudio se ha focalizado en estudiar **mediante experimentación**, los flujos característicos por los elementos de fachada y puentes térmicos antes y después de la rehabilitación de una solución de fachada de **doble fábrica de ladrillo** con una solución de rehabilitación por el **exterior de fachada ventilada** en el régimen de **calefacción** predominante de la climatología de la CAPV. Los resultados se recogen en el apartado 5.1 y 5.2.

Así mismo y con objeto de estudiar los dinamismos en la fachada ventilada e identificar los aspectos para la correcta caracterización de la fachada ventilada, se han analizado el **efecto del viento**, la **radiación solar** y la **temperatura en los dinamismos** de la cámara de aire a partir de los **datos empíricos** de las campañas experimentales. Los resultados se recogen en el apartado 5.3.

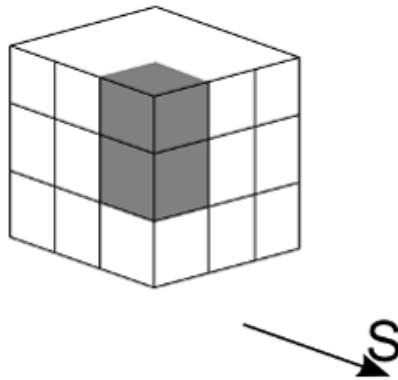
Por otra parte, se ha llevado a cabo una **caracterización dinámica** de las fachadas con objeto de obtener los **parámetros característicos** de los cerramientos reales (resistencia o transmitancia y capacitancia), de forma que permita el estudio del comportamiento de dicho elemento ante otras condiciones climáticas o valores de consigna en el interior de los edificios.

Para ello, los elementos de fachada y frente de forjado se han expuesto a condiciones climáticas exteriores y se han monitorizado aquellos factores que afectan al comportamiento (condiciones exteriores e interiores) y respuestas de los cerramientos ante dichas excitaciones (las variables de control). Para más detalle véase el apartado correspondiente con el diseño y ejecución de la **campana experimental**.

A partir de los datos de **monitorizaciones** y usando **herramientas de tratamiento de datos** (Excel, RStudio, Voltra) se han obtenido los datos dinámicos de los elementos de estudio, independizándolas de las zonas climáticas y el marco temporal. Para más detalles véase el apartado 6.

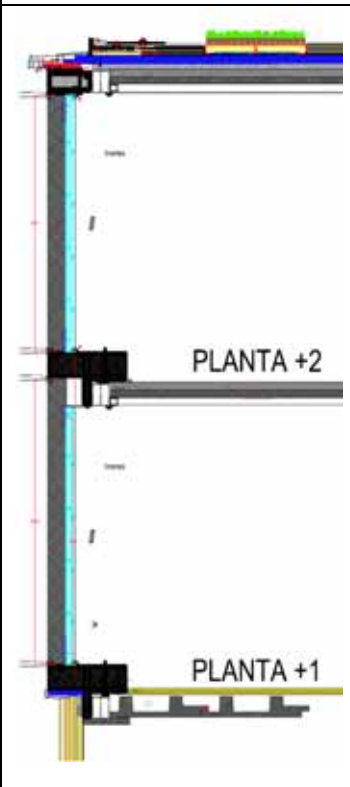
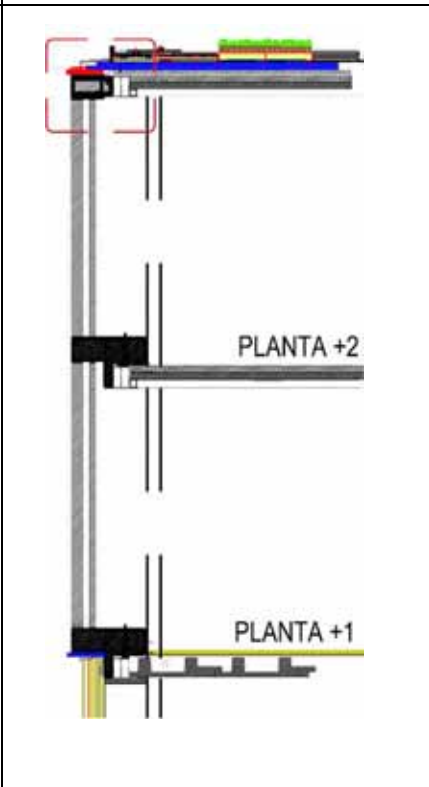
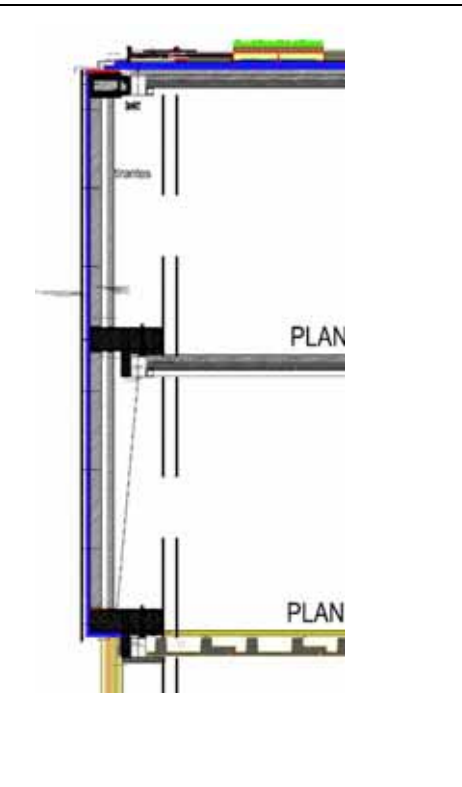
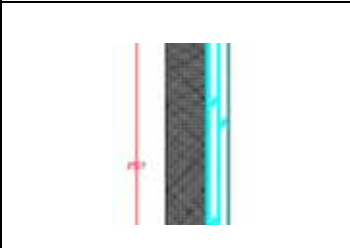
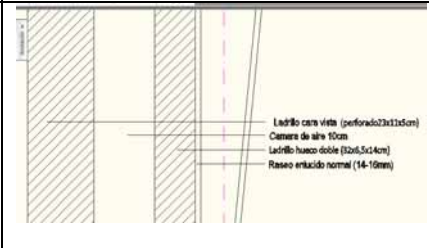
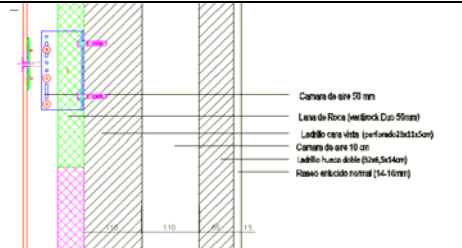
3- CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El estudio llevado a cabo ha tenido parte de su actividad en el edificio KUBIK by Tecnalia. Planteando la experimentación en dos celdas en vertical en la esquina Suroeste del edificio con objeto de estudiar el comportamiento de la fachada ventilada en altura y la eliminación de los puentes térmicos de frente de forjado.



3.1- Configuraciones de la fachada oeste en las tres fases de la secuencia de fachadas.

Tabla 1. Secuencias de los montajes experimentales en la fachada Oeste de las celdas F1S1 y F2S1

Fachada de calibración	Fachada de doble fábrica de ladrillo	Fachada ventilada sobre doble fábrica de ladrillo
		
	 <p>Ladrillo cara vista (perforado) 23x11x5cm Cámara de aire 10cm Ladrillo hueco doble (2x) 6,5x14cm Raseo enlucido normal (14-16mm)</p>	 <p>Cámara de aire 70 mm Lana de Roca (verlock) D=50mm Ladrillo cara vista (perforado) 23x11x5cm Cámara de aire 10 cm Ladrillo hueco doble (2x) 6,5x14cm Raseo enlucido normal (14-16mm)</p>
<p>Composición: 20 cm de panel sándwich PU 10 cm de XPS</p>	<p>Composición: 11cm caravista perforado 10 cm cámara de aire 7 cm ladrillo hueco doble 1,5cm raseo enlucido</p>	<p>Composición: 1 cm plaqueta cerámica 5 cm de cámara de aire ventilada 5 cm de lana de roca 11cm caravista perforado 10 cm cámara de aire 7 cm ladrillo hueco doble 1,5cm raseo enlucido</p>
<p>$U_{teórica} = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<p>$U_{teórica} = 1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<p>$U_{teórica} = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>

3.2- Fachada de calibración

Se trata de una fachada muy aislante, con una transmitancia de aproximadamente $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, donde además de la fachada, se ejecutan tres vigas de hormigón, (forjados de la planta primera y segundo y techo de la segunda) que simulan los frentes de forjado de los edificios de estructura de hormigón. Esta fase tiene como objetivo el estudio de las pérdidas por los frentes de forjado y la afección del resto de cerramientos y de la estructura a la demanda de la celda. Las denominadas "fachadas de calibración" son paneles sándwich con espesor de 200 mm a las que se han adherido 2 paneles de XPS de 5 cm de espesor.



Figura 1. Ejecución de la fachada de calibración y de las tres vigas que simulan los frentes de forjado de los edificios de estructura de hormigón en Junio de 2011.

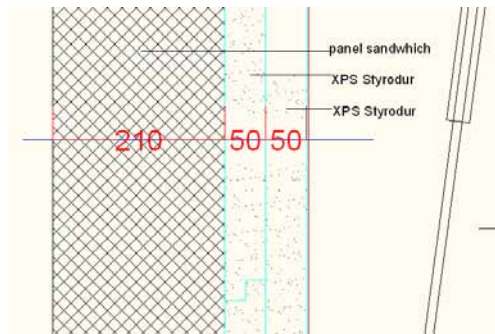


Figura 2. Figura 1 : Detalles de la sección en alzado de la fachada de calibración "as built"

Tabla 2. Tabla 1. Detalle en planta de la solución muy aislante o de calibración ejecutada en la fachada oeste de las celdas F1S1 y F2S1 de KUBIK.

Capa	Espesor	Conductividad	Resistencia	Transmitancia
	(mm)	(W/mK)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Panel sandwich	210	0,032	6,5	
XPS	50	0,03	1,67	
XPS	50	0,03	1,67	
Total panel sandwich	310		9,93	0,10

3.3- Doble fábrica de ladrillo

La fachada de doble fábrica de ladrillo y cámara de aire sin aislar ejecutada en la segunda fase, -Junio 2012-, es una fachada característica del parque de viviendas de la CAPV construido entre los años 60 y 80, con bajos estándares de eficiencia energética, y que son en la actualidad susceptibles de ser rehabilitados.

La fachada es una doble fábrica de ladrillo con cámara de aire sin aislar. La hoja exterior es una ladrillo caravista, mientras que la hoja interior está constituido por ladrillo doble hueco y enlucido de mortero.



Figura 2 : Levante de la doble fábrica de ladrillo con cámara de aire sin aislar en la fachada oeste en dos celdas en altura.

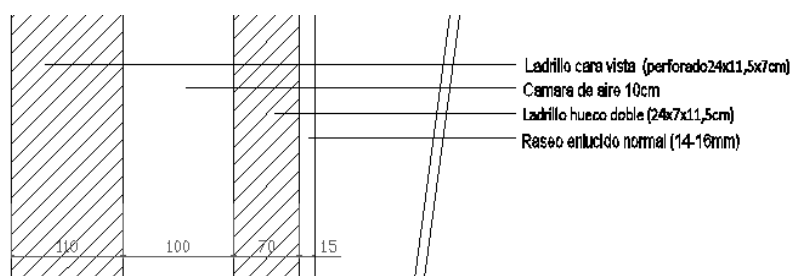


Figura 3. Figura 3 : Detalles de la sección en alzado de la doble fábrica de ladrillo "as built"

Tabla 3. Detalle en planta de la solución muy aislante y fachada ventilada ejecutada en la fachada oeste de las celdas F1S1 y F2S1 de KUBIK.

Capa	Espesor	Resistencia	Transmitancia
	(mm)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Ladrillo caravista ½ pie perforado (24x11,5x7cm) con junta de mortero	110	0,21	
Cámara de aire	100	0,18	
Tabique de ladrillo hueco doble (24x7x11,5cm) con junta de mortero	70	0,16	
Raseo enlucido	15	0,01875	
Total doble fábrica ladrillo	295	0,57*	1,35**

*Resistencia superficie-superficie

**Transmitancia aire-aire con las resistencias exteriores e interior de 0,04 y 0,13 m²K/W respectivamente.

3.4- Fachada ventilada

La fachada ventilada ejecutada en la tercera fase del proyecto, se trata de una solución de rehabilitación por el exterior utilizada en las actuaciones de rehabilitación del parque de viviendas de la CAPV. Está constituida por una hoja exterior de plaqueta cerámica apoyada sobre perfiles verticales con 5 centímetros de cámara de aire y con 5 centímetros de lana de roca. El conjunto total de doble fábrica de ladrillo y solución de aislamiento por el exterior cumple así el Código Técnico de la Edificación para la climatología de la CAPV, con una transmitancia de 0,57 W/m²K.



Figura 4. Ejecución de la solución de rehabilitación por el exterior con aislamiento, cámara de aire ventilada y plaqueta cerámica.

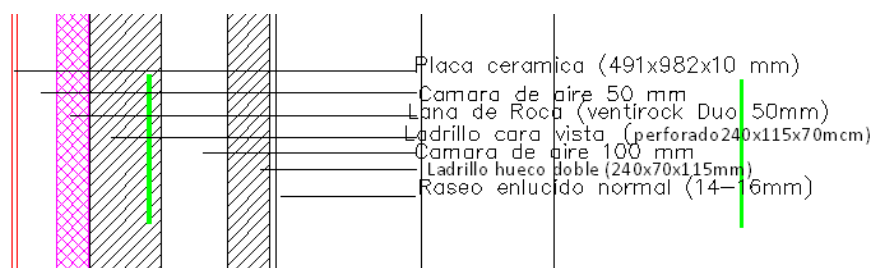


Tabla 4. Detalles de la sección "as built" en alzado de la solución de fachada rehabilitada con fachada ventilada sobre doble fábrica de ladrillo.

Capa	Espesor	Resistencia	Transmitancia
	(mm)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
Placa cerámica (49,1x98,2x1 cm)	10		
Cámara de aire ventilada	50		
Lana de roca ventirock Duo	50		
Ladrillo caravista ½ pie perforado (24x11,5x7cm) con junta de mortero	110	0,21	
Cámara de aire	100	0,18	
Tabique de ladrillo hueco doble (24x7x11,5cm) con junta de mortero	70	0,16	
Raseo enlucido	15	0,01875	
Total doble fábrica ladrillo	295	0,57*	

*Resistencia superficie-superficie



Figura 5. Detalle de los distintos puntos del eje simétrico vertical (marcados en la foto con una X en la imagen de la izquierda) sobre los que se han instalado los sensores de la fachada oeste. Instalación de los sensores que monitorizan la evolución de los parámetros de la solución de rehabilitación.

4- CAMPAÑA EXPERIMENTAL: DISEÑO Y RESULTADOS.

La campaña experimental se diseñó con objeto de obtener los parámetros característicos de los cerramientos ejecutados (resistencia o transmitancia y capacitancia), de forma que permita el estudio del comportamiento de dicho elemento ante otras condiciones climáticas o valores de consigna en el interior de los edificios.

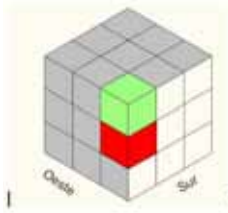
Para ello los elementos a caracterizar (fachada y frente de forjado) se han ejecutado en las infraestructuras experimentales de KUBIK y Passlink) sujetas a condiciones climáticas exteriores y a condiciones internas de temperatura variables.

Se han monitorizado aquellos factores que afectan al comportamiento (condiciones exteriores e interiores) y respuestas de los cerramientos ante dichas excitaciones (las variables de control).

4.1- Diseño

Esta campaña experimental se ha diseñado para la caracterización dinámica de los cerramientos y su afección a la demanda de calefacción de las celdas. Para ello se han llevado a cabo cinco tipos de medidas:

- La medida de la **estanqueidad al aire** en las zonas de estudio, mediante el ensayo de la puerta soplante (test blower door), para evaluar el nivel de infiltraciones.
- La medida **termográfica** de las particiones interiores y de las fachadas, para evaluar cualitativamente las características térmicas de dichas superficies y la homogeneidad del campo térmico.
- La medida de las **variables físicas** de control del experimento en cada una de las zonas de estudio. Estas son las siguientes: la temperatura superficial de paredes interiores, techo, suelo y frentes de forjados (interiores y exteriores); la temperatura del aire a varias alturas respecto del suelo, la temperatura radiante, la humedad relativa y el flujo de calor a través de las particiones interiores, suelo y techo. Concretamente, se han monitorizado específicamente las celdas objeto de estudio coloreadas en la figura siguiente : F1S1 (color rojo) y F2S1 (color verde)



- La medida de la **energía, de calefacción y refrigeración**, aportada por el sistema de climatización a las zonas de estudio se realiza en base a la medida de la temperatura del agua en la impulsión y en el retorno y la medida del caudal de agua.
- La medida de las **variables meteorológicas** registradas en las dos torres meteorológicas de KUBIK, ubicadas en el jardín y en la cubierta, que proporcionan la información relativa a las condiciones ambientales en el exterior. Las variables meteorológicas son las siguientes: temperatura; humedad relativa; velocidad y dirección de viento; pluviometría; presión atmosférica y radiación solar global, difusa e incidente en cada fachada.

Además de la monitorización específica realizada en las zonas de estudio, el resto del edificio también está monitorizado con sensores que registran: la temperatura superficial de paredes interiores, techo, suelo, vigas, pilares; la temperatura del aire a varias alturas respecto del suelo,

la temperatura radiante, la humedad relativa y el flujo de calor a través de las particiones interiores.

El sistema de monitorización y control de KUBIK está a cargo de la adquisición de datos y del control de las actuaciones que se realizan sobre los subsistemas de climatización, de forma que se almacena la información necesaria para los análisis posteriores. Este sistema de monitorización está compuesto por unos 800 dispositivos entre sensores y actuadores y registra tanto las condiciones externas como las condiciones internas del edificio y las relativas al escenario objeto de estudio. La adquisición de datos se realiza cada segundo y se almacena el valor promedio minutil.

4.1.1. Medida de infiltraciones de aire

La medida de las infiltraciones de aire se ha realizado con la puerta soplante modelo Minneapolis BlowerDoor, cuyo manómetro digital es de la marca The Energy Conservatory, modelo DG 700, nº 60515-107-700E2, con el certificado de calibración nº 68689.



Figura 6. Puerta soplante Minneapolis BlowerDoor

4.1.2. Medida termográfica

Las medidas termográficas se han realizado con las cámaras FLIR Systems AB S65 PAL y LIPS 814, con objeto de evaluar cualitativamente las características térmicas de las superficies de las particiones interiores y de las fachadas y evaluar posibles gradientes de temperatura debido a puentes térmicos.

4.1.3. Medidas de las variables físicas de control del escenario

La medida de las variables físicas de control del experimento en cada una de las zonas de estudio y en el resto del edificio se ha realizado con los sensores específicos para cada una de ellas. Estos sensores están conexonados a elementos de medida (*clamp*) de la casa Beckhoff. En la Tabla siguiente se indica para cada tipo de sensor: la marca, el modelo, la incertidumbre del sensor, el clamp correspondiente y la incertidumbre del clamp.

Tabla 5. Medida de las variables físicas en KUBIK

Sensor				Elemento de medida		
Sensor	Marca	Modelo	Incertidumbre	Marca	Modelo	Incertidumbre
Temperatura superficial	Thermo GmbH	Sensor PT100 2113-1-072 ¹ 2113-1-073 ²	± 0,1 °C	Beckhoff	EL3202-0010	≤ ± 0,1 °C
Temperatura Aire	Thermo GmbH	Sensor PT100 2113-1-074	± 0,1 °C	Beckhoff	EL3202-0010	≤ ± 0,1 °C
Temperatura radiante	Ahlborn	FPA805GTS	± 0,1 °C	Beckhoff	EL3202-0010	≤ ± 0,1 °C
Flujo de calor	Phymeas GbR	Type 7	± 5%	Beckhoff	EL3602-0010	≤ ± 0,05 % of FSV
Humedad relativa	Galltec Mess-und Regeltechnik GmbH	FPC 1/5	±2% rh (5..95% rh at 10...40°C)	Beckhoff	EL3064	≤ ± 0,3 % of FSV
Humedad relativa en la fachada ventilada	Rotronic Hicroclip CS03	CS03	±2% rh (5..95% rh at 10...40°C)	Beckhoff	EL3064	≤ ± 0,3 % of FSV
Velocidad de aire en la cámara ventilada	Schmidt Anemoter	Con fondo de escala de 2,5m/s y 5m/s	± 5%	Beckhoff	EL3064	≤ ± 0,3 % of FSV
Presión diferencia	SETRA	MS3	± 5%	Beckhoff	EL3064	≤ ± 0,3 % of FSV

¹ tipo 1

² Tipo 2 (Heavy Duty)

La relación de sensores utilizados para la monitorización de las celdas y la fachada se presentan en la Tabla siguiente:

Tabla 6. Relación de los sensores colocados en las zonas objeto de estudio.

Celda	Medida	F1	F2	F3
F1S1	Temperatura superficial en las paredes interiores	4	4	4
	Temperatura superficial en el suelo	2	2	2
	Temperatura superficial en el techo	2	2	2
	Temperatura superficial fachada Oeste	2	8	12
	Temperatura superficial frente forjado suelo F1S1 en el interior	2	2	2
	Temperatura superficial frente forjado suelo F1S1 en el exterior	2	2	3
	Temperatura superficial frente forjado suelo F2S1	2	2	3
	Flujo de calor en las paredes interiores	3	3	3
	Flujo de calor en el suelo	2	2	2
	Flujo de calor en el techo	2	2	2
	Flujo de calor fachada Oeste	2	2	2
	Flujo de calor frente forjado suelo	2	2	2
	Temperatura de aire en la celda	3	3	3
	Temperatura radiante en la celda	1	1	1
	Humedad relativa en la celda	1	1	1
	Temperatura de aire en la cámara de aire			2
	Velocidad de aire en la cámara de aire ventilada			1
	Humedad relativa			1
	Presión diferencial entre la cubierta y el forjado de la primera planta			1

Celda	Medida	F1	F2	F3
F2S1	Temperatura superficial en paredes interiores	3	3	3
	Temperatura superficial frente forjado suelo F2S1 en el interior	2	2	2
	Temperatura superficial frente forjado suelo F2S1 en el exterior	2	2	2
	Temperatura superficial frente forjado cubierta F2S1 en el interior	1	1	1
	Temperatura superficial frente forjado cubierta F2S1 en el exterior	2	2	3
	Temperatura superficial fachada Oeste	2	8	12
	Flujo de calor paredes interiores	3	3	3
	Flujo de calor fachada Oeste	2	2	2
	Flujo de calor frente forjado suelo	2	2	2
	Temperatura de aire en la celda	3	3	3
	Temperatura radiante en la celda	1	1	1
	Humedad relativa en la celda	1	1	1
	Velocidad de aire en la cámara de aire ventilada			2
	Humedad relativa en la cámara de aire			1

Para la ubicación de sensores ambientales en el interior del edificio se emplean estructuras denominadas "Tree" que se han equipado con sensores de temperatura de aire a 10cm, 110cm, 170 cm del suelo; sensores de temperatura radiante y de humedad relativa a 110 cm del suelo.

En la figura siguiente, se muestra en "Tree" empleado en la celda F1S1, además de los sensores de temperatura superficial y flujo de calor en los frentes de forjado colocados en el suelo de las celdas F1S1 y F2S1.

Sensores para la medida de variables físicas					
					
Sensor de temperatura del aire	Sensor de temperatura radiante	Sensor de humedad relativa	Sensor de la temperatura superficial en el frente forjado	Sensor temperatura superficial en las particiones interiores	Sensor de flujo de calor

Figura 7. Sensores utilizados para la medida de variables físicas

I

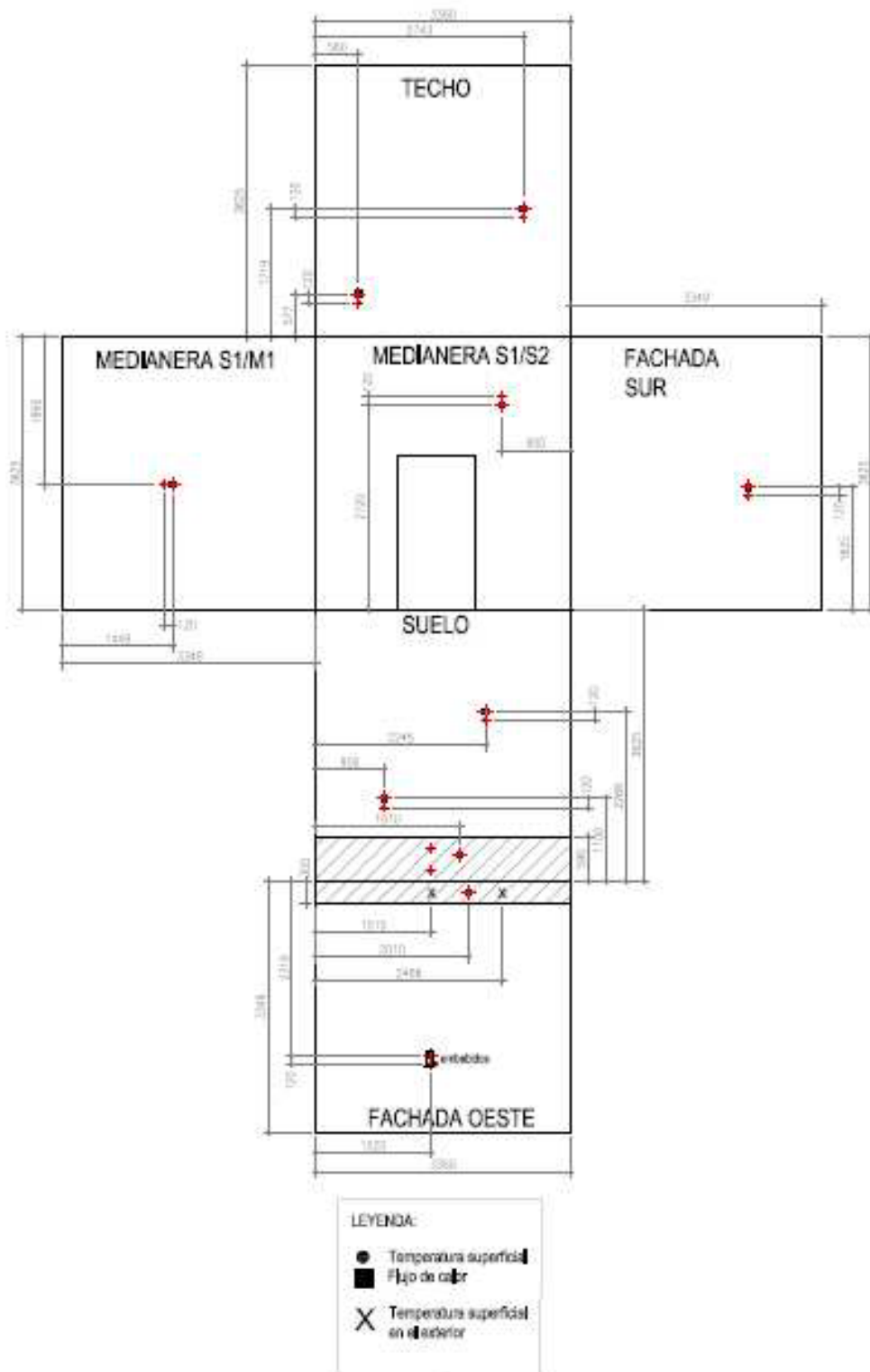


Figura 8. Localización de los sensores de medida en la celda F1S1

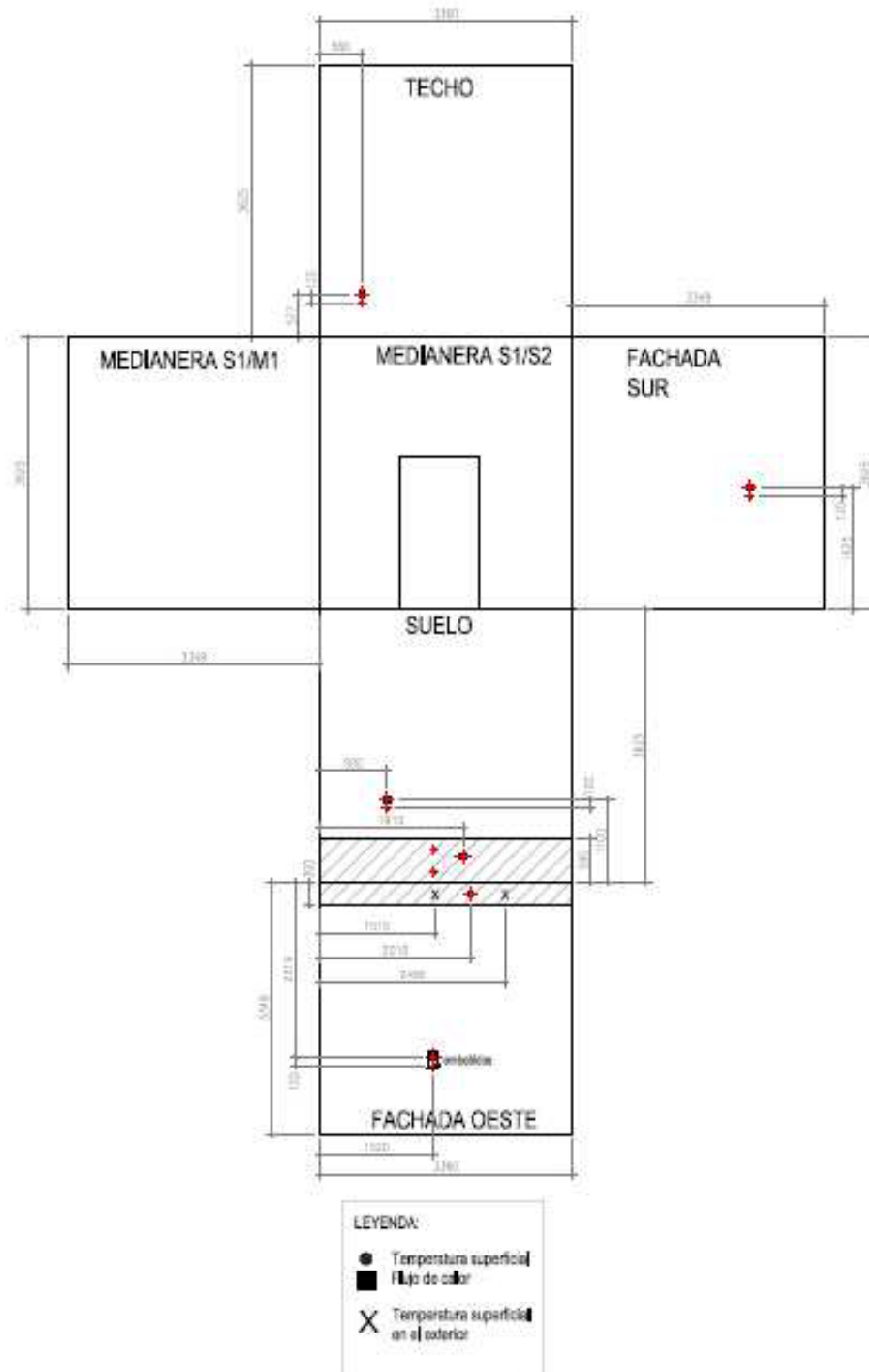


Figura 9. Localización de los sensores de medida en la celda F2S1

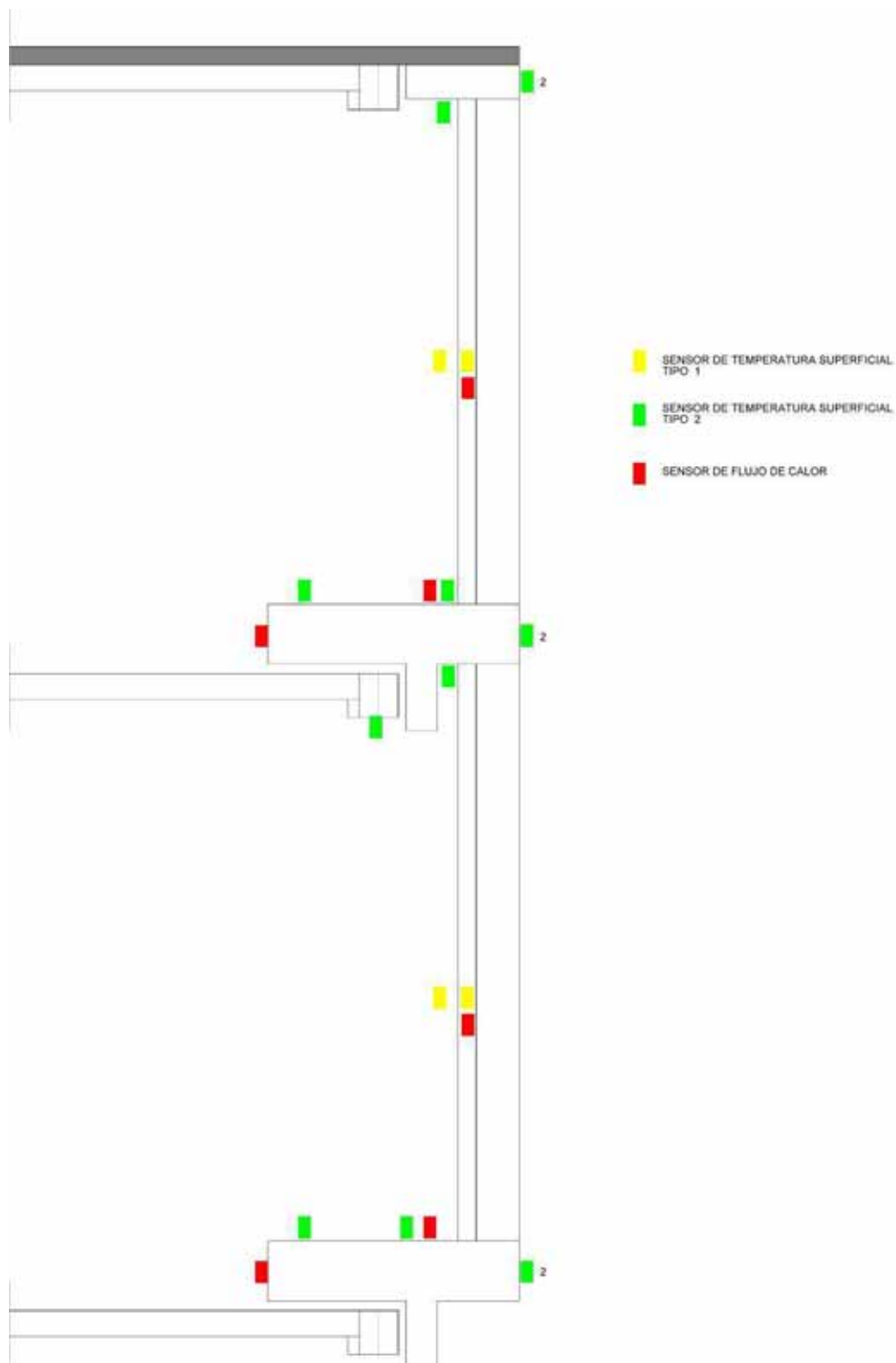


Figura 10. Localización de los sensores en la fachada Oeste y en los frentes de forjado de hormigón.

4.1.4. Medida de la energía aportada por el sistema de climatización

El sistema de climatización de KUBIK está formado por un sistema "todo agua" y un sistema "todo aire". Ambos sistemas, disponen de sus propios subsistemas de distribución, medida y difusión. Por su parte, ambos sistemas son alimentados por un subsistema de generación común.

Para este estudio se ha utilizado el sistema todo agua. Este sistema está compuesto por un subsistema de distribución a 4 tubos, que por medio de las correspondientes bombas y circuitos hidráulicos se encarga de transportar el agua térmicamente tratada desde el subsistema de generación ubicado en el sótano a las plantas, donde se encuentran los elementos de dosificación del agua, hasta los elementos terminales de cada zona térmica, de modo que puede aportar simultáneamente calor a algunas zonas del edificio y frío a otras, en función de las cargas térmicas existentes en las diferentes zonas de estudio.

El sistema de dosificación y medida de energía está diseñado de manera que se puede medir con precisión la energía entregada a cada zona térmica o zona de estudio. El sistema de difusión está compuesto por fancoils.

La medida de la energía, de calefacción y refrigeración aportada por el sistema de climatización a las zonas de estudio, se realiza en base a la medida de la temperatura del agua en la impulsión y en el retorno y la medida del caudal de agua. En la Tabla siguiente se indica las características del sensor de temperatura y del caudalímetro, así como de los clamp Beckhoff correspondientes.

Tabla 7. Medida de la temperatura y caudal en el HVAC

Sensor				Elemento de medida		
Sensor	Marca	Modelo	Incertidumbre	Marca	Modelo	Incertidumbre
Temperatura Agua	Thermo Sensor GmbH	PT100 2133-1-556	$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$	Beckhoff	EL3202-0010	$\leq \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$
Caudal agua	Asea Brown Boveri	FEP311 (DN 8)	$\pm 0,4\%$ valor medido	Beckhoff	EL3112	$\leq \pm 0,3 \%$ of FSV



Sensores para la medida de variables físicas en HVAC	
	
Sensor de medida de temperatura de agua	Caudalímetro

Figura 11. Sensores para la medida de variables físicas en HVAC

4.1.5. Medida de las variables meteorológicas

Se dispone de dos torres meteorológicas: una en el jardín con una estación meteorológica de VAISALA modelo WXT520 que incluye los sensores para la medida de: la dirección y velocidad del viento; humedad relativa; temperatura, presión atmosférica y precipitación y otra en la cubierta con una estación meteorológica de VAISALA para la medida de la dirección y velocidad del viento.

En la cubierta hay 5 piranómetros de la marca Kipp&Zonen y modelo CMP-6, para medir la radiación solar global (en cada fachada y en cubierta) y 1 piranómetro para medir la radiación difusa en cubierta (utilizando el anillo de sombra CM121B).

Medida de variables meteorológicas			
			
Torre meteorológica jardín	Torre meteorológica cubierta	Medida radiación solar difusa	Medida radiación solar global

Figura 12. Medida de variables meteorológicas

4.2- Realización de la campaña experimental y resultados con la fachada de doble fábrica de ladrillo (a rehabilitar) y la doble fábrica de ladrillo y la fachada ventilada (solución rehabilitada)

Las campañas experimentales de la fábrica de ladrillo y fachada ventilada se han ejecutado secuencialmente.

- La doble fábrica de ladrillo se ha llevado a cabo entre Agosto 2012 y Diciembre 2012
- La fachada ventilada se ha llevado a cabo entre Diciembre 2012- Febrero 2013.

Previamente, entre diciembre 2011 y abril 2012 se ha llevado a cabo la campaña experimental de calibración del edificio en el que se ha evaluado la afección de los frentes de forjado y el resto de elementos.

En estas secuencias, las celdas de KUBIK se han sometido a distintas condiciones, principalmente:

- 30°C en invierno- garantizando elevados saltos térmicos entre el interior y exterior, y los flujos hacia el exterior.
- 20°C en verano, otoño e invierno, condiciones de confort de los edificios y,
- Excitaciones puntuales desde el interior

4.2.1. Secuencia de las consignas de climatización con la doble fábrica de ladrillo.

La campaña de medida correspondiente al test con la fábrica de ladrillo comenzó en Agosto del 2012 y finalizó en noviembre 2012. En dicha campaña se han modificado de consignas del sistema de climatización para excitar las celdas F1S1 y F2S1 a distintas condiciones. Asimismo, y durante un periodo comprendido entre 10/10/2012 y 29/10/2012, acotado se ha utilizado una fuente adicional de energía, un convector de 1800W, en el se ha excitado puntualmente la celda con un convector de 1800W.

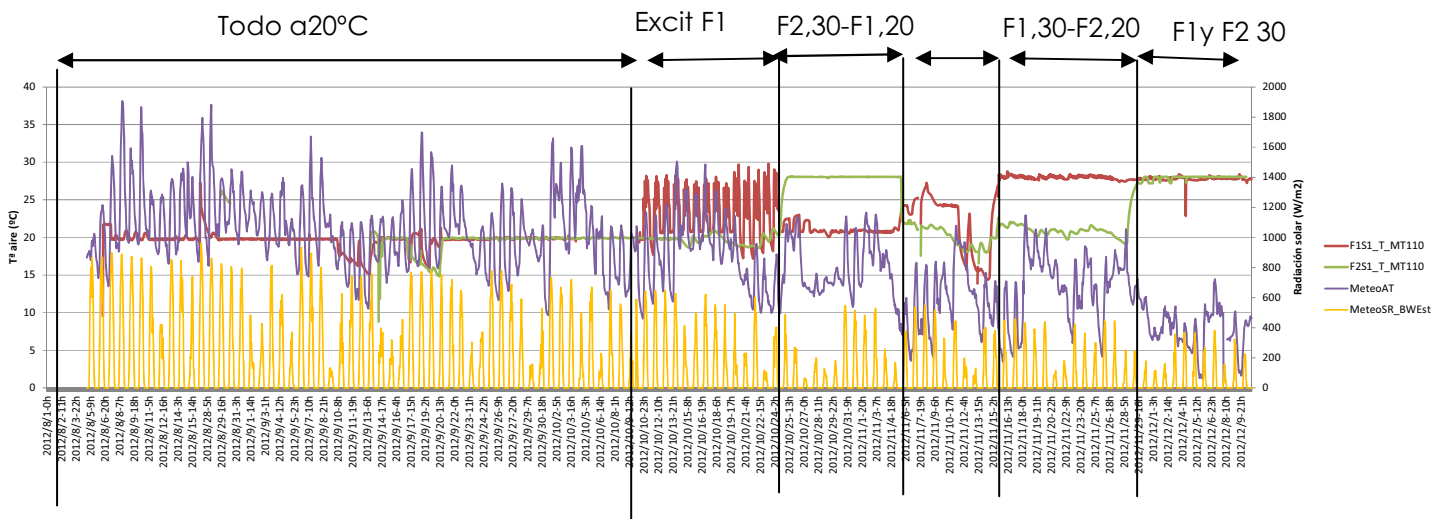


Figura 13. Evolución horaria de la temperatura del aire en las celdas F1S1 (en rojo) y F2S1 (verde), la temperatura del aire exterior y la radiación global en plano horizontal.

Tabla 8. Secuencia de consignas de climatización en KUBIK para la campaña experimental con la doble fábrica de ladrillo.

Fecha inicio	Fecha fin	T° F1S1	T° F2S1	Objetivo principal
5/08/2012	9/10/2012	20°C	20 °C	Estudio de dinanismos en las fachadas oeste
09/10/2012	24/10/2012	Excitaciones 1800W	20 °C	Estudio de dinanismos en las fachadas oeste
25/10/2012	5/11/2012	20 °C	30 °C	Afección del resto del edificio sobre la celda F1S1
14/11/2012	29/11/2012	30 °C	20 °C	Afección del resto del edificio sobre la celda F1S1 y estacionario en fachada oeste F1S1
29/11/2012	18/12/2012	30 °C	30 °C	Estacionario en las fachadas oeste F1S1 y F2S1

4.2.2. Secuencia de las consignas de climatización con la fachada ventilada.

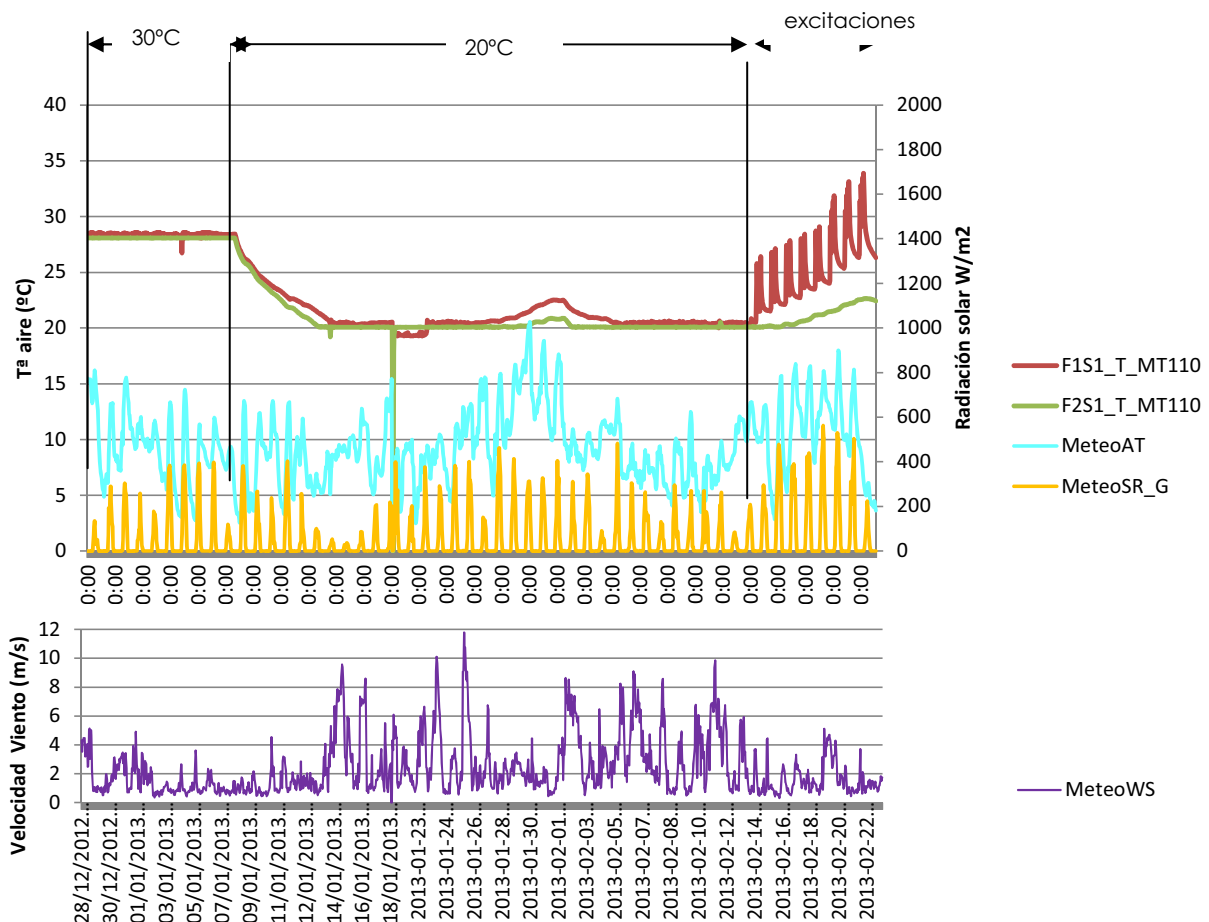


Tabla 1. Secuencia de consignas de climatización en KUBIK para la campaña experimental de la doble fábrica de ladrillo con la solución de rehabilitación.

Fecha inicio	Fecha fin	Tº F1S1	Tº F2S1	Objetivo principal
20/12/2012	06/01/2013	30	30	Estacionario en las fachadas oeste F1S1 y F2S1
09/01/2013	13/02/2013	20	20	Estudio de dinamismos en la fachada
14/02/2013	20/02/2013	Excitaciones de 1800W	30±10	Estudio de dinamismos en las fachadas oeste. Sin forzar el climatización
21/02/2013	28/02/2013	20°C	20°C	Dinamismos de la fachada

4.2.3. Medida de infiltraciones de aire

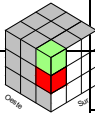
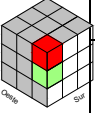
La medida de infiltraciones de aire en las dos zonas objeto de estudio, se ha realizado, antes de comenzar con la campaña de medidas de cada una de las fases y tras finalizar dichas medidas para asegurar que los valores de estanqueidad de la celda no se han modificado.

Los valores y las curvas de cada una de las fases con la solución antes y tras la rehabilitación, son las que se recogen en los apartados siguientes.

4.2.3.1. Medida de infiltración con la doble fábrica de ladrillo

Las tablas siguientes recogen los valores de infiltración obtenidos en las celdas objeto de estudio a 50 Pascales de sobrepresión y depresión de acuerdo a la norma norma UNE-EN-ISO 13829: "Determinación de la estanqueidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador" para la configuración de la doble fábrica de ladrillo:

Tabla 2. Resultados del test BlowerDoor llevado a cabo según la norma UNE-EN-ISO 13829: "Determinación de la estanqueidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador" para la configuración de la doble fábrica de ladrillo

	Despresurización ACH ₅₀	Presurización ACH ₅₀	Promedio ACH ₅₀	Fecha ensayo	Configuración fachada oeste
 F1S1	1,73	1,7	1,71	2012/09/20	doble fábrica de ladrillo
	1,63	1,88	1,75	2012/11/16	
 F2S1	1,42	1,46	1,44	2012/09/17	doble fábrica de ladrillo
	1,55	1,41	1,48	2012/11/15	

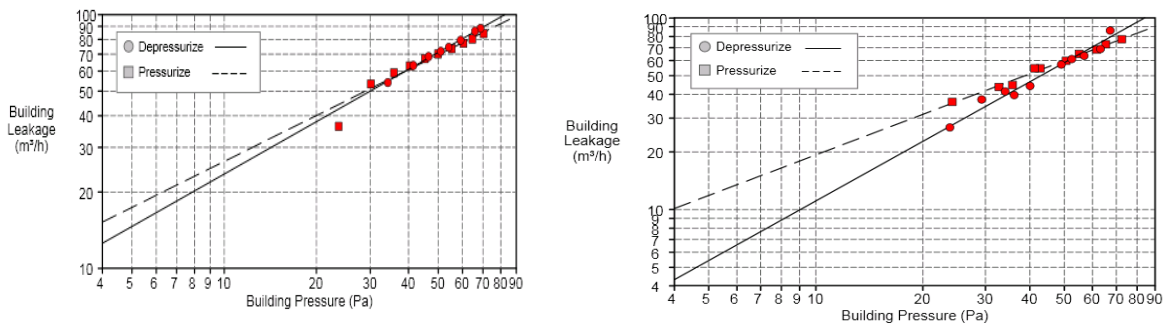
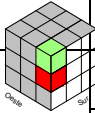
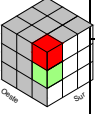


Figura 14. Curvas del nivel de infiltraciones de las celdas F1S1 y F2S1 cuando las celdas están sometidas a distintos niveles de presión y depresión.

4.2.3.2. Medida de infiltración con la fachada ventilada.

Las tablas siguientes recogen los valores de infiltración obtenidos en las celdas objeto de estudio a 50 Pascales de sobrepresión y depresión de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 13829: "Determinación de la estanqueidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador", para la configuración de la doble fábrica de ladrillo con la solución de rehabilitación por el exterior:

Tabla 3. Resultados del test BlowerDoor llevado a cabo según la norma UNE-EN-ISO 13829: "Determinación de la estanqueidad al aire en edificios. Método de presurización por medio de ventilador" para la configuración de la doble fábrica de ladrillo rehabilitada con solución de fachada ventilada

	Despresurización ACH ₅₀	Presurización ACH ₅₀	Promedio ACH ₅₀	Fecha ensayo	Configuración fachada oeste
 F1S1	1,73	1,7	1,71	2012/12/20	fachada ventilada
	2,1	2,04	2,07	2013/02/11	
 F2S1	1,42	1,46	1,44	2012/12/20	fachada ventilada
	1,7	1,6	1,67	2013/02/11	

De los test de puerta soplante antes y después de la rehabilitación, no se observa una mejora en la estanqueidad tras la rehabilitación, si bien estos datos no se pueden extrapolar a la rehabilitación integral de todo el conjunto de fachada, dado que los puntos más débiles son los encuentros de la fachada de ladrillo con las otras fachadas, como se ve en la termografía siguiente tomada en un día de Tª exterior 32°C y temperatura interior 18°C a depresión.

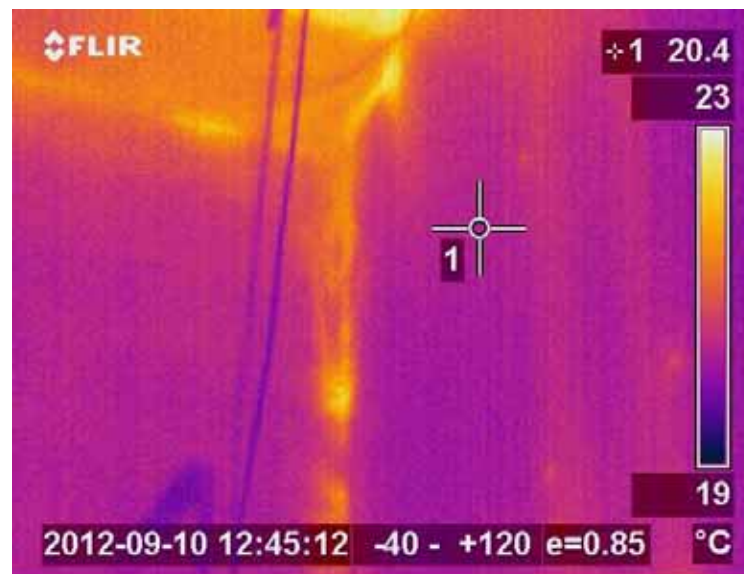


Figura 15. Termografía de encuentro de fachadas tomada en ensayo de depresión para el estudio de infiltraciones con la fábrica de ladrillo.

4.2.4. Medida termográfica

A efectos de analizar cualitativamente la presencia de gradientes térmicos en las superficies de las celdas objeto de estudio, se han tomado termografías en distintos días con objeto de:

- Identificar las pérdidas de calor en las fachadas de los edificios
- Observar el efecto de la fachada ventilada como solución de rehabilitación por el exterior y la eliminación de puentes térmicos de frente de forjado.
- Estudiar la homogeneidad de temperaturas en las superficies interiores de las celdas objeto de estudio.

A efectos de analizar cualitativamente las pérdidas de calor por la de las celdas objeto de estudio, incluidos los frentes de forjado, se han tomado termografías en el interior y exterior del edificio en dos días con diferentes condiciones climáticas: una de verano y otra de invierno, tal y como se recogen en la siguiente tabla.

En las termografías se observa que:

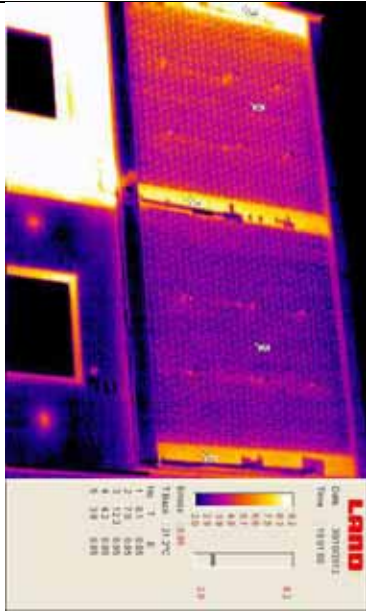

- Desde el **exterior**, los **puentes térmicos** de frentes de **forjado se reducen** y **no** son **perceptibles-salvo**, tal y como se recoge en la termografía del 04/01/2013 con la fachada ventilada. El día que la imagen fue tomada se presentaban saltos térmicos entre el exterior e interior similares al de la termografía del 30/10/2012, sin embargo la imagen tomada desde el exterior en enero no presenta puntos cálidos en los frentes de forjado mientras que son muy visibles en las de octubre.
- Tras la rehabilitación por el exterior, la viga de hormigón de frente de forjado aún presenta saltos térmicos perceptibles (el campo de temperaturas no es homogéneo) en la imagen tomada desde el interior de la celda, si bien estos son de menor orden que en la solución antes de rehabilitar.
- Tras la rehabilitación las pérdidas por la propia fachada se reducen. En la termografía del 04/01/2013 con la fachada ventilada, día que presenta un salto térmico entre el exterior e interior similar al de 30/10/2012, la fachada oeste rehabilitada presenta un color que corresponde con una temperatura aproximada de -2°C y la de la termografía con la solución antes de rehabilitar (tomada el día 30 de octubre) presenta

un temperatura media aproximada de 6°C, debido a una mayor transmisión de calor del interior al exterior de la celda.

- Las fachada oeste pese a estar raseada con 15 mm de mortero, presenta mayores pérdidas de calor por las juntas de mortero, presentando una temperatura ligeramente inferior, tal y como se percibe en la termografía tomada por el interior el 4 de enero.
- El resto de paredes que se han considerado con flujo unidimensional no presentan gradiente térmico salvo en los bordes de las mismas o en el encuentro con otras particiones, como se recoge en las termografías de la fase del test de calibración del informe E0 con fecha de mayo 2012.

Tabla 4. Relación de días en los que se han tomado termografías.

Fecha	Condiciones interiores	Condiciones exteriores
30/10/2012	F1S1 a 20°C y F2S1 a 30°C	Mañana fría a 4°C. Los dos días anteriores 10-15°C sin apenas radiación solar
04/01/2013	F1S1 y F2S1 a 30°C Exterior 4°C	Mañana fría a 4°C. Los dos días anteriores 10-15°C sin apenas radiación solar

Fecha	30/10/2012	04/01/2013
	F1S1 a 20°C y F2S1 a 30°C Exterior 4°C	F1S1 y F2S1 a 30°C Exterior 4°C
Fachada oeste y frentes de forjado, donde las pérdidas de calor son mayores por estos elementos de flanco.		

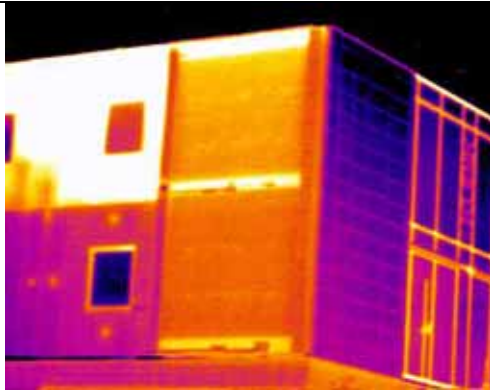
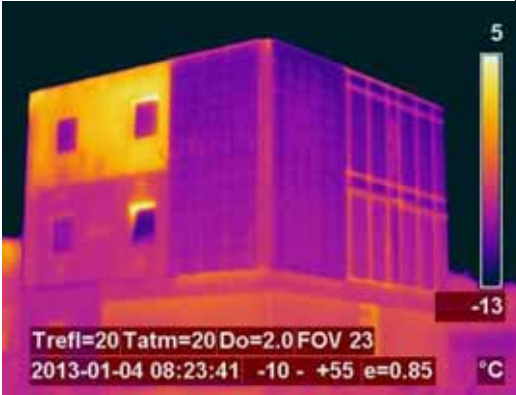
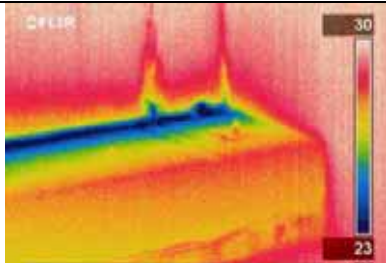
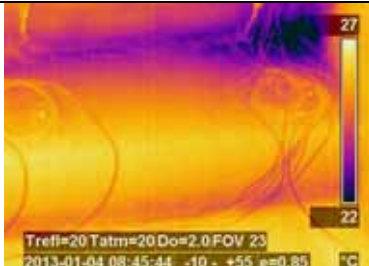
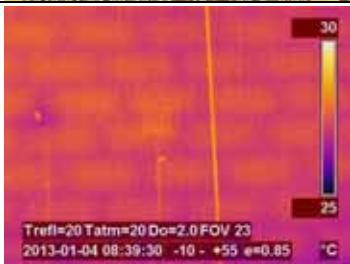
Fecha	30/10/2012	04/01/2013
		
<p>Fachada Oeste y viga de hormigón. Perdida de calor en las vigas másicas de hormigón</p>		
<p>Fachada oeste por interior. Menor temperatura en las juntas</p>		

Figura 16. Termografías en las celdas F1S1 y F2S1 cuando las celdas están sometidas a elevados gradientes térmicos respecto al exterior.

4.2.5. Representatividad de las medidas de las variables físicas en el elemento de fachada.

Como se ha listado en el apartado “4.1.3 Medidas de las variables físicas de control del escenario”, las fachadas oeste se han monitorizado en diversos puntos con la siguiente relación de sensores:

- 4 sensores de temperatura superficial y un fluxómetro en la parte interior de la celda por eje para el caso de la doble fábrica de ladrillo, con dos ejes de medida por celda
- para la solución de rehabilitación 6 sensores de temperatura superficial, uno de temperatura de aire y humedad relativa en la cámara ventilada, con dos ejes de medida por celda y tres anemómetros.

Además en esta última fase, también se han instalado:

- Tres anemómetros para medir la velocidad de aire a distintos alturas en la cámara. La primera en el primer eje de la planta primera (F1E1) y en los dos ejes de la celda superior (F2E1 y F2E2);
- Dos sensores de humedad relativa (F1E1 y F2E2) para determinar la variación del contenido en humedad del aire en el movimiento de aire en la cámara, así como
- Un sensor de presión diferencial entre la parte inferior y superior de la fachada para el estudio del movimiento de aire inducido por las sobrepresiones o succiones que el viento ejerce en las fachadas de los edificios.



Figura 17. Esquema de la posición de los sensores de Temperatura (PT100) y fluxómetros ubicados en cada uno de los dos ejes por celda para medir la variables físicas que caracterizarán el elemento de fachada oeste, una doble fábrica de ladrillo en la fase 2 y doble fábrica de ladrillo y fachada ventilada tras su rehabilitación.

Preliminarmente, en la primera fase o test de calibración, se realizó un estudio para evaluar la representatividad de la medida de la temperatura superficial y el flujo de calor en las particiones interiores, el techo, suelo, fachadas sur y Oeste y frentes de forjado de las celdas objeto de estudio F1s1 y F2S1. Los resultados de dicho estudio junto a la caracterización termográfica indican que dichos parámetros presentan un comportamiento homogéneo en la pared. El estudio abordado se recoge en el informe *E0: Calibración de la plataforma experimental KUBIK* con fecha de mayo del 2012.

De la lectura de los sensores ubicados a distintas alturas de una misma superficie, cabe señalar que:

- **Misma evolución sensores interiores:** Los dos sensores de temperatura superficial interior y flujo de calor colocados en la fachada oeste de las dos celdas siguen la misma evolución. Se presenta una desviación de entorno a 1°C entre el eje inferior y superior cuando la temperatura interior de la celda es superior a 25°C.
- **Lecturas temperatura superficial:** la desviación máxima promedio entre la lectura superficial de los sensores en la superficie exterior es de 0.25°C.
- **Afección del fancoil al eje superior:** Las lecturas de los sensores de temperatura y flujo de los ejes superiores (F1S1_WE2S1 y F2S1_WE2S1) presentan mayor ruido que las del eje inferior (F1S1_WE1 y F2S1WE1), especialmente cuando la temperatura interior es superior a 25°C, cabe esperar que sea debido a una mayor afección del fan-coil en este eje.
- **Sensor con lectura desviada:** La lectura del sensor F1S1_WE2S2 presenta una pequeña desviación respecto al comportamiento esperado.

En las **caracterizaciones dinámicas** se utilizarán los **datos del eje inferior** por no estar afectados por el fancoil, presentando por tanto mayor estabilidad y representatividad de un escenario residencial.

Las gráficas siguientes muestran la evolución de lectura de los 4 sensores (2 ejes por celda x 2 celdas en altura) de temperatura en cada una de las superficies de la fachada oeste en el transcurso de unos días de la campaña experimental de la solución de fábrica de ladrillo en la que la temperatura de ambas celdas se mantiene a $28 \pm 2^\circ\text{C}$.

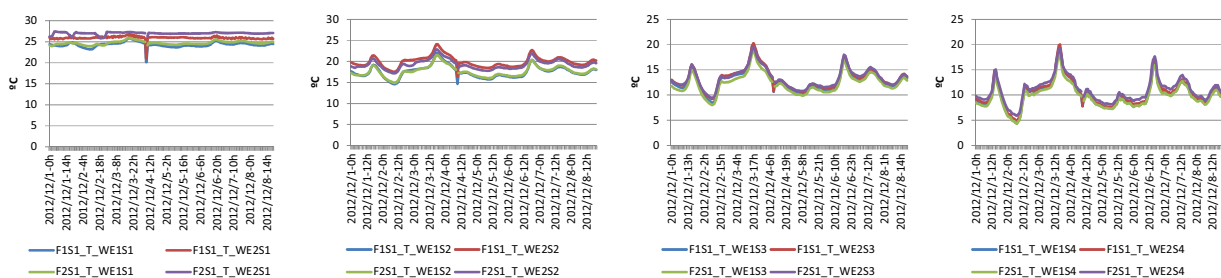


Figura 18. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial en cada una de las superficies S1, S2, S3 y S4 de la doble fábrica de ladrillo (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de ladrillo; y WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

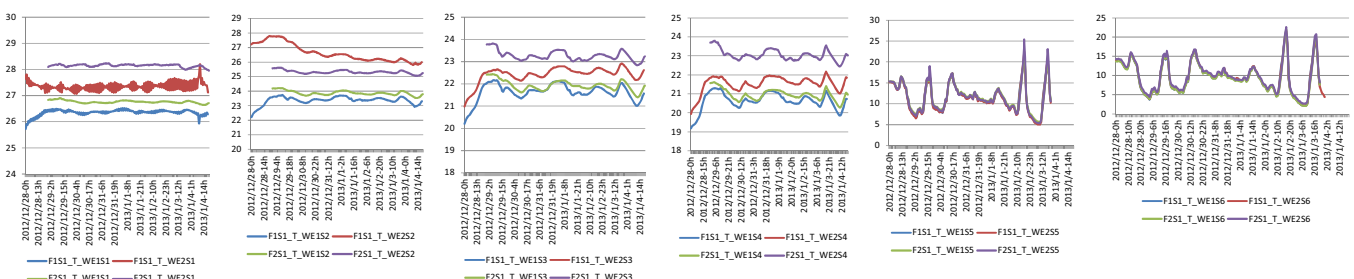


Figura 19. Lectura de los seis sensores de temperatura superficial en cada una de las seis superficies de la fachada rehabilitada (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de ladrillo y S6 la parte interior de la cerámica, y donde WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

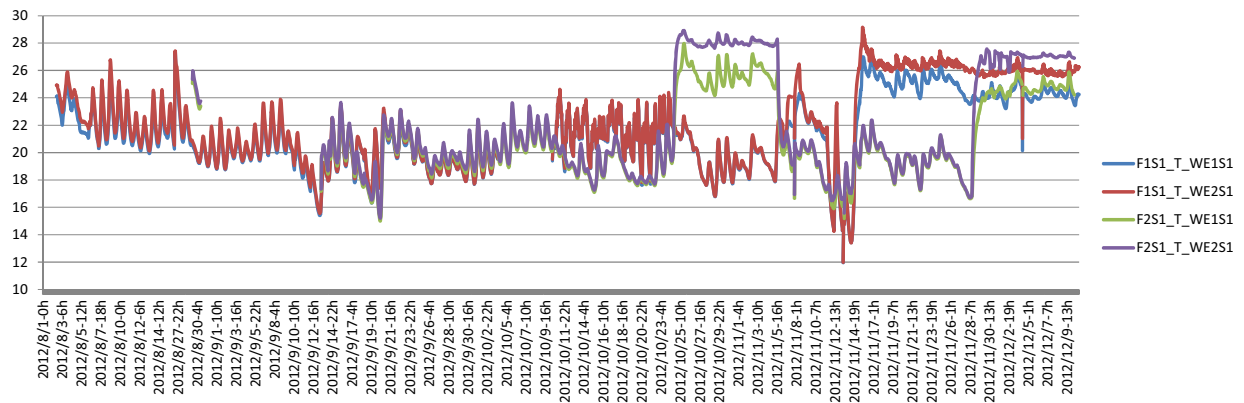


Figura 20. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial interior (S1) de la fachada oeste (F1S1_WE1S1, F1S1_WE2S1, F2S1_WE1S1, F2S1_WE2S1) en el transcurso de la campaña de la fase 2 de doble fábrica de ladrillo (donde WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

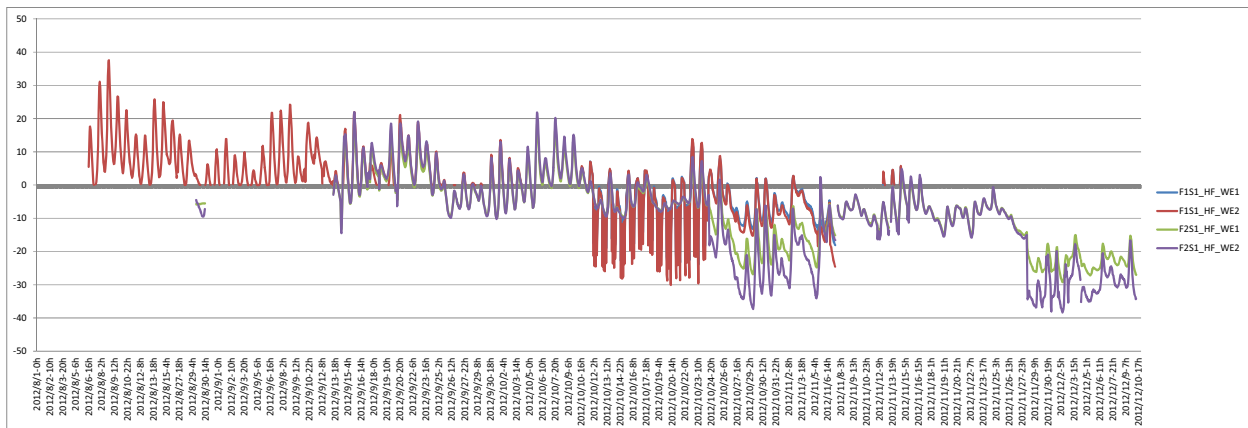


Figura 21. Lectura de los cuatro fluxómetros en la superficie interior de la fachada oeste (WE1S1 y WE2S1) en el transcurso de la campaña de la fase 2 de doble fábrica de ladrillo (donde WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior). Las lecturas positivas representan ganancias hacia la zona, y los negativos pérdidas.

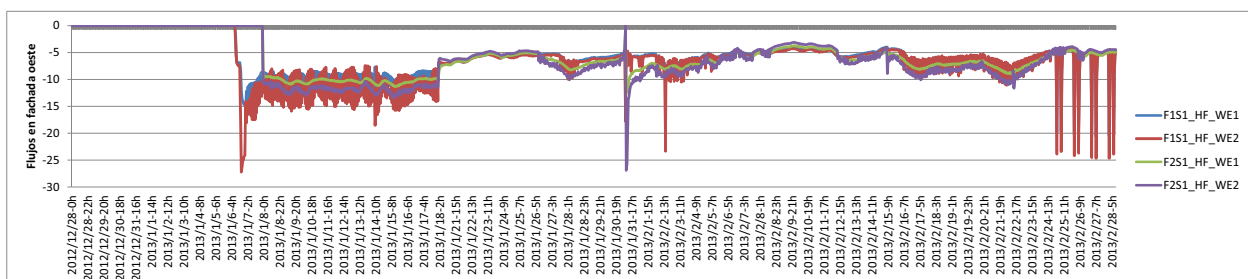


Figura 22. Lectura de los cuatro fluxómetros en la superficie interior de la fachada oeste (WE1S1 y WE2S1) en el transcurso de la campaña de la fase 3 fachada ventilada (donde WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior). Las lecturas positivas representan ganancias hacia la zona, y los negativos pérdidas.

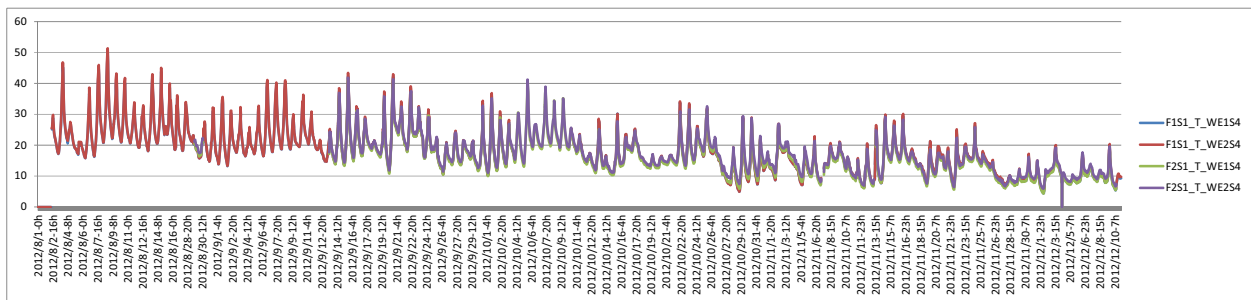


Figura 23. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial (S4) de la fachada oeste (WE1S4 y WE2S4) en el transcurso de la campaña de la fase 2 de **doble fábrica de ladrillo** (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de ladrillo; y WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

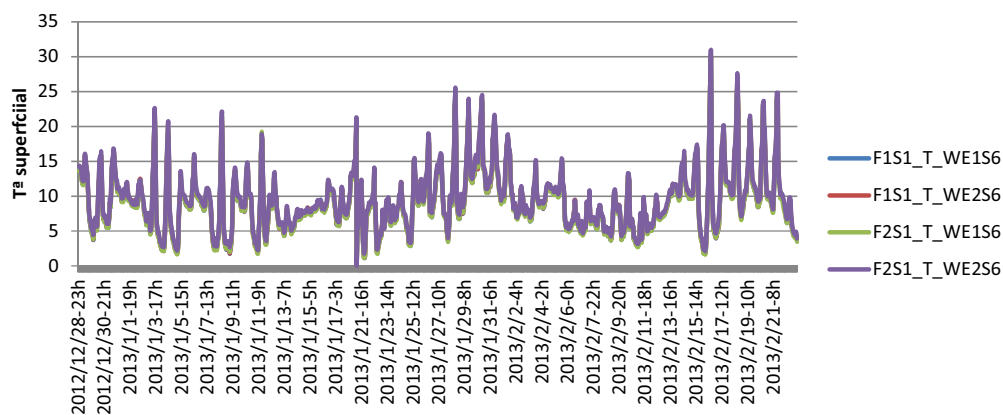


Figura 24. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial (S6) de los cuatro ejes de la fachada oeste, en el transcurso de la campaña de la fase 2 de doble fábrica de ladrillo rehabilitada (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de ladrillo; y WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

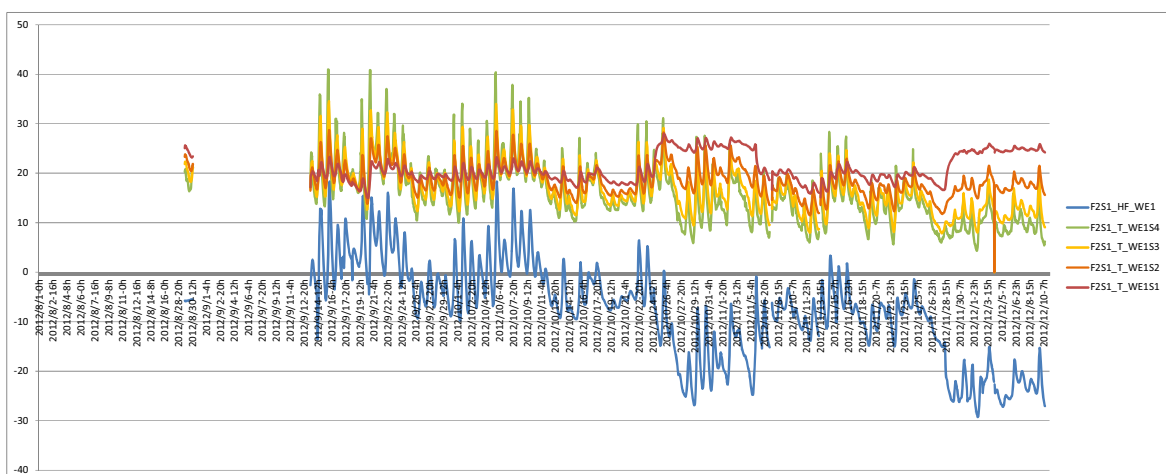


Figura 25. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial (S1, S2, S3, S4) del Eje inferior de la celda F2S1, en el transcurso de la campaña de la fase 2 de doble fábrica de ladrillo (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de

ladrillo; y WE1 representa el eje inferior de la fachada oeste celdas F1 y F2, y E2 el eje superior).

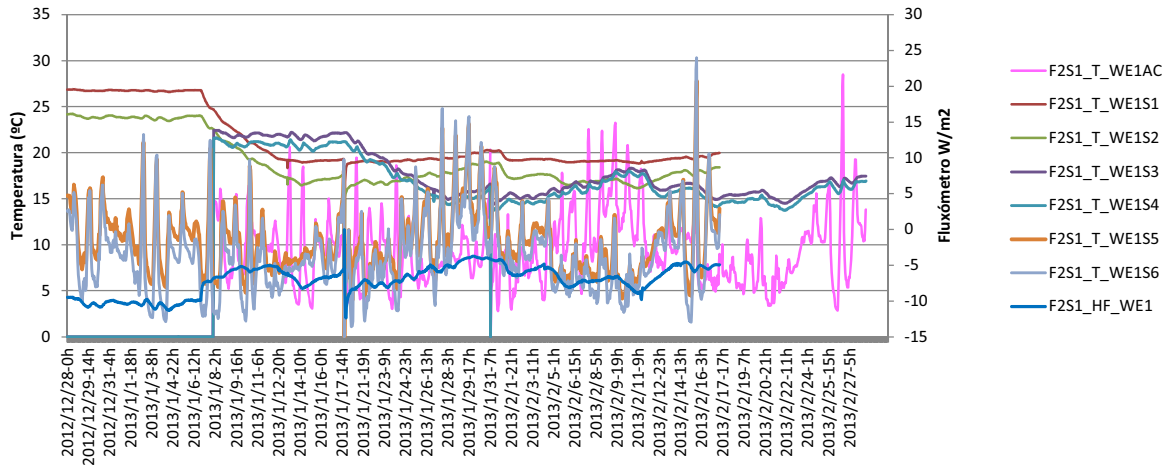


Figura 26. Lectura de los seis sensores de temperatura superficial (S1,S2,S3,S4,S5,S6), de la temperatura de la cámara de aire ventilada (AC) y del fluxómetro situado en el eje inferior de la celda F2S1), en el transcurso de la campaña de la fase 3 de la fachada ventilada (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior de la doble fábrica de ladrillo, S5 la exterior de la lana de roca; y S6 la temperatura de la cerámica).

5- RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA FACHADA DE DOBLE FÁBRICA DE LADRILLO ANTES Y DESPUÉS DE SU REHABILITACIÓN CON UNA FACHADA VENTILADA.

Bajo este apartado se analizan los resultados obtenidos de las medidas llevadas a cabo en el transcurso de las campañas experimentales con la solución de fachada de doble fábrica de ladrillo antes y tras su rehabilitación con una fachada ventilada de junta abierta.

Se ha estudiado lo siguiente:

- (1) la variación de los flujos unidimensionales través de fachada,
- (2) los flujos por los frentes de forjado,
- (3) los dinamismos de la fachada ventilada.

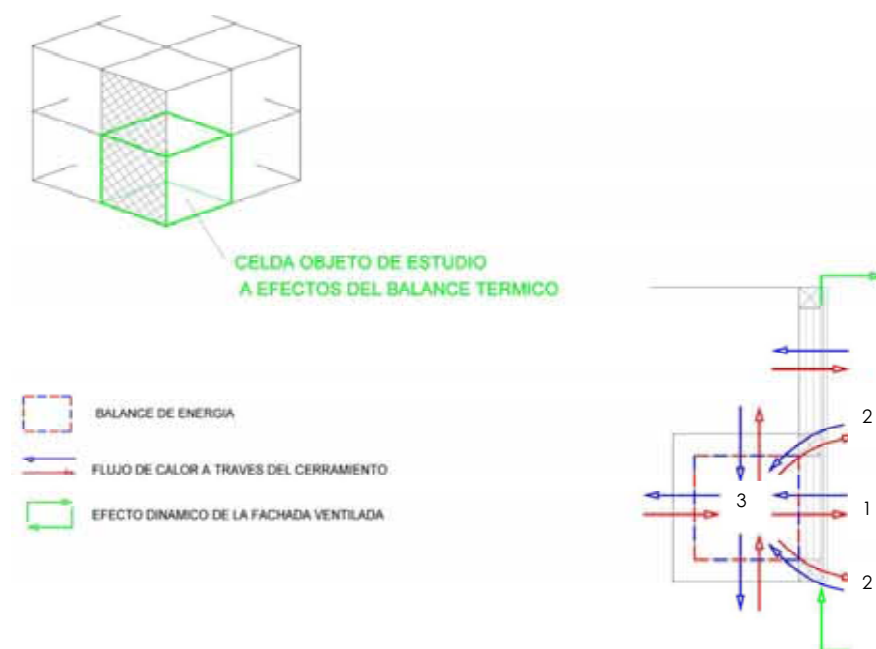


Figura 27. Características de los flujos de energía en la celda objeto de estudio.

5.1- Comportamiento de los flujos de calor unidimensionales a través de la fachada. Resultados experimentales.

En lo que respecta al comportamiento del flujo de calor en la fachada oeste, incluidos los flujos unidimensionales y bidimensionales en los frentes de forjado, los resultados de las campañas experimentales muestran que:

- Durante el **periodo de invierno** con demanda de calefacción, los **flujos** a través de la fachada rehabilitada con una solución de fachada ventilada con 5 cm de aislamiento y 5 cm de cámara de aire se ven **reducidos** a aproximadamente **la mitad** respecto a la solución sin rehabilitar (para más información véanse las figuras y tablas siguientes).

Así, para un salto térmico promedio de 20-21°C entre el exterior e interior (secuencia 5 de la doble fábrica de ladrillo -SDFL-y 1 de la Fachada ven), una doble fábrica de

ladrillo en el clima de Bilbao pierde aproximadamente 22W/m^2 , cuando la fachada ventilada tiene unas pérdidas medias de 10W/m^2 . Con una temperatura de confort **interior de 20°C** , salto térmico entre el interior y exterior diarios de aproximadamente **15°C** , la solución rehabilitada pierde en torno a **6W/m^2** mientras que la doble fábrica de ladrillo, presentaba unas pérdidas de aproximadamente **16W/m^2** .

- Para el periodo de invierno en el que se han llevado a cabo las campañas experimentales, la transmitancia térmica promedio de la doble fábrica de ladrillo es de **$1,1\text{W/m}^2\text{K}$** , mientras que la fachada ventilada se ha comportado como un muro con una transmitancia equivalente aire-aire de **$0,5\text{W/Km}^2$** .
- La variabilidad intradiaria del flujo de calor a través de la fachada es significativa en la solución a rehabilitar (véase la figura siguientes), está oscilación intradiaria es significativamente menor para la fachada ventilada, lo que se traduce en unas temperaturas superficiales interiores más estables. Esta oscilación es mayor
- En verano y a comienzos de otoño, los flujos de calor a través de la doble fábrica de ladrillo presentan **grandes fluctuaciones diarias**, pudiendo llegar a oscilar en más de 20W/m^2 entre el valor máximo ($10\text{--}15\text{W/m}^2$) y mínima ($-5\text{W/m}^2\text{K}$), esto redunda en una mayor fluctuación de la temperatura superficial interior.

Estos resultados se han obtenido de las medidas directas de los sensores instalados en KUBIK. Así las figuras siguientes muestran la evolución de los flujos diarios promedio por la fachada (F2S1_HF_WE1), su amplitud diaria, la evolución de temperatura exterior promedio (T^a exterior) y los a través de los frentes de forjado de la planta primera y la planta segunda (FrForjado 1 y FrFor_F2). Para más información sobre las medidas de las variables físicas de control véase el apartado 4.1.3.

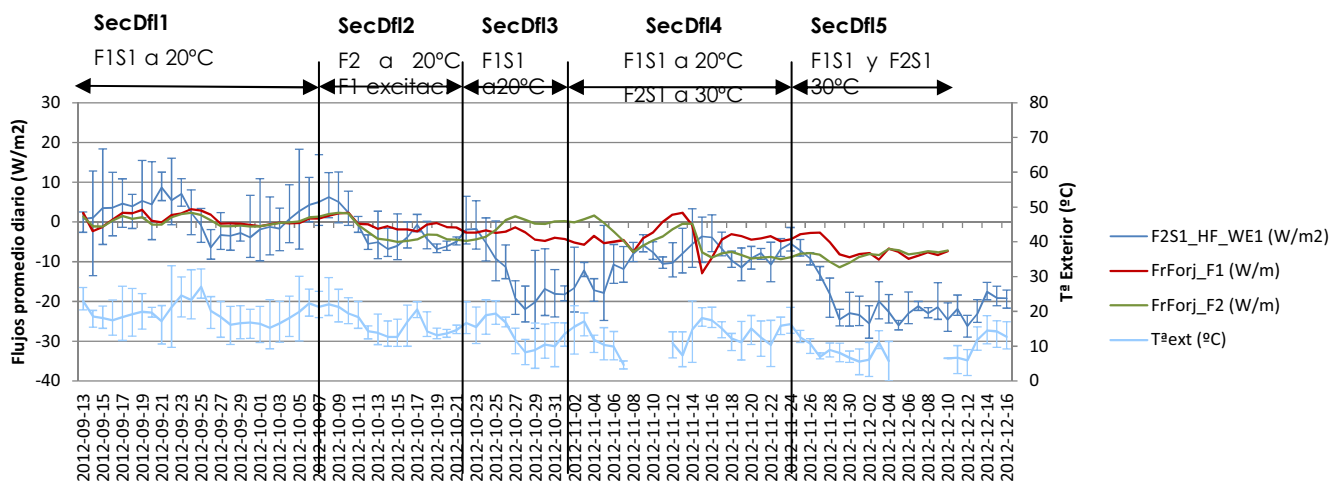


Figura 28. Doble fábrica de la ladrillo en clima de Bilbao: flujos en fachada oeste, incluidos flujos unidimensionales y bidimensionales a través de los frentes de forjado de la planta primera y segunda. Los flujos positivos representan flujos entrantes a la zona acondicionada.

Tabla 5. Secuencias de consignas de climatización en KUBIK para la campaña experimental con la doble fábrica de ladrillo y valores promedios de los flujos unidimensionales a través de la fachada.

Sec.	Fecha inicio - fin	T ^a F1S1	T ^a F2S1	Objetivo principal	HF 1D (W/m ²)	U prom. (W/m ² K)	Amplitud Lectura flujo calor diaria promedio
SecDfl1	5/08/2012-9/10/2012	20°C	20 °C	Dinamismos en fachada oeste	1.30	0.11	5.62
SecDfl2	09/10/2012-24/10/2012	Excit.	20 °C	dinamismos en fachada oeste	-3.85	0.93	7.09
SecDfl3	25/10/2012-5/11/2012	20 °C	30 °C	Afección del edificio sobre F1S1	-16.57	1.10	11.87
SecDfl4	14/11/2012-29/11/2012	30 °C	20 °C	Afección del edificio sobre F1S1	-9.58	1.16	6.70
SecDfl5	29/11/2012-18/12/2012	30 °C	30 °C	Estacionario en las fachadas oeste F1S1 y F2S1	-22.53	5.92	
ValoresPromedio						1.1	7.938

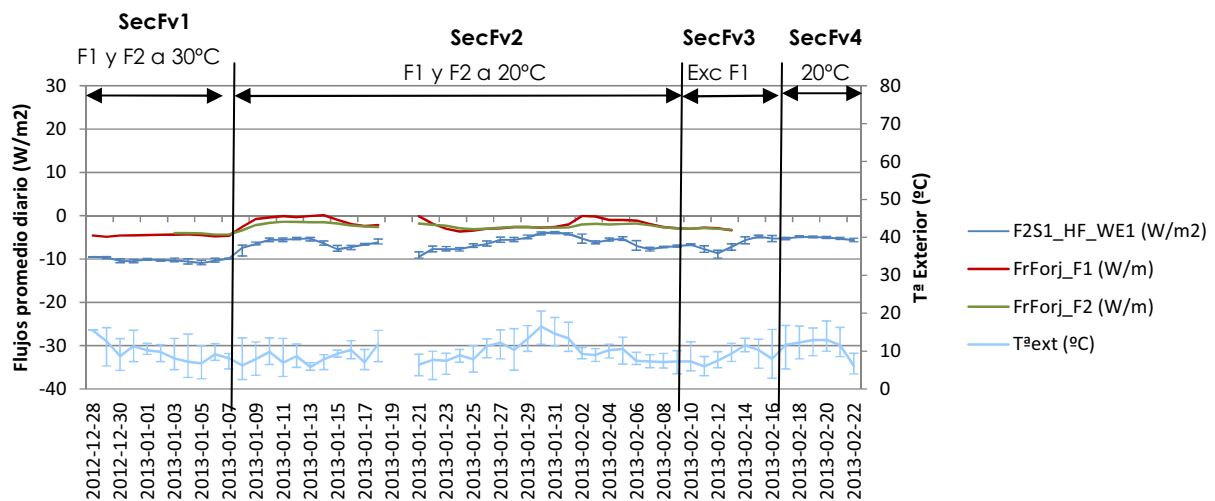


Figura 29. Fachada ventilada en el clima de Bilbao: Flujos por metro lineal de fachada oeste en la celda F1S1 de KUBIK, incluidos flujos unidimensionales y bidimensionales a través de los frentes de forjado de la planta primera y segunda. Los flujos positivos representan flujos entrantes a la zona acondicionada.

Tabla 6. Secuencias de consignas de climatización en KUBIK para la campaña experimental con la fachada ventilada y valores promedios de los flujos unidimensionales a través de la fachada

Sec.	Fecha inicio -fin	T ^a F1S1	T ^a F2S1	Objetivo principal	HF 1D (W/m ²)	U prom. (W/m ² K)	Amplitud HF diaria prom.
SecFv1	20/12/2012-06/01/2013	30	30	Estacionario en las fachadas oeste F1S1 y F2S1.	-10.26	0.57	0.69
SecFv2	09/01/2013-13/02/2013	20	20	Dinamismos en fachada Oeste	-5.77	0.41	0.75
SecFv3	14/02/2013-20/02/2013	Excitaciones de 1800W	30±10	Estudio de dinamismos en las fachadas oeste. Sin forzar el climatización	-5.98	0.46	0.86
SecFv4	21/02/2013-28/02/2013	20°C	20°C	Dinamismos en fachada Oeste	-6.16	0.58	1.02
Valores Promedio						0.503	0.827

5.2- Comportamiento de los flujos de calor bidimensionales por los frentes de forjado

Además de la reducción de los flujos unidireccionales que tienen lugar a través de la fachada, las soluciones continuas de rehabilitación por el exterior reducen las pérdidas a través de los frentes de forjado.

Para el estudio específico de los flujos de calor por los frentes de forjado, se han diseñado y ejecutado tres vigas de hormigón en el forjado de la primera y segunda planta y una viga bajo cubierta que emulan los frentes de forjado de los edificios de estructura de hormigón.



Figura 30. Frentes de forjado en un edificio tipo de fábrica de ladrillo caravista y la fachada oeste de kubik con los frentes de forjado ejecutados.

Los flujos a través de los frentes de forjado presentan un comportamiento bidireccional entre las zonas térmicas que los separan, por lo que las medidas directas en estos elementos no son

representativas para su caracterización directa y requieren de un tratamiento adicional. Este tratamiento de las medidas experimentales se ha llevado a cabo con métodos de diferencias finitas utilizando VOLTRA de Physibel. Esto se debe a que el campo térmico no es homogéneo en estos elementos.

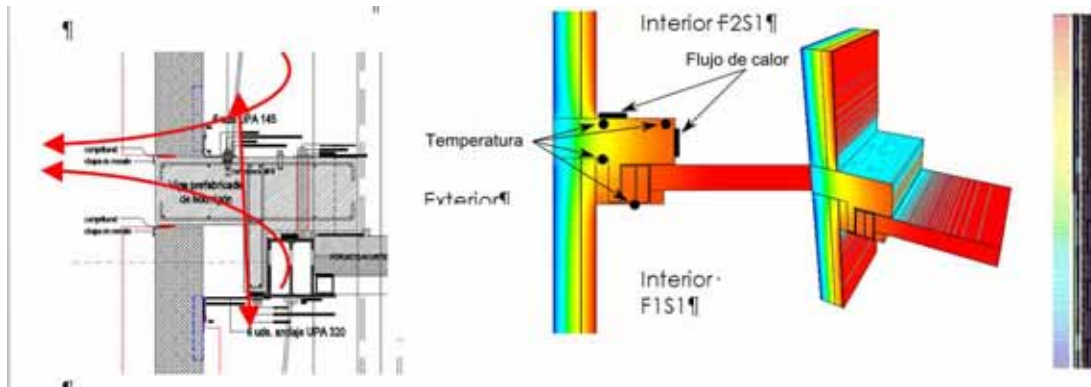


Figura 31. Modelo geométrico, puntos de medida y campo de temperatura instantáneo del elemento de frente de forjado de la planta 2ª.

Una vez tratados los datos de las medidas y obtener las pérdidas de calor por los elementos de flanco, en lo que respecta al comportamiento del flujo de calor en la fachada oeste, los resultados extraídos de esta evaluación se pueden resumir en:

- **Frente de forjado Oeste de la planta 1ª (F1S1w):** en el transcurso de las campañas experimentales, el forjado muestra un comportamiento diferenciado en invierno y en verano.
- En el **periodo de verano** en el clima de Bilbao (agosto y septiembre 2012), los frentes de forjado presentan ganancias y pérdidas hacia la zona inferiores a **0,3 W/m**. Este comportamiento está condicionado a que la constante de tiempo del forjado es superior a un día y la temperatura promedio diaria exterior en este periodo oscila en torno a 20,85°C, similar a la interior, por lo que la fachada presenta un comportamiento estacionario.
- En el **periodo de invierno**, el frente de forjado es siempre perdedor. Tras su **rehabilitación las pérdidas** por los elementos de **flanco** se ven **reducidas a** aproximadamente **la mitad**. Así, con **30°C** en el interior, secuencia en la que se maximizan las **pérdidas**, las pérdidas de calor a través de los frentes de forjado se ven reducidas de **8,2 W/m** (Secuencia 5 DFL) a **4,3W/m** (Secuencia 1 Fachada ventilada). Cuando la temperatura de consigna interior se mantiene a 20°C, las pérdidas se reducen de 3,5 a 1,2 W/m.
- En el conjunto de la fachada de 3,345 metros de altura, las pérdidas por los frentes de forjado representan entorno **al 20% de las pérdidas por metro lineal** y tienen especial importancia por presentar puntos fríos en el interior de la fachada, condicionados por su alta inercia, en los que se pueden producir condensaciones.

Las figuras siguientes presentan la evolución temporal de los flujos en las distintas secuencias de las campañas experimentales de la doble fábrica de ladrillo y la fachada ventilada y representan:

- El flujo por metro lineal unidimensional a través de la fachada Oeste (**Flujo 1D fachada Oeste**) para las dimensiones del modelo al que hacen referencia (3.345 de altura).
- los flujos bidimensionales por los frentes de forjado (FrForjado_F1) y (FrForjado_F2) calculados con a partir del tratamiento de medidas empíricas con el VOLTRA:
- la evolución de temperaturas interior y exterior y su variabilidad intradiaria.

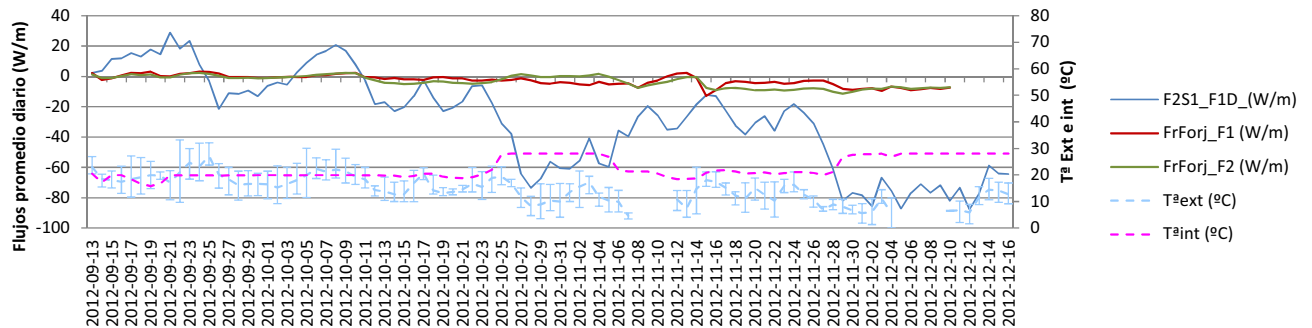


Figura 32. Flujos de calor unidimensionales (F2S1_F1D) por la fachadas y bidimensionales por los frentes de forjado (FrForj_F1 y FrForj_F2), expresados por metro lineal de fachada con la solución de fábrica de ladrillo.

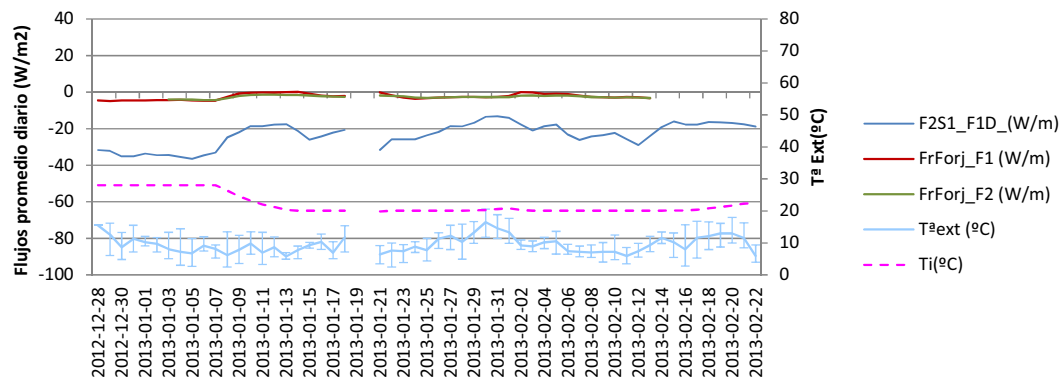


Figura 33. Flujos de calor unidimensionales (F2S1_F1D) por la fachadas y bidimensionales por los frentes de forjado (FrForj_F1 y FrForj_F2), expresados por metro lineal de fachada con la solución de fábrica de ladrillo.

5.2.1. Comportamiento de las temperaturas superficiales en los frentes de forjado.

Condicionados por su alta inercia, los puentes térmicos de frente de forjado tienen especial importancia por presentar puntos fríos en el interior de la fachada tal y como muestran las termografías siguientes. En estos puntos fríos se pueden producir condensaciones superficiales que dan lugar a la formación de mohos y al empeoramiento de la calidad del aire.

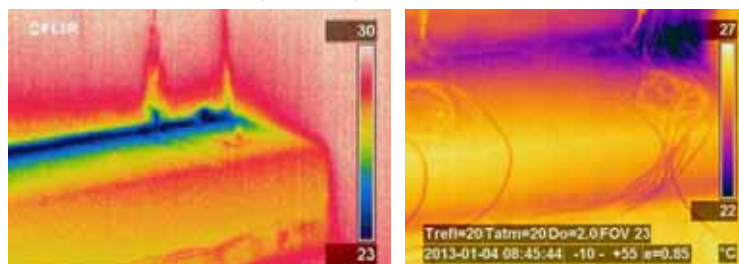


Figura 34. Distribución de temperaturas en el frente de forjado antes (izquierda) y después de su rehabilitación (derecha). Las termografías se han tomado a primera hora de la

mañana en dos días donde la temperatura de la celda se mantiene a 30°C y la exterior es inferior a 4°C (30/10/2012 antes su rehabilitación y el 04/01/2013 tras su rehabilitación).

En este apartado se estudia la evolución de las temperaturas en los frentes de forjado y la posibilidad de formación de condensaciones superficiales de acuerdo a los valores de las campañas experimentales.

Como se puede apreciar en la figura siguiente, **en invierno** y para el clima de Bilbao la temperatura superficial en el frente de forjado en el interior de la vivienda es inferior a la del aire.

Antes de su rehabilitación, este salto de temperaturas entre el aire interior y el punto más frío del frente de forjado, puede llegar a ser de **7°C** cuando la temperatura interior se mantiene a **28°C**. Tras su rehabilitación y para la misma secuencia (temperatura interior 28°C), este salto puede llegar a ser de 5°C, esto puede presentar problemas de condensaciones superficiales especialmente en zonas con mayor generación de humedad.

En el clima de Bilbao, la **temperatura media** del **aire exterior** en el transcurso de la campaña experimental de invierno ha sido de **8,9°C** y su contenido medio en humedad de **74,43%**.

Cuando el aire interior se acondiciona a 20°C, su humedad relativa desciende al 50-55% (lectura de sensores de humedad relativa en KUBIK). Sin embargo las actividades en una residencia que generan humedad pueden hacer incrementar el contenido en humedad. Para garantizar la no formación de condensaciones superficiales que dan lugar a problemas de humedades, la temperatura de los puntos fríos no debiera ser inferior a 14-15°C.

En el transcurso de las campañas experimentales, las temperaturas superficiales de los frentes de forjado tras la rehabilitación se ha mantenido estable entorno a 17° -18°, no habiendo bajado de 16°C. Por lo que en este sentido, podría decirse que la solución de rehabilitación de fachada ventilada con 5 cm de aislamiento para el clima de Bilbao, es **adecuada para evitar la formación de condensaciones superficiales** en el interior dado que la diferencia de temperatura entre el punto más frío y el aire interior a 20°C es de 2,5-3°C.

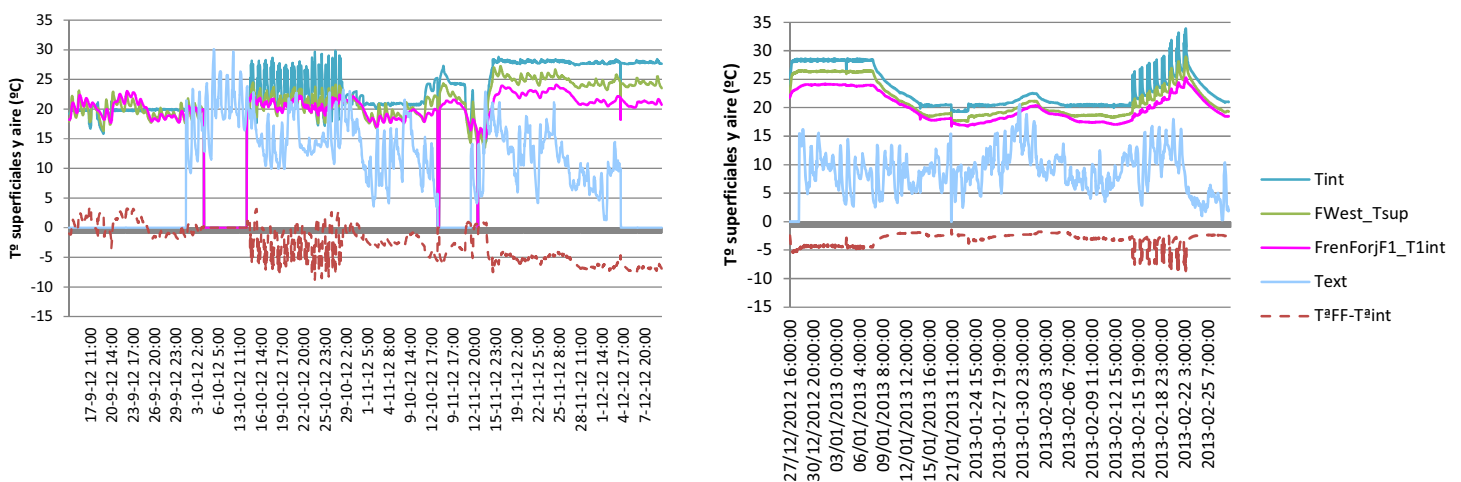


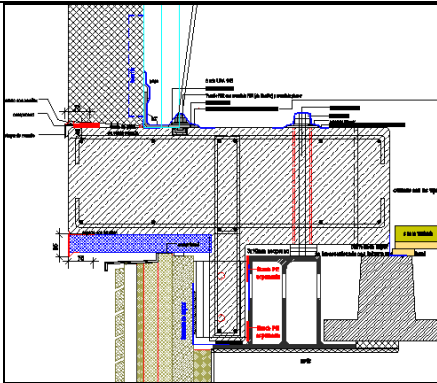
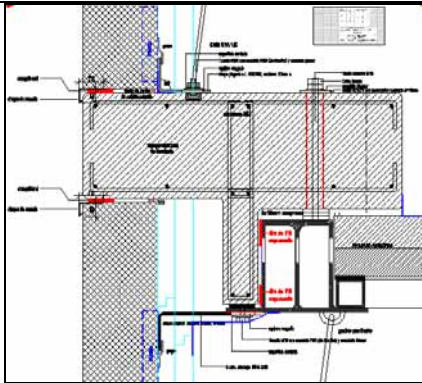
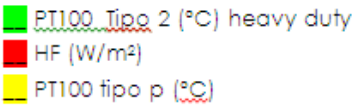
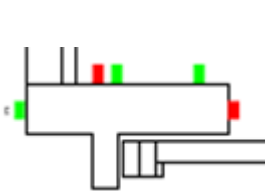
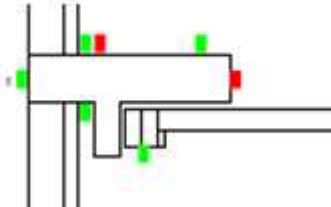
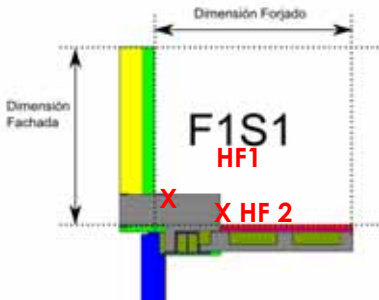
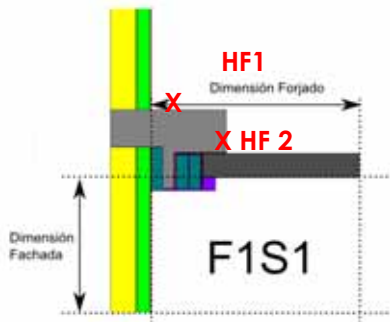
Figura 35. Evolución de las temperaturas interiores superficiales en el frente de forjado y en la superficie de la fachada oeste, y la temperatura del aire interior y exterior.

5.2.2. Modelización de los puentes térmicos.

Como se ha introducido antes, los flujos través de los frentes de forjado presentan un comportamiento bidireccional entre las zonas térmicas que los separan, por lo que las medidas directas en estos elementos no son representativas para su caracterización directa y requieren de un tratamiento adicional.

La correlación de las medidas puntuales de los fluxómetros de las vigas con los flujos de energía entre las zonas adyacentes a través de los puentes térmicos (véase la imagen central de la figura siguiente), se ha realizado con modelos térmico dinámicos para los elementos de flanco objeto de este proyecto, el frente de forjado de la planta primera y el de la planta segunda.

Los modelos térmicos y dimensiones características utilizadas en cada uno de los modelos de frente de flanco se recogen en la figura siguiente:

	Frente de forjado F1S1w	Frente de forjado F2S1w
Detalle constructivo		
Sensores utilizados en su para su caracterización 		
Modelo generado en VOLTRA para la fachada del test ϕ	 <p>Dimension fachada: 1,573 m Dimension forjado: 1,734m</p>	 <p>Dimension fachada: 1.1m Dimension forjado: 1.655m</p>

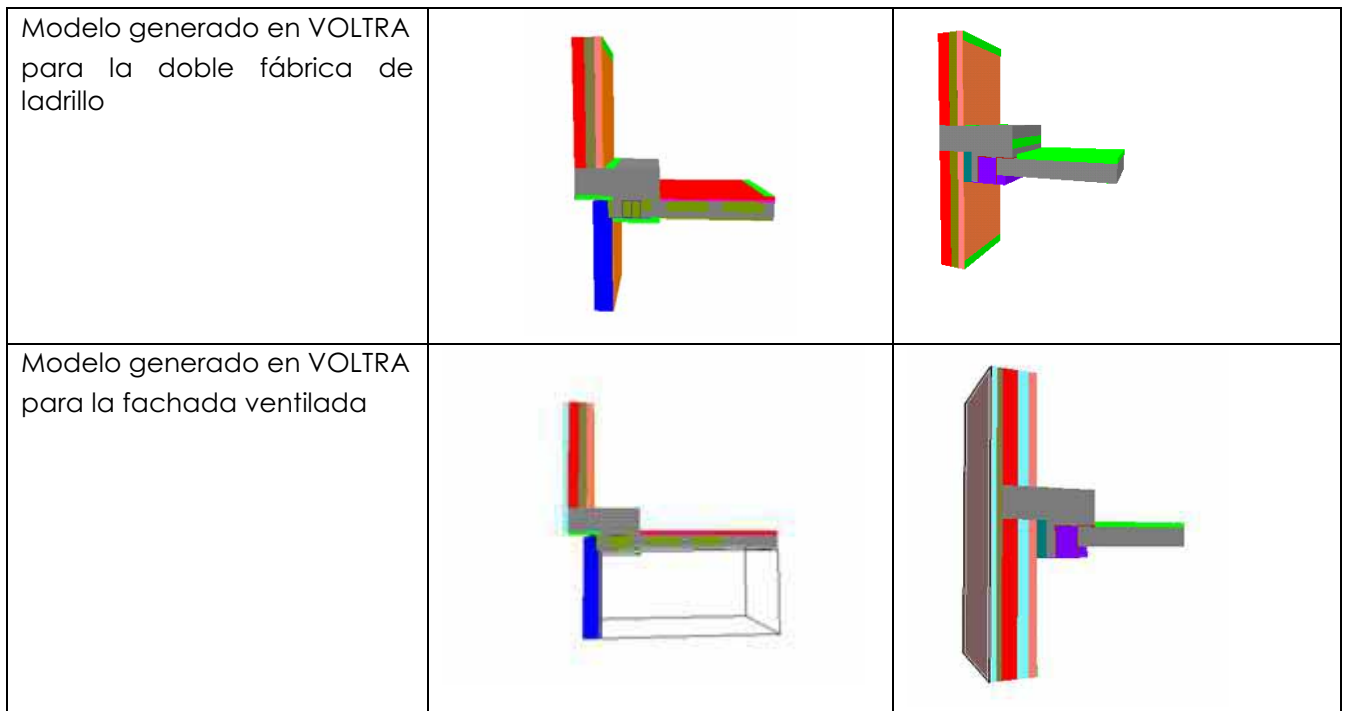


Figura 36. Detalles constructivos de los frentes de forjado diseñados y ejecutados para el estudio de los intercambios de energía de la zona objeto de estudio (F1S1) con las adyacentes; sensores utilizados para su monitorización y ejemplos de los modelos en VOLTRA para correlacionar las lecturas de sensores con las pérdidas de calor de la zona.

Previo al cálculo de flujos de energía, estos modelos se han calibrado con las señales horarias de temperatura y flujos. Los resultados y la metodología de calibración se recogen en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

El modelo se ha considerado calibrado cuando las salidas previstas por el modelo de VOLTRA para los nodos donde se ubican los sensores de temperatura y flujo de calor se correlacionan con la lectura de los fluxómetros y sensores de temperatura de las vigas de las series experimentales utilizadas.

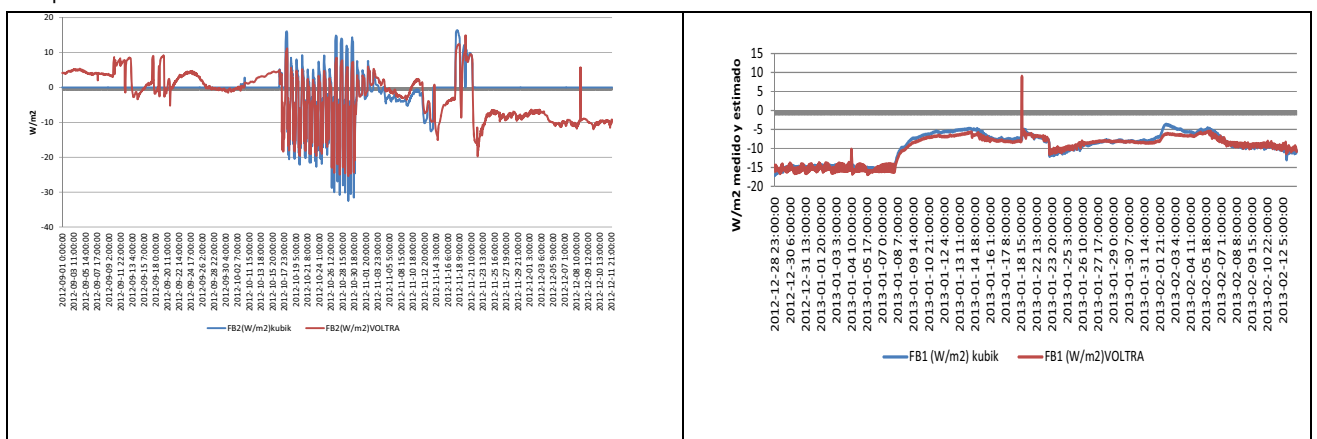


Figura 37. Correlación entre las medidas de flujo y las salidas del modelo de diferencia finitas en el proceso de validación del modelo del puente térmico de frente de forjado de la primera planta antes (izquierda) y después de la rehabilitación (derecha).

El proceso de calibración y la validación de los modelos para la fábrica de ladrillo y fachada ventilada se recogen en un informe específico que se anexa en el apartado **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

5.3- Dinamismos en la cámara ventilada de la fachada ventilada.

La fachada ventilada es un sistema que consta de un revestimiento exterior, una subestructura metálica portante anclada a la superficie del edificio, una capa de aislamiento y una cámara de aire entre el revestimiento y el aislamiento. Esta cámara de aire está ventilada y evacua calor debido al efecto chimenea y al efecto del viento sobre la misma.

En la actualidad el análisis del comportamiento dinámico de la fachada ventilada resulta complejo por dos principales motivos²:

- La poca información relacionada con las fachadas ventiladas
- La falta de herramientas de simulación que contemplen todos los fenómenos que tienen lugar

Así, en general, para evaluar el comportamiento térmico de este tipo de actuaciones se realizan una serie de asunciones en las que las fachadas ventiladas se simulan como un paramento que actúa como (1) elemento de sombreado y que (2) reduce el impacto del viento sobre la fachada.

Por otra parte, y en lo que a régimen estacionario se refiere, el cálculo de la transmitancia térmica equivalente de las fachadas ventiladas de este tipo se lleva a cabo:

- despreciando el efecto de la plaqueta cerámica exterior,
- asumiendo que la temperatura de la cámara es igual al exterior y
- asumiendo que el efecto del viento es bajo, y por tanto la resistencia convectiva radiante exterior es igual a la interior ($0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Por tanto, este apartado se ha focalizado en analizar el **efecto del viento**, la **radiación solar** y la **temperatura en los dinamismos** de la cámara de aire a partir de los **datos empíricos** de las campañas experimentales. Estos datos provienen de la lectura de tres anemómetros a distintas alturas de la cámara vertical, los sensores de temperatura de aire en la cámara, el piranómetro en fachada oeste y los datos de la estación meteorológica.

En el transcurso de la campaña experimental se han medido simultáneamente la velocidad y la temperatura en tres alturas en el interior de la cámara: a 1 metro del arranque de la fachada ventilada (F1E1Av), a 6 metros (F2E1Av) y a 7,5 metros (F2E2Av). Se ha analizado a la evolución de la temperatura y velocidad del aire de la cámara en función de la radiación solar, temperatura y la dirección y velocidad del viento, registrados en la torre meteorológica.

A la vista de los resultados, se puede concluir que:

- La velocidad de aire a la que está sujeta la hoja exterior del aislamiento tras su rehabilitación es de $0,44 \text{ m/s}$ (frente a los $0,67 \text{ m/s}$ antes de su rehabilitación) reduciéndose significativamente el coeficiente convectivo, e incrementándose la **resistencia exterior** en aproximadamente **$0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$**

² F. Patania, Energy and Buildings 42, 2010, 1148.

- El movimiento del aire en cámara ventilada está más condicionado por el viento que por la radiación solar.
- La temperatura del aire en la cámara puede llegar a estar 10°C por encima de la temperatura exterior en los días con radiación elevada. Esta diferencia de temperaturas, en 8 metros de fachada podría llegar a crear una diferencia de tiro del orden de 3Pa, equiparable a la presión ejercida por una velocidad de viento no perturbado de 2 m/s.

En la Figura 38 se presentan los datos registrados en la campaña de medida con fachada ventilada en tres gráficas. La gráfica superior presenta los datos de dirección (azul) y velocidad (rojo) del viento registrados en la torre meteorológica. La gráfica del medio presenta los datos de la velocidad del aire en los tres puntos de la cámara: azul punto inferior, rojo punto intermedio y verde punto superior, de la cámara. Y la gráfica inferior presenta los datos de: la temperatura del aire en los tres puntos de la cámara; la temperatura ambiente (azul claro) y la radiación solar (amarillo).

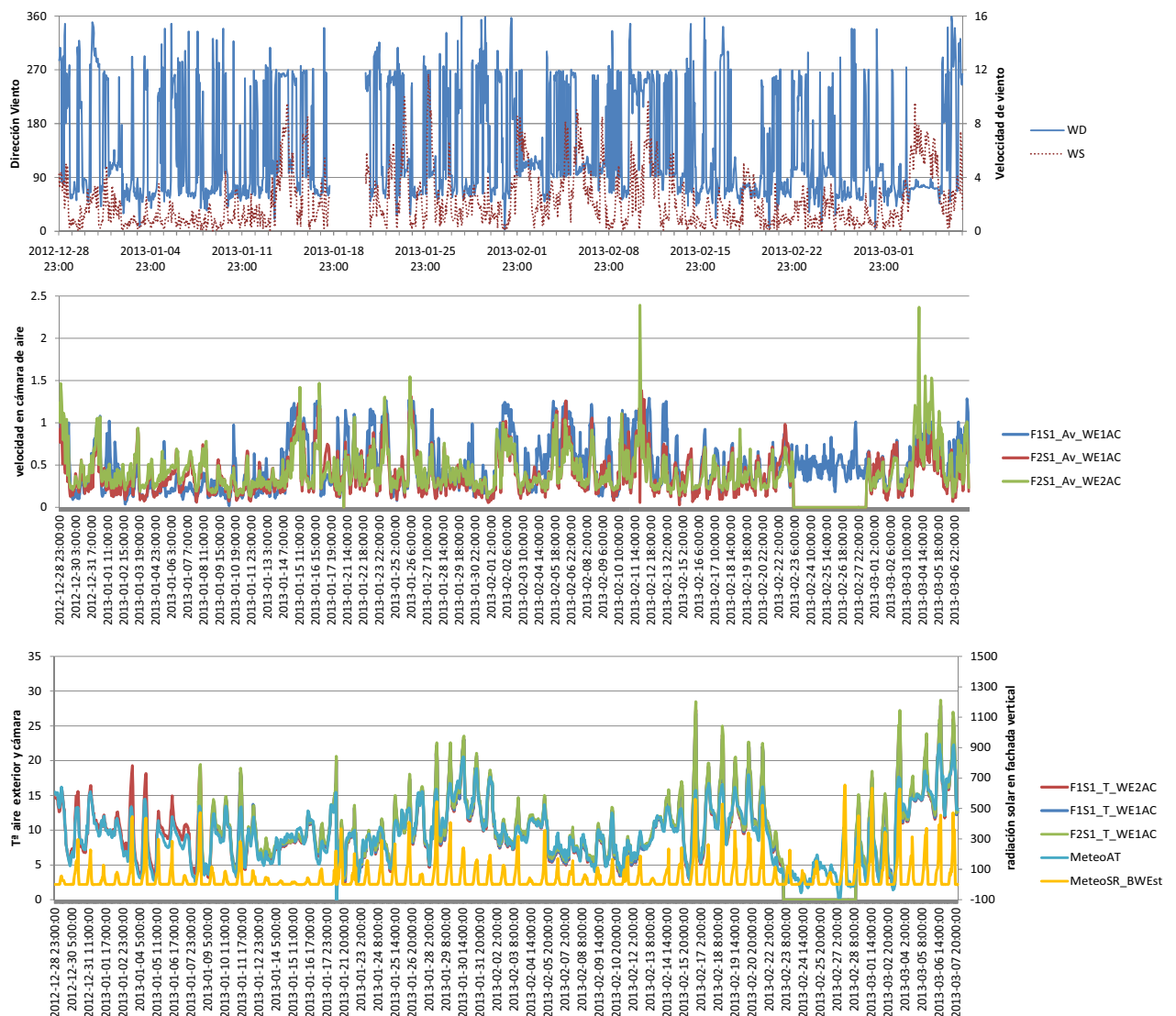


Figura 38. Evolución de la velocidad y dirección de viento imperturbado WS (m/s) y la la velocidad del aire en la cámara a distintas alturas.

En la Figura 39 se presenta la rosa de viento en el periodo de la campaña de medida enero-febrero 2013 a las horas siguientes: 12, 13, 14, 15, 16 y 17, períodos de máxima radiación solar sobre la fachada ventilada (fachada oeste).

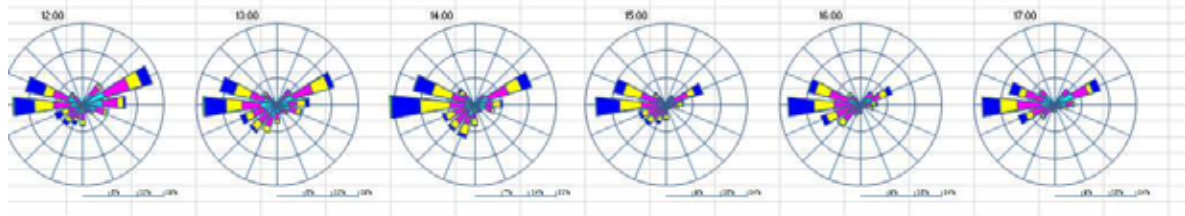


Figura 39. Rosa de viento en la franja horaria con máxima radiación en la fachada oeste, en el periodo enero- febrero 2013.

En la figura siguiente se presentan las velocidades promedio horarias en la cámara ventilada, la velocidad del viento y la radiación y en la Figura 41 las temperaturas promedio horarias en la cámara ventilada, la temperatura ambiente y la radiación solar, en dos días tipo de invierno: viento moderado y baja radiación (Figura izquierda), derrame matinal con acoplamiento al viento en altura y alta radiación (Figura derecha).

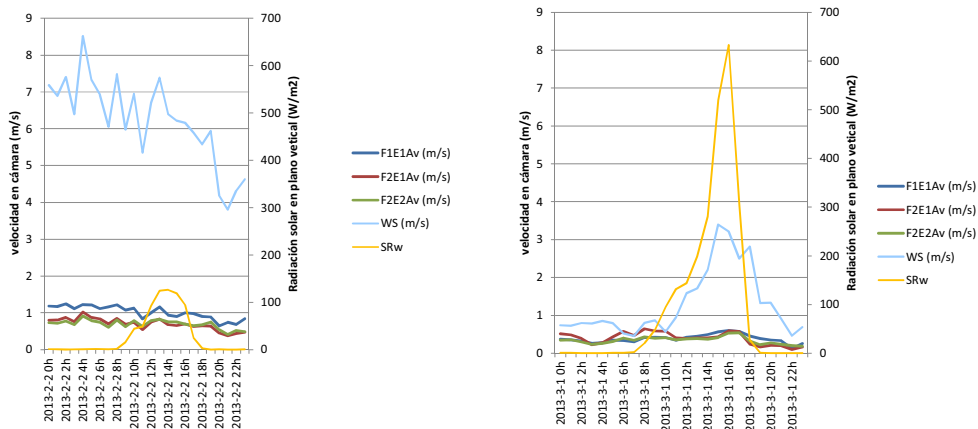


Figura 40. Velocidades promedio horarias en la cámara ventilada en dos días tipo de invierno: viento moderado y baja radiación (Fig izqda), derrame matinal con acoplamiento al viento en altura y alta radiación (Fig drcha.)

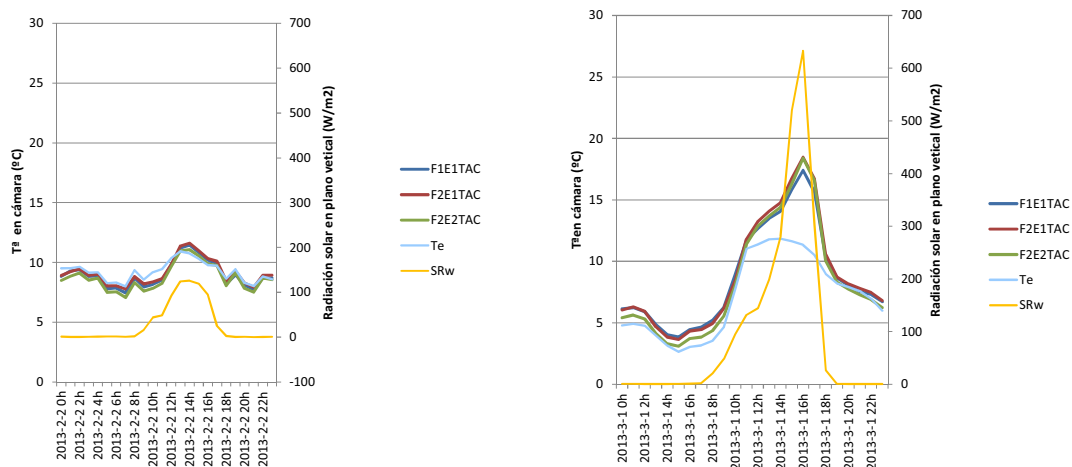


Figura 41. Temperaturas promedio horarias en la cámara ventilada en dos días tipo de invierno: viento moderado y baja radiación (Fig izqda), derrame matinal con acoplamiento al viento en altura y alta radiación (Fig drcha.).

Se observa lo siguiente:

- **2013/02/02** (gráficas de la izquierda): corresponde a un día de **baja radiación** con **moderada velocidad de viento**. La velocidad del viento es prácticamente mayor **que 6 m/s** hasta las 18 h. La temperatura en el interior de la cámara es muy similar al aire exterior.
- **2013/03/01** (gráficas de la derecha): corresponde a un día con **elevada radiación** en plano vertical (máximo de 600 W/m²) y con derrame matinal con velocidades menores que 1 m/s hasta las 11h y posterior acoplamiento con viento en altura alcanzando un máximo de 3,4 m/s. Las velocidades en la cavidad se mantienen en torno a 0,34 m/s como promedio diario. Se observa que la temperatura en la cámara es unos **6°C** por encima de la temperatura media exterior, siendo en estos casos la temperatura del eje inferior (F1E1Tac) ligeramente inferior, por lo que parece que hay un flujo ascensional.

Además, en base a todos los datos experimentales durante la campaña de medida se puede decir lo siguiente:

Se observa que cuando la intensidad del viento registrado en la torre meteorológica es menor que 4 m/s, la velocidad del aire en la cámara es menor que 0,6 m/s y cuando está entre 4 y 8 m/s, la velocidad del aire en la cámara está entre 0,6 m/s y 1,5 m/s (que es la máxima velocidad registrada).

En general, las **velocidades de aire en la cámara** son similares **en las tres alturas**, si bien se observa que cuando la dirección del viento es de componente oeste-noroeste y la velocidad es mayor que 4 m/s, el sensor F1E1Av presenta una velocidad ligeramente superior a las otras dos, siendo éstas similares.

Los días con elevada radiación, la temperatura en la cámara puede llegar a estar casi **10°C** por encima de la temperatura media exterior (por ejemplo el día **2013/03/03**), siendo en estos casos la temperatura del eje inferior (F1E1Tac) ligeramente inferior, por lo que parece que hay un flujo ascensional. Esta diferencia de temperaturas de 10°C respecto a la temperatura del aire exterior, en una altura de 6 metros como es el caso de Kubik, ejerce un incremento de presión de chimeneas de tiro térmico del orden 3 Pa, calculado como producto entre diferencia entre densidades del aire y altura ($\Delta P_{chimenea} = (\rho_{ext} - \rho_{int})g\Delta z$), comparable a la presión ejercida por el viento no perturbado de 2m/s.

Si el coeficiente convectivo sobre la fachada se calcula como $hc = 3.5 + 5,6v_{proximo}$ (m/s), siendo $v_{proximo}$ la velocidad próxima a la fachada que se calcula como $0,25v_{velocidad\ no\ perturbada}$ para fachadas expuestas, el **coeficiente convectivo** pasa a ser de 7,8 W/m²K a **2,7 W/m²K**.

Para un temperatura media exterior promedio de 9°C de enero y febrero de 2013, el **coeficiente radiante** calculado como producto de la constante de Boltzmann, la temperatura media al cubo y la emisividad ($h_{rad} = 4\sigma T^3_{mE}$), es de **4,1 W/m²K**. Así el coeficiente convectivo- radiante, calculado como suma de ambos coeficientes es de 6.84 W/m²K que se corresponde con una resistencia exterior calculada de **R_{ext}=0,146 m²K/W**, valor próximo al valor de la resistencia interior normativa de 0,13 m²K/W. Siendo el valor normativo para el exterior de 0,04 m²K/W.

6- CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE LOS FLUJOS A TRAVÉS DE LA FACHADA

Este apartado recoge los resultados y el análisis de datos de la evaluación de los parámetros dinámicos de la fachada doble fábrica de ladrillo y la solución rehabilitada con fachada ventilada.

Los parámetros dinámicos de la fachada permiten, entre otros:

- predecir con exactitud el comportamiento de la fachada en un periodo distinto al de la campaña experimental, permitiendo analizar su comportamiento en el transcurso de un año,
- predecir su comportamiento en un emplazamiento distinto al llevado a cabo en la experimentación.
- Introducir estos parámetros en herramientas de simulación de edificios y analizar su comportamiento

La obtención de los parámetros característicos a partir de los datos de KUBIK se ha llevado a cabo mediante

- un método de promedios como se recoge en la ISO 9869:1994 *Thermal Insulation-building elements – In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*
- y modelos de Caja Gris (grey box models) de la dinámica del flujo de calor en el muro utilizando modelos **estocásticos en tiempo continuo**

Método de promedios, descrito en ISO 9869:1994 *Thermal Insulation-building elements – In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance*.

Este método asume que la transmitancia se puede obtener dividiendo la densidad media de flujo de calor por el promedio de la diferencia de temperaturas, tomando el valor medio durante un espacio de tiempo suficientemente largo.

Así, la **resistencia superficie interior – exterior** se obtiene como $R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j}$, donde T_{sij} y

T_{sej} representan las medidas en distintos instantes de tiempo de las temperaturas superficiales interior y exterior.

La **conductancia** se obtiene como $\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}$ y

la **transmitancia** se obtiene como $U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})}$, donde T_{ij} y T_{ej} representan las medidas

de la temperatura exterior e interior de aire.

Modelos estocásticos de espacio estado

Los modelos estocásticos de espacio de estado o los llamados modelos de caja gris, consisten en un conjunto de estocásticas ecuaciones diferenciales (SDES) que describen la dinámica del sistema de transferencia de calor del muro en tiempo continuo y donde se utilizan métodos estadísticos para la identificación de los parámetros. Los parámetros calculados, son

parámetros concentrados del muro equivalente, y representan las resistencias, capacitancias, absortancias, el intercambio radiante.

Se han planteado tres modelos RCR de complejidad creciente, el primero es un modelo de una única capacitancia y un único estado, el segundo es un modelo con dos capacitancias y dos estados, y el tercero es un modelo de dos capacitancias que integra la afección del sol.

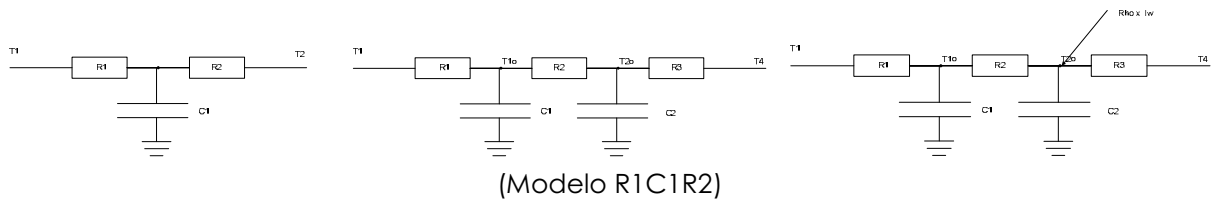


Figura 42. Modelos RCR utilizados en la resolución de parámetros dinámicos del muro equivalente.

Las ecuaciones diferenciales que representan estos espacios estado s en su resolución han sido las siguientes:

$$dT1o = \left(\frac{1}{R1C1} (T1 - T1o) + \frac{1}{R2C1} (T2o - T1o) \right) dt + (p11) d\omega$$

$$dT2o = \left(\frac{1}{R1C2} (T2o - T1o) + \frac{1}{R2C2} (T4 - T2o) \right) dt + (p22) d\omega$$

$$dT2o = \left(\left(\frac{1}{R1C2} (T2o - T1o) + \frac{1}{R2C2} (T4 - T2o) \right) + \frac{rho}{C2} * I_{west} \right) dt + (p22) d\omega$$

$$\text{Observación } HF = \frac{1}{R1} (T1 - T1o) + (e11)$$

$$\text{Observación } T2 = T2o + (e22)$$

$$\text{Observación } T3 = T3o$$

Donde:

- T1o y T2o representan los estados del muro equivalente.
- C1 y C2 son las capacidades del muro equivalente.
- R1 es la resistencia desde el punto observado T1 (superficial o aire) hasta el nodo que representa el parámetro condensado del muro
- R2 es la resistencia desde el punto observado T2 (superficial o aire) hasta el nodo que representa el parámetro condensado del muro
- p11 d\omega e11 representan el término de error de la respuesta.

El proceso de resolución se ha llevado secuencialmente, comenzando por el modelo más sencillo e incrementando su complejidad hasta obtener una buena correlación entre los valores medidos y los predichos, comprobando para ello la función de autocorrelación, el periodograma y el acumulado del periodograma.

La resolución del sistema se ha llevado a cabo con las lecturas minutales de los sensores en el periodo de agosto -diciembre 2012 para la doble fábrica de ladrillo y el periodo enero -febrero 2013 para la solución de rehabilitación con fachada ventilada.

Los valores minutales de las lecturas de sensores recogidos en el sistema IMEDAS, son los datos empíricos de entrada para la resolución del sistema. La resolución del sistema se ha llevado a con el promedio de lecturas diez minutales. Previamente se ha hecho un estudio de sensibilidad de la correlación de resultados con distintos niveles de agregación de los datos, 2, 5, 10, 15, 30 minutos y una hora, siendo generalmente los modelos que utilizaban datos diez minutales los que mejor correlación presentaban.

6.1- Parámetros dinámicos de la fachada de doble fábrica de ladrillo

La fachada a caracterizar es una doble fábrica de ladrillo característica de los edificios de los años 80 susceptibles de ser rehabilitados y está compuesta de:

- Ladrillo caravista $\frac{1}{2}$ pie perforado (24x11,5x7cm) con junta de mortero
- Cámara de aire de 10 cm de espesor
- Tabique de ladrillo hueco doble (24x7x11,5cm) con junta de mortero
- Raseo enlucido (1,5cm)

La campaña experimental se ha llevado a cabo entre septiembre y diciembre del 2012, en la fachada oeste de KUBIK. La doble fábrica de ladrillo se ha monitorizado en cuatro alturas diferentes de la fachada, 2 en la celda F1S1 y 2 en la F2S1.

En estas cuatro alturas, la solución constructiva se ha monitorizado en cuatro puntos de cada una de las superficies que componen la solución:

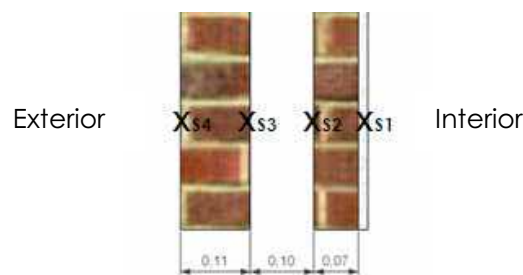


Figura 43. Sección representativa de la solución de doble fábrica de ladrillo ejecutada y ubicación de los sensores en cada uno de los cuatro ejes de medida de la fachada

- S1 superficie interior 1 de la celda (donde se han ubicado un sensor de Temperatura superficial TS1 y flujo de calor)
- S2: superficie del ladrillo hueco hacia en la cámara de aire no ventilada (T° superficial TS2)
- S3: superficie del ladrillo caravista hacia en el interior de la cámara de aire no ventilada, y (T° superficial TS3)
- S4: superficie del ladrillo caravista hacia en el exterior de la cámara de aire no ventilada

Para analizar los distintos dinamismos en el transcurso de las campañas, la celda se ha sometido a distintas condiciones de temperatura, para más información véase el apartado 4.2-

En el transcurso de campaña experimental de la doble fábrica de ladrillo se han presentado problemas en la captura de toma datos, especialmente con la lectura de los flujos de calor, la limitando el periodo con disponibilidad de datos. Como se ha estudiado en el apartado 4.0, los sensores colocados en una misma superficie no presentan diferencias significativas, por lo que se han utilizado las lecturas de los sensores de la fachada F2S1 para obtener los parámetros del

muro característico. Para más información de la representatividad de las variables de control datos véase el apartado 4.2.5.

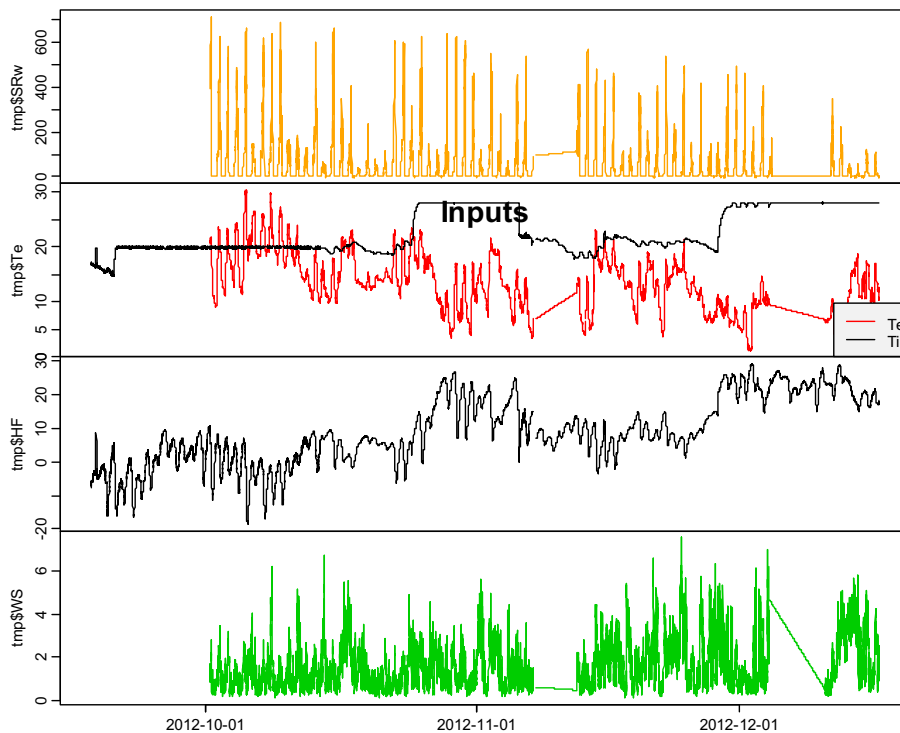


Figura 44. Lecturas de los sensores de radiación solar, temperatura exterior e interior, flujo de calor y velocidad de viento en el transcurso de la campaña experimental de la doble fábrica de ladrillo en la celda F2S1.

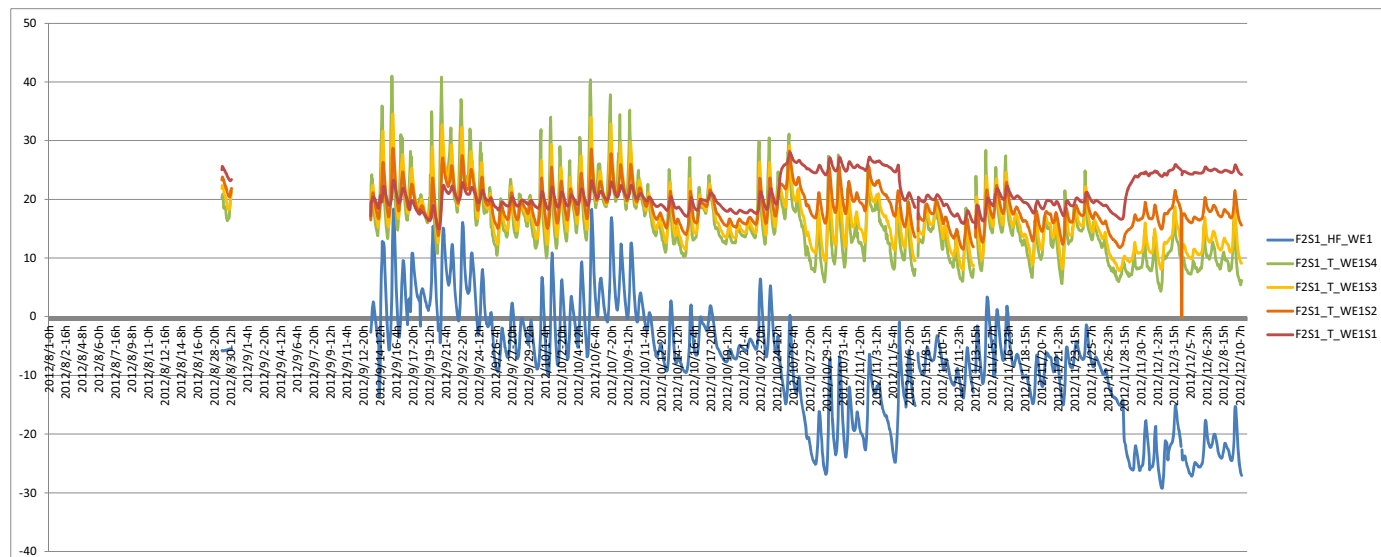


Figura 45. Lectura de los cuatro sensores de temperatura superficial (S1, S2, S3, S4) del Eje inferior de la celda F2S1), en el transcurso de la campaña de la fase 2 de doble fábrica de ladrillo (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior del caravista).

Las propiedades del muro base según fuentes bibliográficas son los que se recogen en la tabla siguiente.

Tabla 7. Las propiedades de las diferentes hojas de la doble fábrica de ladrillo según fuentes bibliográficas

Capa	Espesor (mm)	Resistencia (m2K/W)	Calor específico (J/KgK)	Densidad (kg/m3)	Capacidad (J/m ² K)	Transmitancia (W/m ² K)
Ladrillo caravista ½ pie perforado (24x11,5x7cm) con junta de mortero	110	0,21	1000	1020	112200	
Cámara de aire	100	0,18	1004,67	1,29	No significativa (130)	
Tabique de ladrillo hueco doble (24x7x11,5cm) con junta de mortero	70	0,16	1000	930	60450	
Raseo enlucido	15	0,01875	1000	1500	22500	
Total doble fábrica ladrillo	295	0,57*			≅200000	1,35**

Fuentes bibliográficas: Catalogo Técnico de la Edificación y UNE-EN-ISO 6946: 1996 Elementos y componentes de edificación. Resistencia y transmitancia térmica. Método de cálculo.

*resistencia superficie-superficie, calculada como $R = \sum_{j=1}^n R_j$

** transmitancia térmica aire –aire ,calculada como $U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{si}}$, donde R_{se} y R_{si}

representan coeficientes las resistencias exterior e interior (0.13 y 0.04 respectivamente) de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 6946

6.1.1. Parámetros térmicos de la doble fábrica de ladrillo aplicando el método de promedios.

El método asume que la transmitancia de un muro se puede obtener dividiendo la densidad media de flujo de calor por el promedio de la diferencia de temperaturas, tomando el valor medio durante un espacio de tiempo suficientemente largo.

Tomando valores promedios diarios, la resistencia media diaria en cada uno de los ejes de las distintas celdas, evoluciona entre valores 1-0,2 m²K/W, en función del instante considerado, de tal y como se refleja en la figura siguiente.

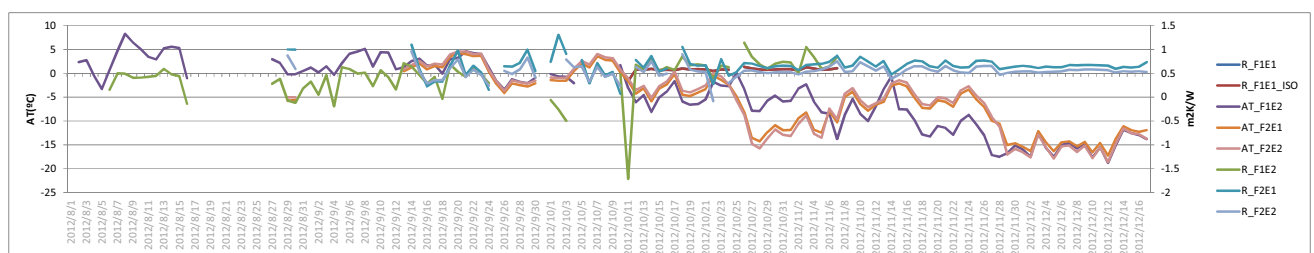


Figura 46. Resistencias superficie-superficie promedio diarias, calculadas como el cociente entre el salto medio de temperaturas y el flujo medio en cada uno de los ejes.

Ahora bien, si se consideran los valores del periodo comprendido entre el 29/11/2012 hasta el 9/12/2012, donde la temperatura interior de las celdas se ha mantenido a 28°C para minimizar los dinamos de la fachada, el valor de la resistencia media diaria (superficie-superficie) se mantiene estable en **0,55 m²K/W** para el eje 2 (F2S1E2) y **0,64 m²K/W** para el eje 1 (F2S1E1).

Tomando periodos promedios superiores al día, los valores promedio resistencias se mantienen entre **0,55m²K** para el eje2 y **0,66 m²K/W** para el eje 1. Posiblemente, la principal causa de este ruido sea la mayor influencia del fan-coil sobre el flujometro.

Como se ha comentado en el apartado 4.2 de la campaña experimental, las lecturas de las temperaturas superficiales y flujometros en el eje superior de las superficies interiores de las fachadas oeste, presentan mayor "ruido", especialmente cuando la celda está acondicionada a una temperatura superior a 25°C

enido presente esta fuente de error, cabe esperar que la resistencia térmica superficie-superficie de la doble fábrica de ladrillo ejecutada en KUBIK sea próxima a **0,66 m²K/W**.

6.1.2. Parámetros térmicos dinámicos de la doble fábrica de ladrillo calculados con el modelo CTSM de caja gris.

Para el cálculo del sistema RCR equivalente del muro se ha utilizado un modelo de caja gris (grey box), planteando un sistema equivalentes RCR y el sistema de ecuaciones diferenciales con los fenómenos que tienen lugar en el cerramiento.

Se ha seguido un modelo secuencial.

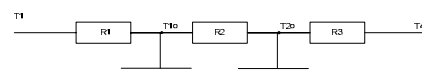
- 1- Se ha resuelto el sistema superficie 1 – superficie 2.
- 2- Se ha resuelto el sistema superficie 1 – superficie 4 utilizando los valores calculados en el paso precedente
- 3- Se ha resuelto el sistema Interior – superficie 4
- 4- Se ha resuelto el sistema Interior- exterior

Probando distintos periodos con distintas condiciones exteriores y distintos niveles de agregación.

Se han utilizado la serie de datos del periodo 2012/9/13-14h hasta 2012/10/24-16h del eje inferior de la celda F2S1, por ser un periodo en que la fachada oeste está sujeta a dinamos, hay un gran continuidad de datos en el periodo y ser el eje 1 el que menor influencia del fancoil tiene.

De los resultados de la resolución del sistema de ecuaciones se concluye que el muro de doble fábrica de ladrillo presenta una resistencia superficie –superficie de **0,529 m²K/W** recogen a continuación De las figuras precedentes se observa que los valores estimados con los parámetros **R_{total superficie1 –superficie4} = 0,529 m²K/W**, la resistencia equivalente interior-exterior del muro es **R_{wall int exterior} = 0,853 m²K/W** y la Capacitancia total: 201.000 J/kgm²K

6.1.2.1. RCR_{s1-s4} DFL: modelo equivalente de muro superficie interior - superficie exterior(S1-S4) para la doble fábrica de ladrillo



Modelo RCRCR planteado:

Secuencia de datos: 2012/09/14--2012/10/11

Nivel de agregación de los datos: 10 minutos

Parámetros de la fachada equivalente obtenidos de la resolución del modelo con la campaña experimental

	Valor	Error standard
C1	4.2100e+04	3.5547e+02
C2	1.5917e+05	3.7861e+03
R1	5.1976e-02	3.7088e-04
R2	4.7623e-01	6.9534e-03
R3	1.0214e-03	2.2112e-04
RmuroS1-S4	0.529	7.55E-03
Cwall	2.01E+05	4.14E+03

Los valores de la resistencia y capacitancia equivalente del muro son con las que se han obtenido estos valores son:

Rtotal superficie -superficie= 0,529 m²K/W : ($R_{\text{muro S1-S4}} = 5.29\text{E-}01 \text{ m}^2\text{K/W}$)

Capacitancia total: 201.000/kgm²K ($C_{\text{ladrillo hueco}} = 4.2100\text{e+}04$; $C_{\text{ladrillo caravista}} = 1.5917\text{e+}05$)

A tenor de la correlación entre las observaciones y lo predicho por el modelo para el periodo objeto de estudio, y el análisis de residuales cabe esperar que estos parámetros representen el dinamismo de esta fachada.

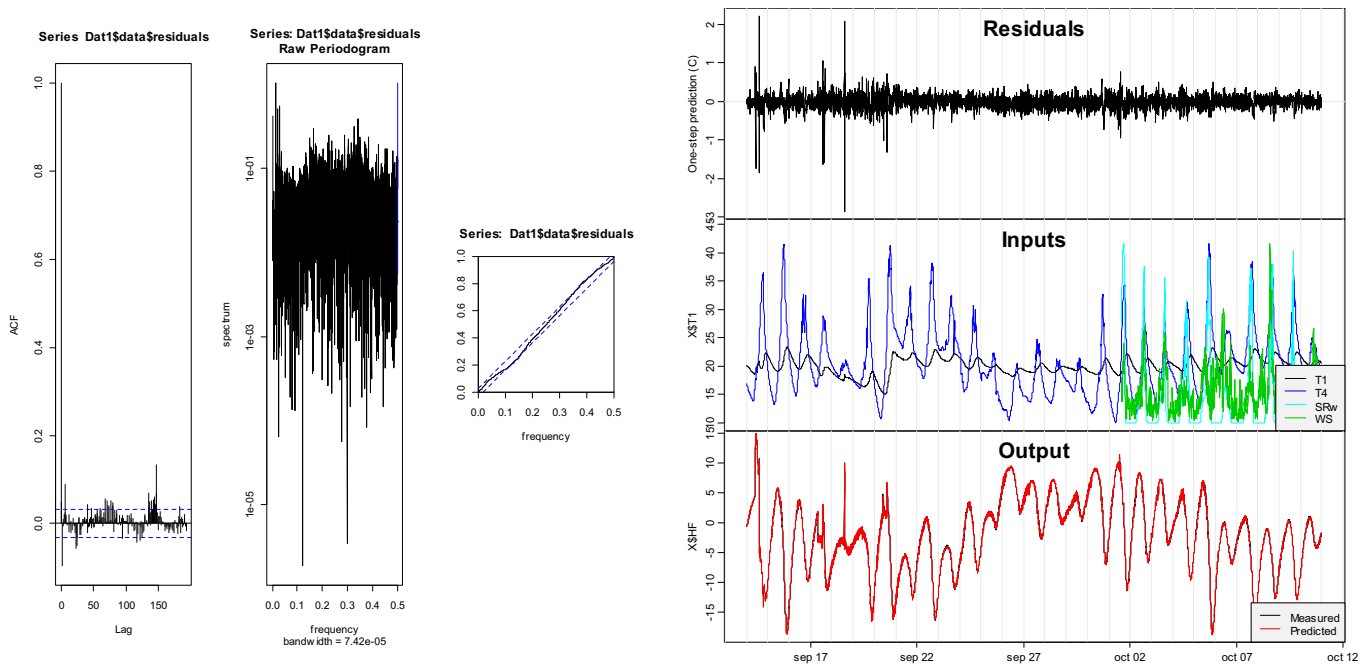


Figura 47. Correlación Flujos de calor medidos en el F2S1E1, y flujos de calor estimados por el CTSM para el modelo S1-S4 de la doble fábrica de ladrillo.

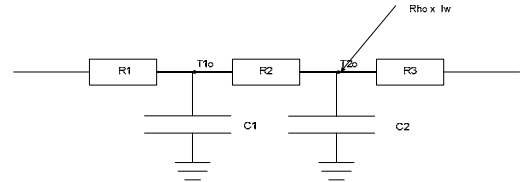
6.1.2.2. Modelo equivalente S1-Exterior

Modelo RCRCR planteado:

Secuencia de datos: 2012/09/14--2012/10/11

Nivel de agregación de los datos: 10 minutos

Parámetros de la fachada equivalente obtenidos de la resolución del modelo con la campaña experimental



	Valor	Error standard
C1	4.2100e+04	3.5547e+02
C2	1.5917e+05	3.7861e+03
R1	5.1976e-02	3.7088e-04
R2	4.7623e-01	6.9534e-03
R3	2.29E-02	2.40E-03
R_{S1-Text}	5.51E-01	9.72E-03
R_{muroS1-S4}	0.529	7.55E-03
C_{wall}	2.01E+05	4.14E+03

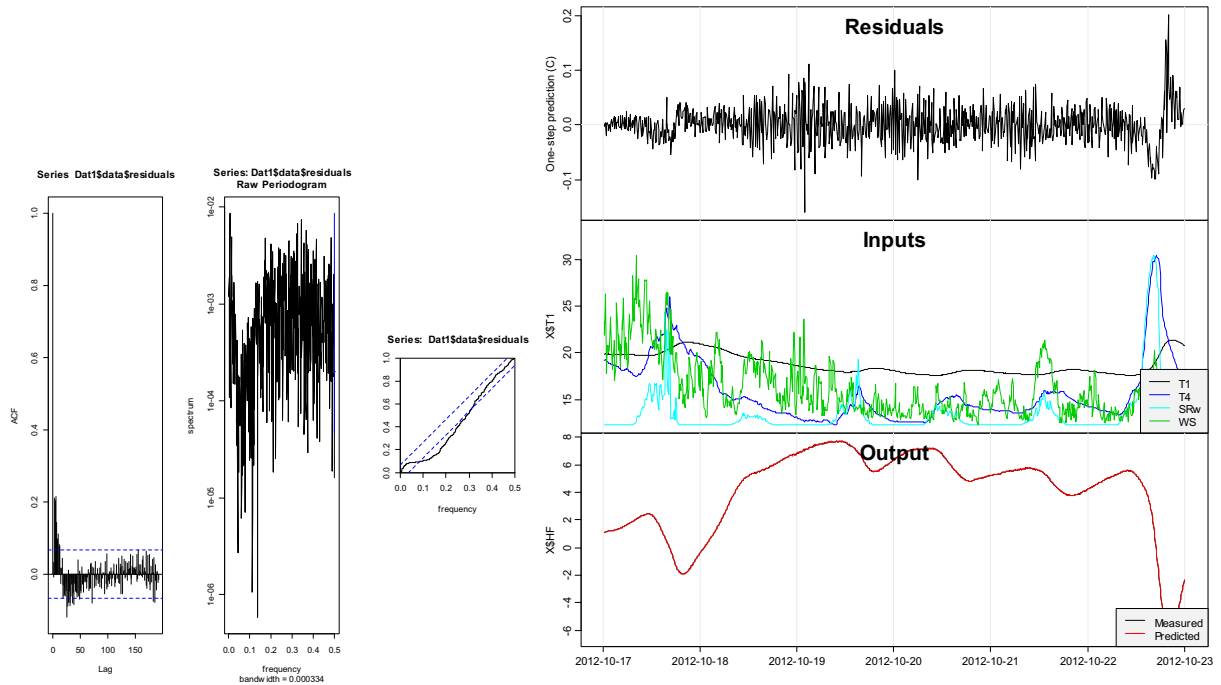


Figura 48. Correlación Flujos de calor medidos en el F2S1E1, y flujos de calor estimados por el CTSM. El criterio de signos en para el flujo es decir flujo saliente del volumen de control es positivo

Pese a la incorporación el efecto de la radiación solar sobre la fachada oeste, la resolución del modelo no mejora. Sería conveniente valorar la posibilidad de incorporar otros fenómenos como los intercambios radiantes con el alrededor.

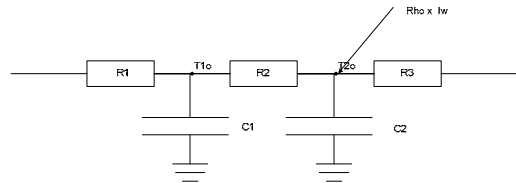
6.1.2.3. Modelo equivalente interior-exterior

Modelo RCRCR planteado:

Secuencia de datos: 2012/09/14--2012/10/11

Nivel de agregación de los datos: 10 minutos

Parámetros de la fachada equivalente obtenidos de la resolución del modelo con la campaña experimental



	Valor	Error standard
C1	4.2100e+04	3.5547e+02
C2	1.5917e+05	3.7861e+03
R1 (R1' modelo S1-Tint)	3.5420e-01	2.0301e-03
R2	4.7623e-01	6.9534e-03
R3 (R3' modelo S1-S4 +Rext)	2.29E-02	2.40E-03

*nota: en el modelo superficie 1 –exterior

$$R_{DFL \text{ int-ext}} = 0,853 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{DFL \text{ int-ext}} = 1,17 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$R_{int} = 3.5420e-01 - 5.1976e-02 = 0,302224$$

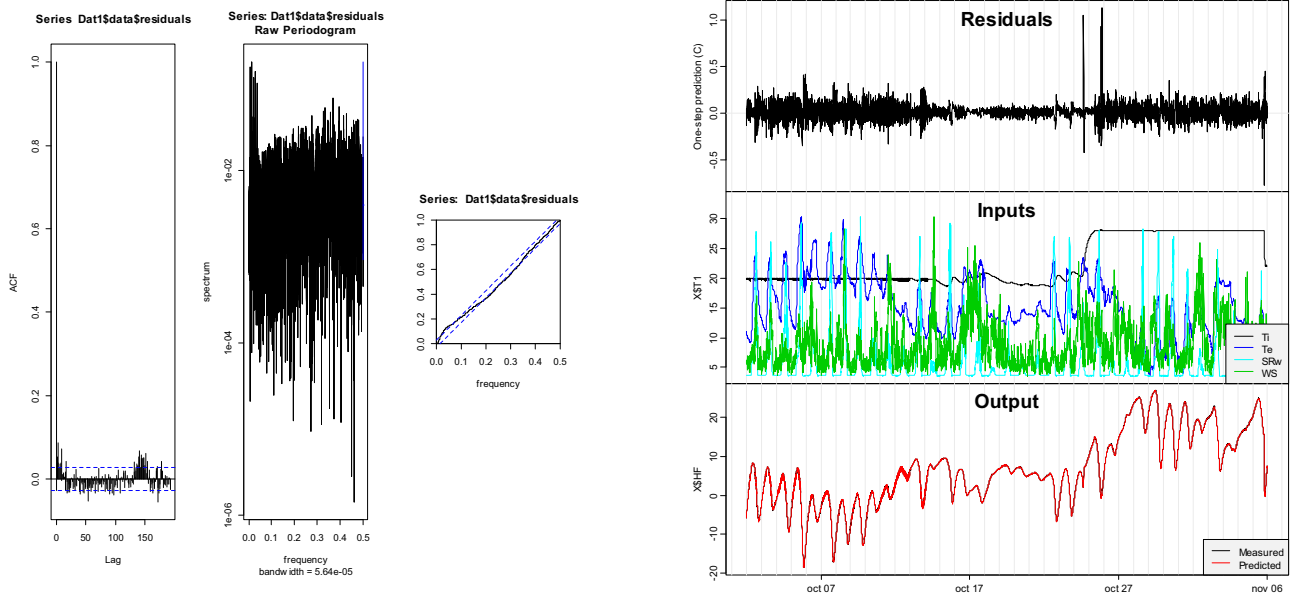


Figura 49. Correlación Flujos de calor medidos en el F2S1E1, y flujos de calor estimados por el CTSM para el modelo Exterior -Interior de la doble fábrica de ladrillo.

6.2- Parámetros dinámicos de la fachada de doble fábrica de ladrillo rehabilitada con una solución SATE de fachada ventilada.

El muro base de doble fábrica de ladrillo se ha rehabilitado con una solución de rehabilitación por el exterior de fachada ventilada e junta abierta.

- 5 cm de lana de roca Ventirock
- 5 cm de cámara de aire
- 1 cm de plaqueta cerámica, con 8 mm de huella.

Perfiles verticales sin travesaños horizontales que garantizan la continuidad de flujo en las tres cámaras verticales de KUBIK.

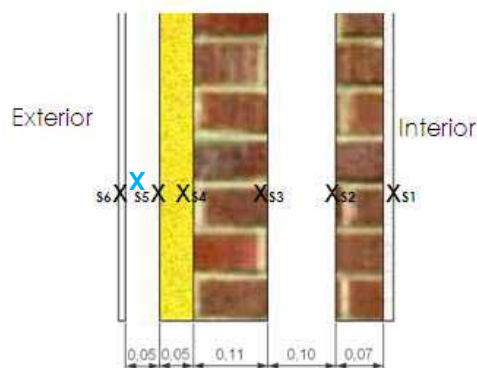


Figura 50. Sección representativa de la solución de muro base y fachada ventilada de junta abierta ejecutada. Ubicación de los sensores superficiales en cada uno de los cuatro ejes de medida de la fachada oeste de Kubik.

Para más detalles sobre la relación de sensores cuyas lecturas se han utilizado en la caracterización dinámica del muro tras su rehabilitación, véase el apartado 4.1.3

La campaña experimental se ha llevado a cabo en el periodo comprendido entre 2012-12-20 y el 2013-02-28, si bien por errores de muestreo de determinados sensores (velocidad de aire, presión diferencia) la secuencia completa con todos los datos comienza a partir del 01/01/2013.

En el transcurso de la campaña experimental con la solución de fachada ventilada (de Enero 2013 hasta 2013-02-15) la meteorología se ha mantenido prácticamente nublado casi todos los días, por lo que la fachada ha mostrado un comportamiento poco dinámico, con flujos de calor perdedores.

Asimismo, se han corregido los errores de muestreo de la celda F1S1 que tuvieron lugar en la campaña de doble fábrica de ladrillo, por lo que los datos empíricos utilizados en la determinación de los parámetros dinámicos de la solución rehabilitada han sido las lecturas de los sensores de ambas. El periodo utilizado ha sido el comprendido entre el 2013-01-08 y el 2013-02-28.

Las siguientes figuras representan la evolución seguida por los mismos.

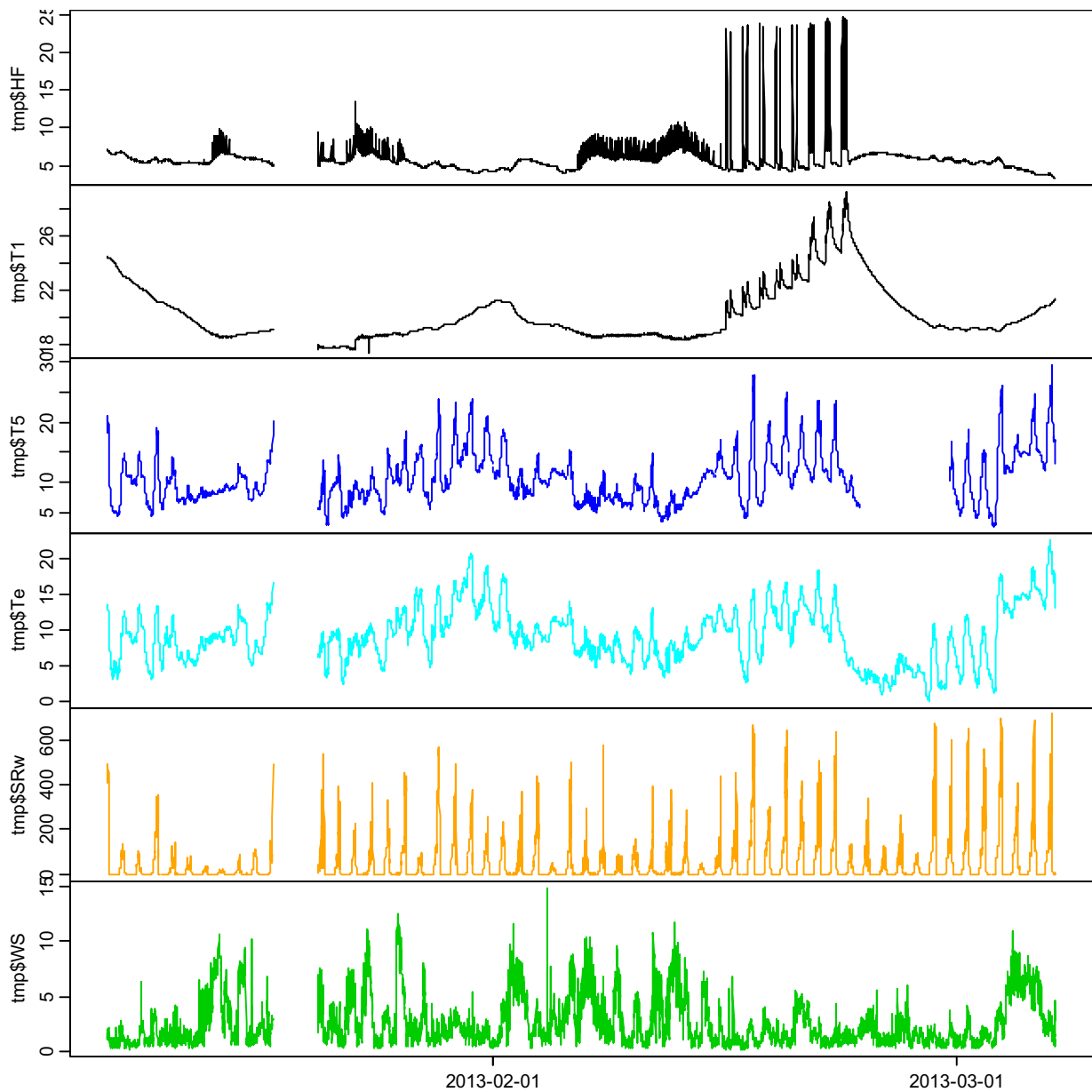


Figura 51. Evolución de la lectura de sensores ubicados en la celda FIS1 utilizados en la caracterización dinámica de la fachada ventilada.

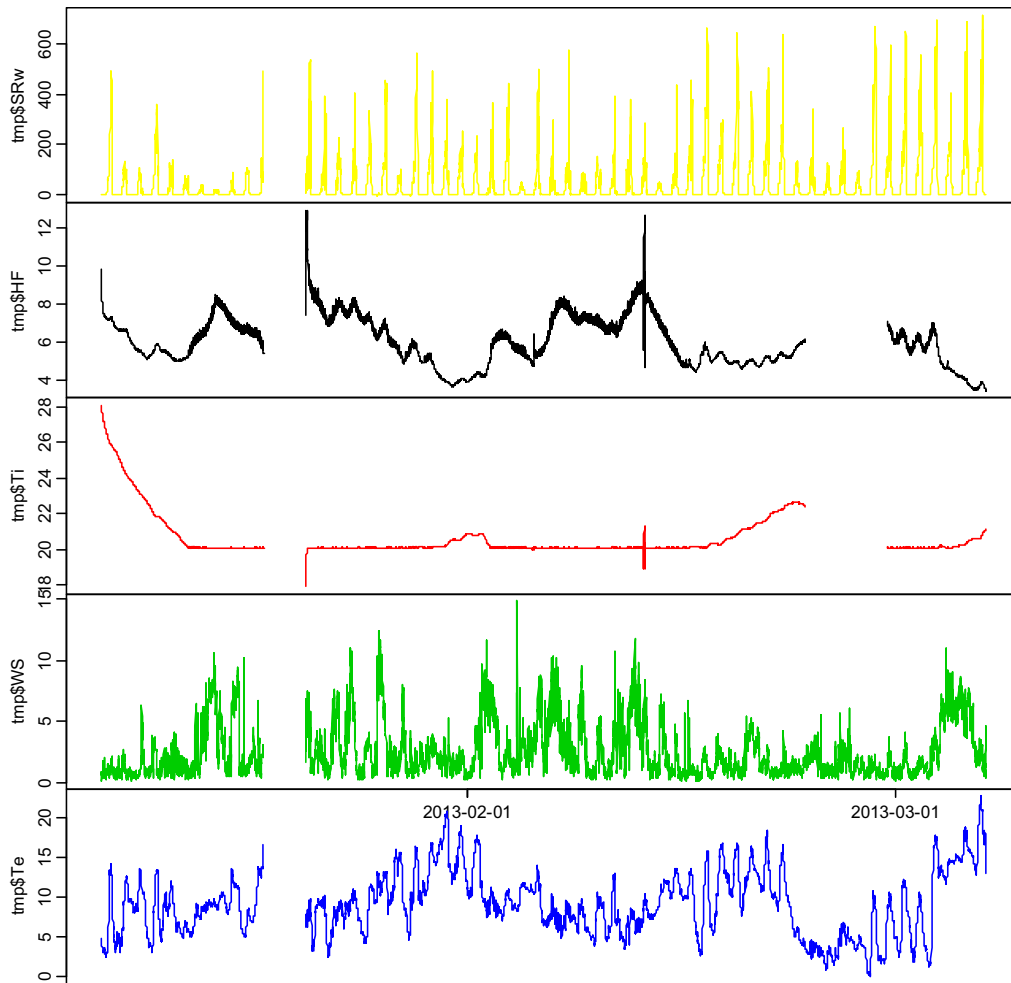


Figura 52. Evolución de las lecturas de los sensores de la celda F2S1E2 correspondientes con el periodo utilizado en la caracterización dinámica de la fachada ventilada 82013-01-8 y 2001302-28)

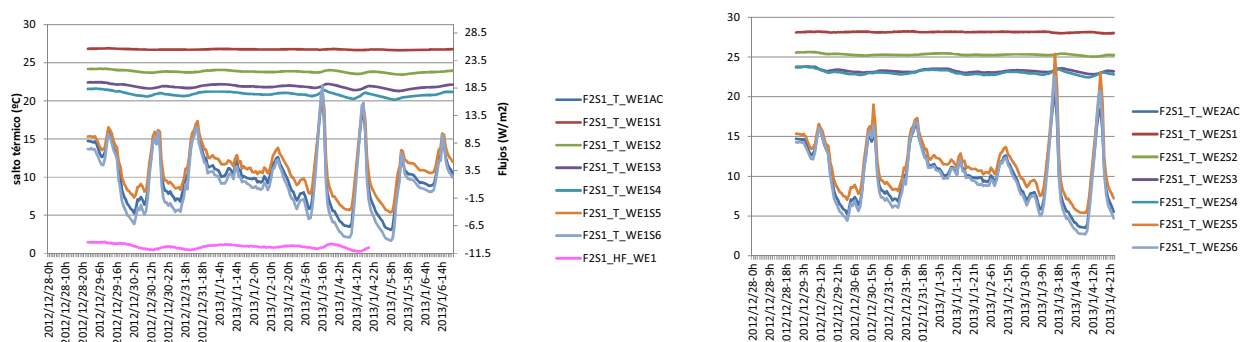


Figura 53. Lectura de los sensores de temperatura superficiales (S1, S2, S3, S4, S5, S6) de los dos ejes de la celda F2S1), en el transcurso de la campaña de la fase 3 de la solución rehabilitada de doble fábrica de ladrillo (donde S1 representa la superficie interior, S4 la exterior del caravista, S5 la cara exterior de la lana de roca).

Propiedades térmicas de la solución de rehabilitación de fachada ventilada sobre doble fábrica de ladrillo de acuerdo a fuentes bibliográficas.

Tabla 8. Las propiedades de las diferentes capas de acuerdo a fuentes bibliográficas

Capa	Espesor	Resistencia	Calor específico	Densidad	Capacidad	Transmitancia
	(mm)	(m ² K/W)	(J/KgK)	(kg/m ³)	(J/m ² K)	(W/m ² K)
plaqueta cerámica	10					
cámara de aire ventilada	50	1,25				
Lana de roca Ventirock	50	0,0			No significativa	
Ladrillo caravista ½ pie perforado (24x11,5x7cm) con junta de mortero	110	0,21	1000	1020	112200	
Cámara de aire	100	0,18	1004,67	1,29	No significativa (130)	
Tabique de ladrillo hueco doble (24x7x11,5cm) con junta de mortero	70	0,16	1000	930	60450	
Raseo enlucido	15	0,01875	1000	1500	22500	
Total doble fábrica ladrillo+fachada ventilada	400	1,81*			≅200000	0,52**

Fuentes bibliográficas: Catálogo Técnico de la Edificación y UNE-EN-ISO 6946: 1996 Elementos y componentes de edificación. Resistencia y transmitancia térmica. Método de cálculo.

*resistencia superficie-superficie, calculada como $R = \sum_{j=1}^n R_j$,

** transmitancia térmica aire –aire ,calculada como $U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{si}}$, donde R_{se} y R_{si}

representan coeficientes las resistencias exterior e interior, que en el caso de la fachada ventilada, R_{se} se toma igual al interior, es decir 0.04 , de acuerdo a la norma UNE-EN-ISO 6946

6.2.1. Parámetros térmicos de la de la solución de rehabilitación con fachada ventilada aplicando el método de promedios.

El método de promedios asume que la transmitancia se puede obtener dividiendo la densidad media de flujo de calor por el promedio de la diferencia de temperaturas, tomando el valor medio durante un espacio de tiempo suficientemente largo.

Así, la resistencia se obtiene como
$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_j}$$
, donde T_{sij} y T_{sej} representan las medidas

en distintos instantes de tiempo de las temperaturas superficiales interior y exterior, Tomando los valores promedios diarios de la diferencia de temperaturas entre la superficie 1 y la superficie 5, y los flujos de calor, la resistencia media diaria en cada uno de los ejes de las distintas celdas, evoluciona entre valores 1-0,2 m²K/W, en función del instante considerado, de tal y como se refleja en la figura siguiente.

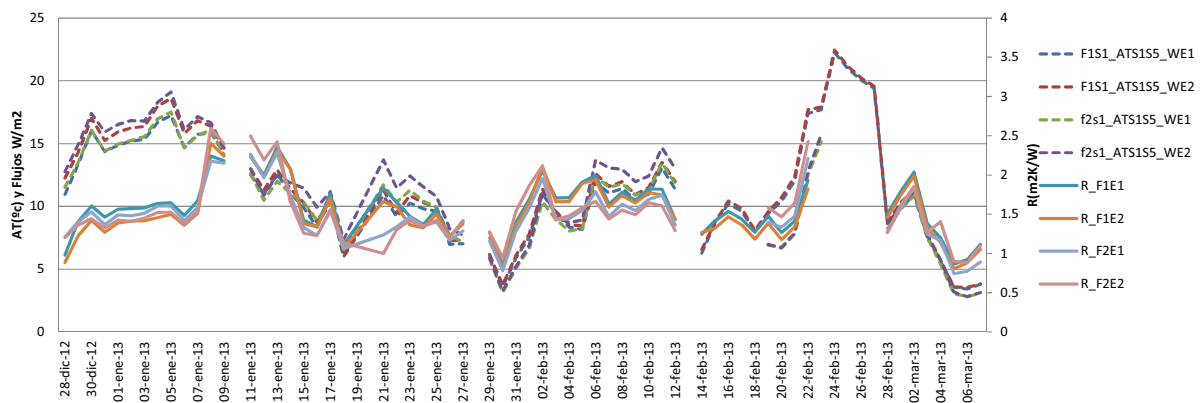


Figura 54. Resistencias superficie-superficie promedio diarias, calculadas como el cociente entre el salto medio diario de temperaturas entre la superficie interior y exterior y el flujo medio en cada uno de los ejes.

En el periodo comprendido entre enero y febrero de 2013, en el que transcurre la campaña experimental del muro base con la fachada ventilada, los valores diarios promedio de resistencia térmica superficie –superficie (Sup1-Sup5) varían entre **0,74 y 2,3 m²K/W**.

Sin embargo, estos valores se mantienen estables en el periodo comprendido entre el 28/12/2012 y el 6/01/2013, donde la temperatura interior de las celdas se ha mantenido a 28°C, 15°C por encima de la temperatura ambiente exterior, minimizando los dinamismos de la fachada y manteniendo un valor estable de resistencia durante varios días consecutivos tal y como establece la norma ISO 9869:1994 para la determinación de la resistencia térmica equivalente. Así, en este periodo del 28/12/2012 al 06/01/2013, el valor de la resistencia media diaria (superficie1-superficie5) se mantiene estable en **1,40m²K/W para el eje 2 y 1,52 m²K/W para el eje 1**.

Como se ha comentado en el apartado 4.2 de la campaña experimental, las lecturas de las temperaturas superficiales y flujómetros en el segundo eje de las superficies interiores de las fachadas oeste (WE2), presentan mayor “ruido”, especialmente cuando la celda está acondicionada a una temperatura superior a 25°C.

Tenido presente esta fuente de error, cabe esperar que la resistencia térmica **superficie-superficie** de la doble fábrica de ladrillo ejecutada en KUBIK sea próxima a **1,52 m²K/W**, lo que equivale a una **transmitancia térmica equivalente sup-sup de 0,66 W/m²K**.

Teniendo presente que para fachadas ventiladas el valor de resistencia superficial exterior (R_{ext}) es igual al valor utilizado para la resistencia interior de 0,13 W/m²K, la transmitancia térmica interior –exterior para la fachada ventilada es de **0,56W/m²K** (el valor promedio para todo el

periodo obtenido en la Parámetros térmicos de la doble fábrica de ladrillo rehabilitada con la solución SATE de fachada ventilada calculados con el CTSM.

Para el cálculo del sistema RCR equivalente del muro se ha utilizado un modelo de caja gris (*grey box*), planteando un sistema equivalentes RCR y el sistema de ecuaciones diferenciales con los fenómenos que tienen lugar en el cerramiento.

Para su resolución se ha seguido un proceso secuencial:

- 1- Se ha resuelto el sistema superficie 1 – superficie 2
- 2- Se ha resuelto el sistema superficie 1 – superficie 4 utilizando los valores calculados en el paso precedente
- 3- Se ha resuelto el sistema Interior – superficie 4
- 4- Se ha resuelto el sistema Interior- exterior

probando distintos periodos con distintas condiciones exteriores y distintos niveles de agregación.

Para la resolución del sistema, inicialmente se ha utilizado la serie de datos de la celda F2S1 en el periodo 2013-01-21 hasta 2013-02-11, por ser una serie relativamente larga con disponibilidad de datos. Si bien los resultados de la resistencia equivalente para distintos periodos utilizados en la resolución muestran una buena correlación, las capacitancias muestran mayores variabilidades.

Por lo que se utilizan los datos correspondientes con el periodo d excitaciones de la celda F1S1, por ser un periodo en que la fachada oeste está sujeta a dinamismos.

El modelo más simple de fachada ventilada que mejor se ajusta las respuestas empíricas obtenidas es un RCR de dos capacitancias y tres resistencias:

- La **transmitancia** equivalente **superficie (S1) – superficie (S5)** de la solución de rehabilitada es de **0,67 W/m²K** ($R_{wall}=1,490552 \text{ m}^2\text{K}$) cuando el sistema se resuelve con la secuencia de datos empíricos de la F2S1, valores en línea con los resultados del método dinámico del apartado 6.2.1, donde se habían obtenido valores de resistencia superficie-superficie de 1,52 m²K/W .
- La **transmitancia equivalente** interior-exterior de la **solución rehabilitada** que mejor se ajusta es de **$U_{wall \text{ ext-int}}=0,599 \text{ W/m}^2\text{K}$** ($R_{wall \text{ int-ext}}=1,6707 \text{ m}^2\text{K/W}$).
- La resistencia superficial exterior equivalente (**R_{ext}**) es de **0,0785 m² K/W**, un valor intermedio entre una resistencia superficial interna (0,13 m² K/W) y una resistencia externa (0,04 m²K/W) establecido en la norma UNE-EN-ISO 6946 "método de cálculo de resistencia y transmitancia térmica de los elementos y componentes de la edificación".
- En el modelo que integra el sol, **el sol tiene muy baja influencia** ($\rho=0,003$), por lo que se puede considerar que en una fachada ventilada de junta abierta, el sol apenas tiene incidencia sobre el flujo de calor hacia el interior.
- En el transcurso de la campaña experimental de invierno, y en lo que a flujos de calor respecta, la fachada ventilada de la planta segunda ha presentado flujos de calor salientes y relativamente constantes. Posiblemente esto contribuya a que el valor de la capacitancia obtenida en el modelado en CTSM con la secuencia de datos utilizada no sea representativa.

- Cuando se utilizan datos empíricos de la celda F1S1E1 correspondientes con el periodo 15/02/2013 al 07/03/2013, en el que la celda se excita con pulsos durante 6 días y le siguen días de elevada radiación, los resultados de la resolución del sistema de ecuaciones presenta mayor variabilidad, la resistencia Int-exterior varía en torno a valores de 2,58 m²K/W y 1,65885 m²K/W, siendo este último muy similar al obtenido con los datos de la F2S1.
 - 2013-02-15 2013-02-23 sólo excitaciones :Rwall: 1,96 m²K/W
 - 2013-02-18 a 2013-03-07 excitaciones +Radiación alta : Rwall: 1,65885 m²K/W
 - 2013-02-18 a 2013-03-07 sólo radiación alta; Rwall: 2,58 m²K/W y Cwall=307403

Para mejorar la precisión en la resolución del sistema de ecuaciones, y obtener unas buenas predicciones del comportamiento dinámico de la fachada ventilada en cualquier clima es recomendable extender el periodo de toma de datos a un periodo con mayor nivel de radiación y reformular un modelo para que contemple otros fenómenos.

A continuación se recogen algunos de los resultados del proceso secuencial seguido para la resolución del sistema.

6.2.1.1. Modelo superficie S1-S5 con los datos empíricos de la F1S1.

Modelo RCRCR planteado:

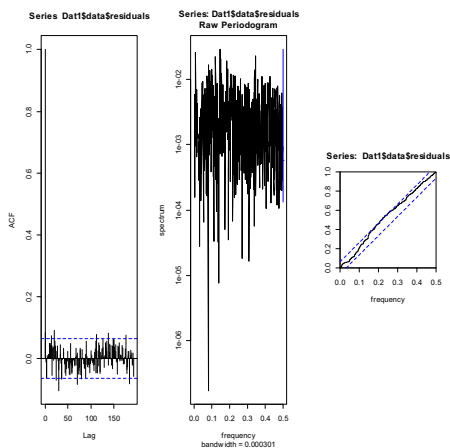
Secuencia de datos: 2013-01-21 2013-02-11

Nivel de agregación de los datos: 10 minutos

	Estimación	Std.Error
C1	4.3021e+04	1.6281e+3
C2	1.5641e+05	1.9221e+04
R1	4.7200e-02	7.2199e-3
R2	5.5489e-01	7.2178e-3
R3	8.8846e-01	1.7563e-02

R_{wallS1-S5} = 1,4905 m²K/W (error standard= 3.2e-2)

C_{equivalente} = 199.434 J/kgm²K (error standard=2.08 e+4)



6.2.2. Modelo equivalente Tint-Text

Modelo RCRCR planteado:

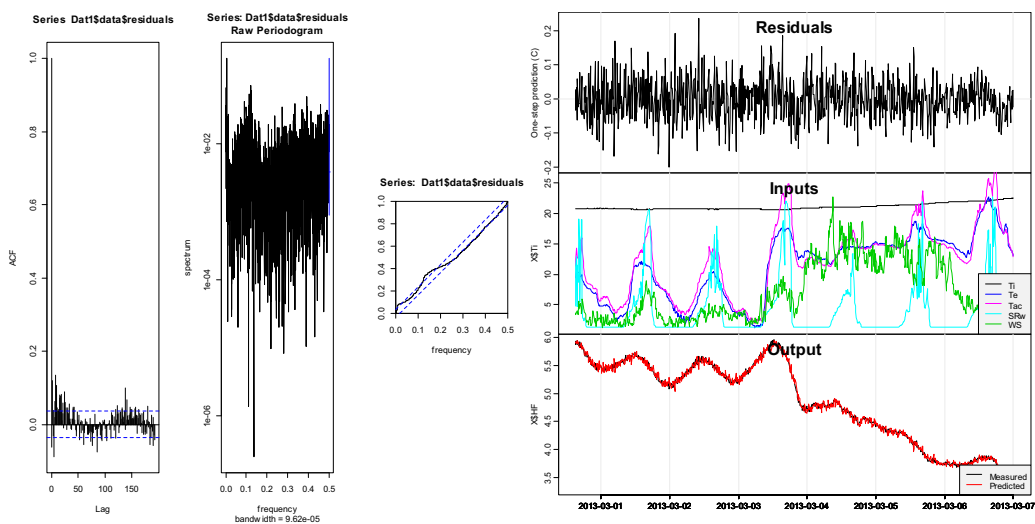
Secuencia de datos: 2013-01-21 2013-02-11

	Estimate	Std.error
C1	4.3021e+04	1.6281e+3
C2	1.5641e+05	1.9221e+04
R1	1.4916e-01	1.5698e-03
R2	5.5489e-01	7.2178 e-8
R3	9.666e-1	1.7563e-2

$R_{wall}=1,670658 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}\rightarrow$

$U_{wall \text{ int-ext}}=0,599 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$

$C_{wall}=199434 \text{ J}/\text{kgm}^2\text{K}$



Respecto al modelo anterior, en este paso se ha introducido la variable de radiación solar en la ecuación, a la vista de los resultados de rho, el coeficiente que representa la energía solar absorbida en la superficie respecto, se puede concluir que el sol no tiene mayor afección en los flujos, dado que el factor que multiplica dicho término y que representa el coeficiente de absorptividad es muy pequeño ($\rho=4.0349e-03$) y el análisis de los residuales no mejora.

7- CONCLUSIONES

Esta fase del proyecto ERAIKAL-12 "Estudio de investigación sobre eficiencia energética y viabilidad de la aplicación de fachadas ventiladas en soluciones de rehabilitación" tiene como objetivo identificar aquellos aspectos a considerar para la correcta ejecución y caracterización de las fachadas ventiladas como solución de rehabilitación en la climatología de la CAPV.

De los valores tomados de las series experimentales, y de los cálculos realizados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Durante el **periodo de invierno** con demanda de calefacción, los **flujos** a través de la fachada rehabilitada con una solución de fachada ventilada con 5 cm de aislamiento y 5 cm de cámara de aire se ven **reducidos** a aproximadamente **la mitad** respecto a la solución base (doble fábrica de ladrillo).

Con una temperatura de confort **interior de 20°C** y un salto térmico entre el interior y exterior diarios de aproximadamente **15°C**, la solución rehabilitada pierde en torno a **6 W/m²** mientras que la doble fábrica de ladrillo, presentaba unas pérdidas de aproximadamente **16W/m²**.

- Para el periodo de invierno en el que se han llevado a cabo las campañas experimentales, la doble fábrica de ladrillo se ha comportado como un muro con una transmitancia aire-aire media 1,1W/m²K, mientras que la fachada ventilada se ha comportado como un muro con una transmitancia equivalente aire-aire de 0,5 W/Km².
- De la caracterización dinámica se deduce que el **muro base** presenta una transmitancia superficie-superficie **U_{sup-sup}=1,89 W/m²K** e Interior –exterior de **U_{int-ext}=1,16 W/m²K** bajo las condiciones a las que está expuesta la fachada de KUBIK.
- De la caracterización dinámica se deduce que el **muro rehabilitado** presenta una transmitancia superficie-superficie de **U_{sup-sup}=0,67 W/m²K** e Interior –exterior de **U_{int-ext}= 0,6 W/m²K** calculado bajo las condiciones a las que está expuesta la fachada de KUBIK.
- La velocidad de aire a la que está sujeta la hoja exterior del aislamiento tras su rehabilitación es de 0,44 m/s (frente a los 0,67 m/s antes de su rehabilitación) reduciéndose el coeficiente convectivo sobre fachada de 7,8 W/m²K a 2,7 W/m²K, calculado como $hc=3,5+5,6v_{proximo}$, e incrementándose la **resistencia exterior**. El coeficiente radiante calculado para una temperatura media de 9°C es de 4,1 W/m²K, por lo que resistencia exterior calculada para la cámara de aire de la fachada ventilada es de **R_{ext-FV}=0,146 m²K/W**, valor próximo al valor de la resistencia interior normativa de 0,13 m²K/W que recomienda la norma UNE-EN-ISO 6946 "método de cálculo de resistencia y transmitancia térmica de los elementos y componentes de la edificación" que se utilice para fachadas ventiladas.
- De acuerdo al modelo de caja gris, el valor de la resistencia superficial exterior equivalente para las condiciones a las que ha estado sujeta la fachada (R_{ext}) es de 0,0785 m² K/W. Siendo este un valor intermedio entre una resistencia superficial externa recomendado para las fachadas ventiladas (0,13 m² K/W) y el valor para una resistencia

externa convencional ($0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$) establecido en la norma UNE-EN-ISO 6946. Este valor está condicionado por la velocidad del viento, por lo que dependiendo del periodo utilizado en la resolución del sistema de ecuaciones, su valor puede variar.

- La R_{ext} del muro base calculada con la relación de $hc = hc = 3,5 + 5,6v_{\text{proximo}}$, es de $0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$. Por lo que la cámara ventilada incrementa la resistencia exterior en $0,06 \text{ m}^2\text{K/W}$. Esto equivaldría en incrementar el aislamiento exterior en un centímetro.
- En el modelo que integra el efecto del sol sobre la fachada, **el sol tiene muy baja influencia** ($\rho = 0,003$), por lo que se puede considerar que en una fachada ventilada de junta abierta, el sol apenas tiene incidencia sobre el flujo de calor hacia el interior.
- La variabilidad intradiaria del flujo de calor a través de la fachada se reduce significativamente con la fachada ventilada, lo que se traduce en unas temperaturas superficiales interiores más estables, mejorando las condiciones de confort interior.
- En el conjunto de la fachada de 3,345 metros de altura y para el periodo estudiado, las pérdidas por los frentes de forjado representan entorno **al 20% de las pérdidas de calor por metro lineal** de fachada tanto antes como después de la rehabilitación y tienen especial importancia por presentar puntos fríos en el interior de la fachada, condicionados por su alta inercia, en los que se pueden producir condensaciones.
- En el **periodo de invierno**, el frente de forjado es siempre perdedor. Tras su **rehabilitación por el exterior las pérdidas de calor se ven reducidas a aproximadamente la mitad**. Cuando la temperatura de consigna interior se mantiene a 20°C , las pérdidas de calor se reducen de 3,5 a $1,2 \text{ W/m}$ lineal de fachada.
- El movimiento del aire en cámara ventilada está más condicionado por el viento que por la radiación solar.
- La temperatura del aire en la cámara puede llegar a estar 10°C por encima de la temperatura exterior en los días con radiación elevada. Esta diferencia de temperaturas, en 8 metros de fachada podría llegar a crear una diferencia de tiro del orden de 3Pa , equiparable a la presión ejercida por una velocidad de viento no perturbado de 2 m/s .