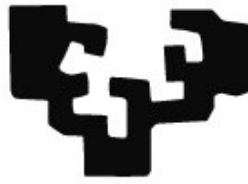


eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea



Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos

Estudio comparativo de Eficiencia Energética: Fachada ventilada frente a Fachada vegetal.

Zaloa Azkorra Larrinaga
(Ingeniero Agrónomo)

Universidad del País Vasco (UPV / EHU), en cumplimiento con los requisitos para el grado de doctor dentro del programa de doctorado Ingeniería Térmica del Departamento de Maquinas y Motores Térmicos.

Directores de Tesis:
Dr. Aitor Erkoreka González
Dr. Miguel Urrestarazu Gavilán

Bilbao, 2015

Resumen- Abstract

En la actualidad se desarrollan multitud de investigaciones relacionadas con la rehabilitación energética lo que la ha convertido en un campo emergente en el sector de la construcción y de la arquitectura.

Nowadays multitude of researches related with energetic rehabilitation had been developed turning this area into an emergent field in the construction and architecture sectors.

El objetivo general de la presente tesis es evaluar la aplicabilidad de diferentes sistemas pasivos de rehabilitación de fachadas y analizar los beneficios de la incorporación de dichos sistemas en el ahorro energético de edificios.

The general objective of this thesis is to evaluate the applicability of different passive systems on energetic rehabilitation of façades in order to analyze the benefits of the incorporation of the above mentioned systems to the energy saving in buildings.

Para ello se han analizado dos soluciones constructivas, fachada ventilada y fachada vegetal con la intención de comparar la mejora en la rehabilitación energética partiendo de un mismo elemento constructivo, en este caso un muro base de hoja doble.

The thesis herein will analyze and compare the improvements of two alternative solutions in energy rehabilitation: ventilated façade and green wall, both of them applied to the same constructive element, double sheet façade.

La comparación se ha realizado mediante el estudio térmico y acústico de las fachadas, analizando posibles mejoras sobre la envolvente desde puntos de vista técnicos.

The comparison has been carried out through an energetic and acoustic study of the façades, analyzing the possible improvements in the envelope from different technical points of view.

Se ha desarrollado un modelo matemático desde una visión térmica, que evalúa los pros y contras a la hora de realizar una propuesta de rehabilitación energética.

Considering the thermal vision of the elements it has been developed a mathematical model which evaluates the pros and cons when performing a proposal of energy rehabilitation.

El estudio ha consistido en analizar dos soluciones constructivas, fachada ventilada y fachada vegetal, parametrizando sus características principales, los rangos de valores de transmitancia térmicas y

The study has consisted of analyzing two constructive solutions, ventilated façade and vegetable façade, evaluating its main characteristics and obtaining values of thermal transmittances and absorptivities. These values

absortividades solares efectivas posibilitando tales datos el cálculo del consumo energético debido a dichos elementos.

Todo el proceso de toma de datos se ha llevado a cabo en una célula de ensayos Paslink y el análisis, así como el modelo matemático y las soluciones se han llevado a cabo bajo una metodología común, de forma que las secciones que componen la tesis están realizadas paralelamente, tanto para el muro base como para las dos propuestas de rehabilitación estudiadas. La definición del modelo matemático se ha realizado de forma similar para facilitar el estudio de las posibles diferencias entre las dos soluciones constructivas y el muro base.

Con el presente modelo y resultados se puede evaluar, el impacto de las mejoras propuestas en la eficiencia energética, permitiendo así una optimización de las medidas planteadas para la mejora del edificio existente.

Por otro lado también se ha llevado el análisis y determinación de la absorción y aislamiento acústico aéreo de una fachada vegetal para el estudio y caracterización acústica de este tipo de elemento constructivo. Los resultados en esta área pueden abrir nuevas líneas de investigación de las fachadas vegetales lo que permitirá aumentar su uso.

will enable the calculation of the energy consumption.

The whole data capturing process has been carried out in a Paslink test cell and the analysis of the information as well as the mathematical model and the solutions have been considered under a common methodology so that the sections that compose the thesis are implemented in parallel for the base wall and also for the two studied rehabilitation proposals. The definition of the mathematical model has been calculated in the same way, making easier the study of the possible differences between the base wall and the two constructive solutions.

With the present model and results it is possible to evaluate the impact of the proposed improvements in the energy efficiency allowing in this way an optimization of the existing building based on the technical proposal analyzed.

On the other hand, the absorption and sound insulation of a green facade has also been analyzed trying to determinate and characterize the acoustics of this type of constructive element. The results in this area may open new research lines of the green façades which will increase its use in the construction sector.

En definitiva, con el fin de promover la mejora de la eficiencia energética de edificios existentes mediante soluciones innovadoras, se ha desarrollado una metodología de estudio que facilita al proceso de toma de decisiones que permitirá comparar diferentes soluciones constructivas de fachada. Todo ello, permitirá comparar los resultados obtenidos con otros sistemas constructivos y esto a su vez facilitará la toma de decisiones en la fase de diseño o rehabilitación de fachadas.

Finally, in order to promote the improvement of the energy efficiency on existing buildings through innovative solutions, a new methodology of study has been developed facilitating the decision making process and allowing the comparison of the alternatives façades. This methodology will enable to put together and equate the results of the evaluated solutions with alternative constructive systems. In this way it will be easier to determine the optimum constructive element during the design phase or during the façade rehabilitation phase.

Palabras clave:

Fachada vegetal, fachada ventilada, aislamiento térmico, célula Paslink, absorción acústica, rehabilitación energética, eficiencia energética.

Agradecimientos

*Muxu bat ama, aita, lagunak
neba, aiton-amonak
eta Jorge zuri mila esker
zure lanak badu sona
Aitor, Miguel, Bilboko eskola
to besarkada sakona
Gasteiz ta Italiako saltseroei
orakada ez da broma
Bihotzatikan agurtu nahi det
maite dudan jende ona
ingurukoek emandakoak
osatzen baitu pertsona.*

¿Qué haría yo sin lo absurdo y lo fugaz?"

Frida Kahlo (1907-1954)

Tabla de contenidos

Resumen- Abstract.....	1
Agradecimientos	5
Tabla de contenidos.....	9
Abreviaciones y Nomenclatura	17
CAPÍTULO 1	23
OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	23
1 Introducción	25
2 Objetivos	26
3 Metodología	28
CAPÍTULO 2	32
ESTADO DEL ARTE	32
1 Introducción a la rehabilitación energética de edificios	34
2 Fachadas vegetales.....	36
2.1 Introducción y definición.....	36
2.2 Antecedentes sobre sistemas constructivos	36
2.3 Beneficios.....	40
2.3.1 Aislamiento y regulación térmica de los edificios	40
2.3.2 Aislamiento acústico y absorción o reducción de ruido	46
2.3.3 Aumento de la biomasa de la ciudad	48
2.3.4 Mejora visual del edificio	51
2.3.5 Beneficios para la salud	52
2.3.6 Reducción del efecto isla de calor urbano	53
2.3.7 Protección contra inundaciones.....	55
2.3.8 Protección frente a la radiación solar. Sombra.....	56
2.3.9 Mejora de la calidad del aire	56
2.3.10 Mejora de la calidad del aire interior	59
2.4 Tipos de sistemas verticales vegetales.....	61
2.4.1 Fachadas vegetales tradicionales.....	61
2.4.2 Fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal	61
2.4.3 Jardineras perimetrales.....	61
2.4.4 Paredes vivas	62

3 Fachadas ventiladas.....	62
3.1 Introducción y definición.....	62
3.2 Antecedentes sobre sistemas constructivos	63
3.3 Beneficios	65
3.4 Tipo de sistemas de fachada ventilada.....	66
3.5 Modelos de análisis numéricos de fachadas ventiladas.....	68
4 Caracterización térmica de componentes de edificios en células de ensayo calorimétricas.	69
4.1 Células de ensayo calorimétricas.....	69
4.2 Estudio en estado estacionario.....	71
4.2.1 Método de la media o del promedio.....	71
4.2.2 Análisis de los parámetros en las células PASSYS	73
4.3 Estudio Dinámico.....	76
4.3.1 Análisis de los parámetros en las células PASLINK	77
4.3.2 Método parámetros concentrados (RC).....	81
4.3.3 Modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas (SDE).....	89
5 Conclusiones.....	97
CAPÍTULO 3	103
ESTUDIO DE LOS COMPONENTES E INSTRUMENTACIÓN.....	103
1 Introducción	105
2 Objetivos del capítulo.....	106
3 Definición de los componentes de ensayo	107
3.1 Composición y características del muro base de doble hoja.....	107
3.2 Composición y características de la fachada ventilada	110
3.3 Composición y características de la fachada vegetal	112
3.3.1 Módulo vegetal	113
3.3.2 Estructura de anclaje	114
3.3.3 Sistema de riego y drenaje.....	115
3.3.4 Vegetación.....	116
3.3.5 Sustrato	118
3.3.6 Montaje.....	118
4 Descripción e Instrumentación de la célula de ensayo Paslink.....	118
4.1 Descripción de la célula de ensayo Paslink.....	118
4.2 Proceso de adquisición y tratamiento de datos	120
4.3 Equipos de medida de temperatura interior.....	122
4.3.1 Medida de temperatura del aire interior	122
4.3.2 Medida de temperatura de las superficies interiores	125

4.4	Equipos de medida de temperatura exterior y datos climatológicos.....	128
4.4.1	Medida de temperatura exterior.....	128
4.4.2	Medida de radiación solar.....	130
4.4.3	Medida de CO ₂	133
4.4.4	Medida de otros datos meteorológicos.....	135
4.5	Medida de Potencia y de las HFS Tiles.....	138
4.5.1	Transductor de potencia.....	139
4.5.2	Diseño de las HFS Tiles.....	142
5	Instrumentación de los componentes de las soluciones constructivas.....	150
5.1	Instrumentación de la fachada ventilada.....	150
5.1.1	Medida de temperatura superficial en las diferentes capas.....	154
5.1.2	Medida de temperatura y velocidad en la cámara de aire.....	164
5.1.3	Resumen de las temperatura de las diferentes capas.....	166
5.1.4	Medida de radiación solar y velocidad en la cámara de aire.....	167
5.1.5	Medida del flujo de calor en las diferentes capas.....	168
5.1.6	Medida de la humedad relativa en las diferentes capas.....	170
5.2	Instrumentación de la fachada vegetal.....	172
5.2.1	Medida de temperatura superficial en las diferentes capas.....	176
5.2.2	Medida de temperatura y velocidad en la cámara de aire.....	185
5.2.3	Medida de la temperatura del sustrato.....	187
5.2.4	Medida de la temperatura en la superficie foliar.....	188
5.2.5	Resumen de las temperatura de las diferentes capas.....	190
5.2.6	Medida del flujo de calor en las diferentes capas.....	190
5.2.7	Medida de la humedad relativa en las diferentes capas.....	192
6	Conclusiones.....	194
	CAPÍTULO 4.....	199
	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: DESCRIPCIÓN DE LAS MONITORIZACIONES.....	199
1	Introducción.....	201
2	Objetivos.....	202
3	Descripción de las monitorizaciones.....	203
3.1	Etapas de monitorización.....	203
3.2	Secuencias de Ensayo.....	205
3.3	Secuencia ROLBS (Randomly Ordered Logarithmically Binary Sequence).....	206
3.3.1	SECUENCIA I: Muro base-Julio 2012.....	206
3.3.2	SECUENCIA II: Fachada ventilada-Agosto 2012.....	208
3.4	Secuencia PRBS (PseudoRandom Binary Sequence).....	211
3.4.1	SECUENCIA III: Muro base-Junio 2012.....	211
3.4.2	SECUENCIA IV: Fachada ventilada-Agosto 2012.....	213
3.4.3	SECUENCIA V: Fachada vegetal Enero 2013.....	216

3.4.4	SECUENCIA VI: Fachada vegetal Agosto 2013	219
3.4.5	SECUENCIA VII: Fachada vegetal Octubre 2013	222
3.4.6	SECUENCIA VIII: Fachada vegetal Octubre 2013.....	224
3.4.7	SECUENCIA IX: Fachada vegetal Febrero 2014.....	227
3.4.8	SECUENCIA X: Fachada vegetal Mayo 2014.....	230
3.4.9	SECUENCIA XI: Fachada vegetal Julio 2014.....	233
3.4.10	SECUENCIA XII: Fachada vegetal Diciembre 2014.....	236
3.5	Secuencia potencia constante	238
3.5.1	SECUENCIA XIII: Fachada vegetal Febrero 2014 (300 W).....	239
3.5.2	SECUENCIA XIV: Fachada vegetal Abril 2014 (600 W).....	241
3.6	Secuencia temperatura constante	243
3.6.1	SECUENCIA XV: Fachada vegetal Febrero 2013 (20 °C).....	243
3.6.2	SECUENCIA XVI: Fachada vegetal Enero 2014 (20 °C)	246
3.6.3	SECUENCIA XVII: Fachada vegetal Marzo 2014 (30 °C)	248
3.6.4	SECUENCIA XVIII: Fachada vegetal Junio 2014 (30 °C).....	251
3.6.5	SECUENCIA XIX: Fachada vegetal Agosto 2014 (10 °C).....	253
3.6.6	SECUENCIA XX: Fachada vegetal Noviembre 2014 (35 °C)	256
4	Conclusiones.....	258
CAPÍTULO 5		262
ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA FACHADA VENTILADA FRENTE A UNA FACHADA VEGETAL.....		262
1	Introducción	264
2	Objetivos del capítulo.....	265
3	Cálculo de la resistencia térmica de las fachadas teniendo en cuenta el CTE.....	266
3.1	Características térmicas para un Muro Base de doble hoja	266
3.2	Características térmicas para una Fachada Ventilada.....	268
3.3	Características térmicas para Fachada Vegetal.....	269
4	Método de la media.....	270
4.1	Método de la media para Fachada Vegetal.....	270
4.1.1	Identificación de los parámetros.....	271
4.2	Análisis de los resultados.....	275
4.2.1	Comparación de secuencias de temperatura constante.....	276
5	Modelo RC - caja gris	278
5.1	Definición e identificación del modelo RC.....	279
5.2	Modelo RC para un Muro Base de doble hoja	280
5.2.1	Modelado de los parámetros	280
5.2.2	Identificación de los parámetros.....	286

5.3	Modelo RC para una Fachada Ventilada.....	289
5.3.1	Modelado de los parámetros	289
5.3.2	Identificación de los parámetros.....	292
5.4	Modelo RC para una Fachada Vegetal.....	293
5.4.1	Modelado de los parámetros	293
5.4.2	Identificación de los parámetros.....	296
5.5	Análisis de los resultados.....	298
6	Modelo CTSM.....	299
6.1	Identificación de los parámetros	300
6.1.1	Sistema de ecuación del modelo.....	300
6.2	Modelos SDE para un Muro de doble hoja	301
6.2.1	Modelo de un estado no medido	302
6.2.2	Modelo de dos estados no medidos	306
6.2.3	Test de máxima verosimilitud.....	309
6.2.4	Análisis de los resultados.....	309
6.3	Modelos SDE para una Fachada Ventilada.....	310
6.3.1	Modelo de un estado no medido	311
6.3.2	Modelo de dos estados no medidos	314
6.3.3	Test de máxima verosimilitud.....	318
6.3.4	Análisis de los resultados.....	319
6.4	Modelos SDE para una Fachada Vegetal	321
6.4.1	Modelo de un estado no medido	322
6.4.2	Modelo de dos estado no medidos	327
6.4.3	Test de máxima verosimilitud.....	331
6.4.4	Análisis de los resultados.....	332
6.5	Resultados.....	336
7	Análisis Termográfico.....	340
7.1	Introducción.....	340
7.2	Aplicaciones de la imagen termográfica	341
7.3	Análisis termográfico de fachada vegetal.....	343
7.3.1	Características técnicas.....	343
7.3.2	Análisis termográfico marzo 2014	343
7.4	Análisis de los resultados.....	348
8	Aislamiento y Regulación térmica de edificios.....	350
8.1	Análisis de la reducción de energía en edificios.	350
8.1.1	Muro base.....	352
8.1.2	Fachada ventilada	353
8.1.3	Fachada vegetal.....	354
8.1.4	Análisis de los resultados.....	357
9	Conclusiones.....	358

CAPÍTULO 6	365
ESTUDIO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO Y ABSORCIÓN ACÚSTICA DE UNA FACHADA VEGETAL.....	365
1 Introducción	367
2 Objetivos del capítulo.....	368
3 Estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de una fachada vegetal	368
3.1 Construcción de la muestra ensayada	368
3.2 Descripción de la muestra analizada.....	369
3.3 Recinto de ensayo y Equipos de medida.....	370
3.3.1. Descripción de las cámaras y condiciones del ensayo.....	370
3.3.2. Equipos de medida utilizados	372
3.4 Metodología.....	373
3.4.1. Adquisición y tratamiento de datos	374
3.5 Resultado ensayo aislamiento a ruido	375
4 Estudio de la absorción acústica de una fachada vegetal.....	377
4.1 Descripción de la muestra analizada.....	377
4.2 Recinto de ensayo y Equipos de medida.....	378
4.2.1. Descripción de la cámara reverberante y Condiciones del ensayo	378
4.2.2. Equipos de medida utilizados	379
4.3 Metodología.....	380
4.3.1. Adquisición y tratamiento de datos	382
4.4 Resultados ensayo absorción a ruido.....	383
5 Análisis de los resultados	385
6 Conclusiones.....	387
CAPÍTULO 7	390
CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y TRABAJO FUTURO	390
1 Conclusiones y Contribuciones	392
2 Líneas futuras de trabajo	397
2.1. Integración del comportamiento térmico de fachada vegetal a todo el edificio....	397
2.2. Estudio económico de una fachada vegetal	398

ANEXOS	I
Anexo 1. Sistemas verticales vegetales	I
1.1. Fachadas vegetales.....	I
1.1.1. Fachadas vegetales tradicionales.....	I
1.1.2. Fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal	II
1.1.3. Fachada vegetal perimetral.....	XII
1.2. Pared viva-Living wall.....	XIII
1.2.1. Muros vegetales modulares	XIII
1.2.2. Sistema Filtros Geotextiles.....	XXXVI
1.3. Sistemas de contención con muros vegetales.....	XLII
1.3.1. Sistemas Tresma Verde.....	XLII
1.3.2. Sistema Hercules	XLIII
1.3.3. Sistema Drivable Grass	XLIV
1.4. Pantallas antirruído con muros vegetales.....	XLV
1.4.1. Barreras antirruído de madera.....	XLV
1.4.2. Barrera de hormigón y vegetación.....	XLVI
1.4.3. NoinStop green.....	XLVII
Bibliografía.....	i

Abreviaciones y Nomenclatura

Abreviaciones

ASHRAE	Stands for the American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
CH	Canal. Puede ser de las baldosas HFS o del sistema de adquisición de datos.
COMPASS	
CTE	Código Técnico de la Edificación
CTSMLM	Nombre de un programa informático: Continuous Time Stochastic Linear Modelling
CTSM	Nombre de un programa informático: Continuous Time Stochastic Modelling
EGUZKI	Celda de ensayo calorimétrica
ENEDI	Grupo energética en la edificación UPV-EHU
HFS	Sensor de flujo de calor (Heat Flux Sensor)
IDAE	Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía
ILARGI	Celda de ensayo calorimétrica
INE	Instituto Nacional de Estadística
LCCE	Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación
LORD	Nombre de un programa informático: Logical R-Determination
MATLAB	Programa matemático de laboratorio de matrices
ML	Máxima verosimilitud. (Maximum Likelihood)
OEM	Método de estimación de errores-Output error method
OMS	Organización mundial de la salud
PAS	Célula pseudo adiabática. (Pseudo adiabatic shell)
PASLINK	PASSYS LINK to Industry
PASSYS	Componentes solares Pasivos y prueba del sistema (Passive Solar Components and System Testing)
PEM	Método de predicción de Error (Prediction Error Method)
PRBS	Secuencia binaria pseudoaleatoria (Pseudorandom Binary Sequence)
RH	Humedad relativa (Relative Humidity)
ROLBS	Secuencia binaria logarítmica distribuida aleatoriamente (Randomly Ordered Logarithmic distributed Binary Sequence)
SAI	Sistema de alimentación ininterrumpida
SDE	Modelo ecuación diferencial estocásticas

Nomenclatura

A	Área
a	Apertura de un flujo de calor en modelos de LORD y CTSM
a	Difusividad térmica
B	Es la matriz de entrada: un conjunto de funciones lineales "n x m" de un modelo de espacio estado
C	Es la matriz de salida: un conjunto de "l x n" funciones lineales de un modelo de espacio de estado.
C	Capacidad térmica
C	Velocidad propagación sonido
D	Es la matriz de transmisión directa: un conjunto de "l x m" funciones lineales de un modelo de espacio de estado.
e	Espesor
e	Un proceso de ruido blanco unidimensional que representa el error de medición y de distribución normal con cero de media y varianza
f	Conjunto de funciones no lineales de "n" de un modelo de espacio de estado.
Gv	Intensidad de la radiación solar incidente
g	Transmitancia solar
H	Conductividad térmica
H	Conjunto de "l x l" funciones lineales o filtros de un modelo lineal general.
hse	Coefficiente superficial de transferencia de calor
hse	Fachada vegetal: Coeficiente combinado de transferencia de calor
I	Irradiación solar
L	Función de verosimilitud (Likelihood function)
m	Masa
N	Longitud de las series de datos.
N	Tiempo
n	Periodo de tiempo
P	Potencia eléctrica
P	Presión
Q	Transferencia de calor y calor sensible
q	Flujo de calor
R	Resistencia térmica
R	Índice de reducción sonora
T	Temperatura
T	Tiempo reverberación

T_e	Temperatura exterior
T_i	Temperatura interior
t	Tiempo
U	Coefficiente de transferencia de calor. Transmitancia térmica.
UA	Cantidad de flujo de calor
u	Vector de "m" variables de entrada del modelo. Puede ser discreta forma Reino Unido o ut forma continua tiempo.
V	Volumen
V	Función objetivo
W	Velocidad del viento
x	Vector de "n" variables de estado del modelo. Puede ser x_k de forma discreta o continua tiempo forma x_t .
y	Vector de "l" mide las variables de salida del modelo. Generalmente discretas forman y_k pero tiempo continuo se puede formar y_t .

Letras Griegas

α	Absortividad
α	Índice absorción sonora
β	Ángulo de incidencia solar
Δ	Incremento
ε	Error
ε	Emisividad de la superficie
Λ	Matriz de covariancia de ruido de dimensiones "l x l".
λ	Conductividad térmica
ρ	Densidad
η	Eficiencia energética
σ	Constante de (No Reference Selected) Stefan-Boltzmann : $5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
τ	Constante de tiempo

"Soy de las que piensan que la ciencia tiene una gran belleza. Un científico en su laboratorio no es sólo un técnico: es también un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas."

Marie Curie (1867-1934)



CAPÍTULO 1

OBJETIVOS Y METODOLOGÍA



RESUMEN

En este primer capítulo se presentan los objetivos del trabajo de investigación presentado en esta tesis, así como una breve introducción a la estructura y metodología desarrollada a lo largo de la tesis para alcanzar dichos objetivos.

ABSTRACT

The main objectives of this thesis are presented in this Chapter 1, as well as a brief introduction about the structure and methodology followed to achieving mentioned objectives.

1 Introducción

La investigación desarrollada a lo largo de esta tesis es parte de las líneas de investigación llevadas a cabo por el Grupo ENEDI (Energética en la Edificación) de la Universidad del País Vasco EHU/UPV en colaboración con la Universidad de Almería.

El ahorro y la eficiencia energética en la edificación forman parte de una estrategia global de aprovechamiento de la energía, dentro de una sociedad que está apostando definitivamente por el desarrollo sostenible como camino a seguir para asegurar un futuro donde las condiciones de vida de la población estén siempre dentro de unos niveles de confort aceptables, y sin que esto tenga una incidencia negativa irreversible en el medio ambiente como causa de la actuación humana.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro de los estudios de investigación llevados a cabo en los últimos años que en líneas generales analizan envolventes energéticamente eficientes y que tiene el confort de los usuarios como objetivo. Todo ello centrado en la caracterización térmica de la fachada vegetal sobre sus efectos térmicos en los edificios y a su vez sobre los efectos medioambientales en las ciudades. La integración de sistemas vegetales en arquitectura puede ser empleada como instrumento para incrementar las áreas verdes en las ciudades, posibilitando el diseño de envolventes que promuevan el ahorro energético, aumento de la biodiversidad urbana y biomasa vegetal.

Dentro de este estudio se pueden abarcar varios campos, desde el más amplio de todos como puede ser el que trate sobre el urbanismo en su conjunto, pasando por el que trate sobre los edificios de forma individual, hasta llegar a los diferentes componentes constructivos individuales que los conforman. Es sobre el estudio de algunos de estos componentes constructivos sobre lo que se desarrollará el presente trabajo.

En concreto, se evaluará un muro de hoja doble, sobre el que se llevará a cabo una rehabilitación energética. En primer lugar mediante la instalación de una fachada ventilada ligera cerámica y en segundo lugar mediante una fachada vegetal modular. Todos estos componentes serán caracterizados y analizados desde un punto de vista energético estudiando sus características y comportamientos térmicos.

2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es evaluar la eficiencia energética y la aplicabilidad de los sistemas de vegetación vertical modular de fachadas y analizar los beneficios de la incorporación de dichos sistemas pasivos en el ahorro energético de edificios, tanto en nuevas edificaciones como en la rehabilitación energética de fachadas.

Es un hecho que la arquitectura residencial más influyente, es decir, proyectada por autores reconocidos como Geoffrey Bawa, Bruno Stagno, Enrique Browne y Emilio Ambasz entre otros, empiecen a utilizar superficies vegetadas reivindicando la vegetación como un valor arquitectónico de primer orden.

La actual investigación está enfocada a la mejora del comportamiento energético mediante el uso de los cerramientos vegetales, ya que su uso aún lejos de minimizarse, constituye una tendencia arquitectónica. Esto justifica la actual investigación en la mejora del comportamiento energético de cerramientos.

Una de las dificultades fundamentales en el desarrollo de esta investigación es precisamente la medición y cuantificación de la eficiencia energética de los cerramientos en los edificios. La complejidad del fenómeno de los intercambios térmicos desde el punto de vista pasivo, es decir sin la alteración de sus condiciones de exposición a la intemperie, es muy importante y lo es aún más si se le añaden las operaciones de evapotranspiración donde el problema se complica considerablemente.

Por tanto no solo es interesante el objetivo general del estudio de la eficiencia energética en las fachadas vegetales sino también la puesta a punto de métodos de estudio prácticos y eficaces para determinar las prestaciones energéticas de diferentes tipos de fachadas.

Junto con el objetivo principal se plantean de forma complementaria otros que se mencionan a continuación:

- Evaluar y comparar los principales sistemas que existen en el ámbito de la rehabilitación de fachadas (fachada ventilada, fachada vegetal) y evaluar los beneficios e inconvenientes de cada uno de ellos, de manera que permita comparar los resultados con otros sistemas y facilite la toma de decisiones en la fase de diseño o rehabilitación de fachadas
- Realizar mediciones y modelos de eficiencia energética y evaluar los beneficios de las fachadas vegetales verticales como sistema pasivo de ahorro de energía en la edificación. Para ello se llevará a cabo la caracterización de un sistema constructivo de fachada vegetal.
- Aplicar y evaluar la utilidad y los beneficios de las fachadas vegetales en el aislamiento, absorción acústica y calidad ambiental.
- Comparar las estimaciones de las diferentes soluciones constructivas de rehabilitación de fachadas obtenidas mediante imágenes termográficas con las predicciones realizadas mediante modelos matemáticos de tipo continuo y analizar la incorporación de dichas estimaciones a este tipo de modelos.

La mejora de la eficiencia energética a lo largo de esta tesis puede enfocarse, bajo la perspectiva de la reducción de las superficies opacas tradicionales con el objetivo de sustituirlas por fachadas vegetales y aumentar así las prestaciones generales de la envolvente.

La justificación del objetivo de esta tesis desde el punto de vista de su oportunidad y de su viabilidad en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad del País Vasco EHU/UPV, reside en las siguientes razones:

- Es novedosa: los sistemas de fachada vegetal aún se encuentran en fase de desarrollo tecnológico y se espera que en los próximos años se trabaje en la

optimización de los existentes y en el desarrollo de nuevos prototipos; por lo que el campo de estudio se presenta totalmente abierto. El estado de la técnica no se ha estudiado lo suficiente y se han encontrado tanto déficits como lagunas en el estudio de la eficiencia energética de fachadas vegetales en estado dinámico.

- Es interesante: puesto que se trata de la mejora de la eficiencia energética en los cerramientos, sin renunciar a la vegetación y biodiversidad como valor fundamental arquitectónico y medioambiental.
- Es viable: esta investigación es posible y ha sido factible gracias a los medios disponibles en la Universidad del País Vasco en el grupo de Investigación ENEDI y a la Universidad de Almería, respectivamente.

3 Metodología

El trabajo que se presenta en esta Tesis se divide en siete capítulos más un resumen, bibliografía y anexo.

A lo largo del primer capítulo (“Objetivos y metodología”), se presenta la introducción, además de los objetivos y la metodología llevada a cabo a lo largo de la tesis.

El capítulo dos (“Estado del arte”) incluye el análisis de las envolventes vegetales a lo largo de la historia, junto a su desarrollo tecnológico, para posteriormente examinar su papel actual y el estado de las investigaciones más relevantes. En este segundo capítulo, también se describe el estado del arte de las investigaciones experimentales y teóricas llevadas a cabo sobre el estudio de fachadas ventiladas. Finalmente en este capítulo se incluye el análisis de las técnicas empleadas en los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para el avance de la investigación.

En el capítulo tres (“Estudio de los componentes e instrumentación”) se describen los componentes que forman el muro base de hoja doble, así como, la fachada ventilada y la fachada vegetal. Posteriormente se describen las características, precisión y ubicación de la instrumentación utilizada en los ensayos llevados a cabo.

En el capítulo cuatro (“Metodología experimental: descripción de las monitorizaciones”) se detallan la metodología y la monitorización llevadas a cabo sobre las envolventes

objeto del estudio, para finalmente presentar el análisis de los resultados obtenidos de la toma de datos.

En el quinto capítulo (“Estudio del comportamiento térmico de una fachada vegetal frente a una fachada ventilada”), se han definido las metodologías empleadas para la creación de modelos matemáticos e identificación de parámetros térmicos mediante tres metodologías. La primera mediante el método de la media, la segunda con modelos RC y finalmente con modelos CTSM. Posteriormente, se generan modelos que describen el funcionamiento detallado de la fachada ventilada y la fachada vegetal.

En el sexto capítulo (“Estudio del aislamiento acústico y absorción acústica de una fachada vegetal”) se realiza la caracterización acústica bajo condiciones controladas de laboratorio de una fachada vegetal modular y se presentan los resultados de los ensayos de aislamiento acústico y absorción acústica.

En el capítulo siete (“Conclusiones, contribuciones y líneas futuras de trabajo”) se resumen y comentan los resultados obtenidos en las diferentes etapas del trabajo junto a las contribuciones aportadas más relevantes. Para terminar finalmente se exponen los temas o líneas de investigación que han quedado abiertas para futuras investigaciones

*"El valor verdadero es ir detrás de todos sus sueños.
Aún cuando dicen que es imposible".*

Cora Coralina (1889-1985)



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

RESUMEN

Éste capítulo presenta la introducción de esta Tesis. Incluye una breve referencia a los efectos y las motivaciones de la rehabilitación energética para después presentar una revisión bibliográfica de las características, tipos y tecnologías disponibles de las fachadas vegetales y las fachadas ventiladas así como, de ensayos y metodología en células Paslink.

ABSTRACT

This chapter presents the introduction of this Thesis. It starts with a brief mention to the effects and motivations of energy renovations in buildings. Afterwards, a literature review of different green walls: available technologies and usual strategies; ventilated façade and Paslink cells methodology

1 Introducción a la rehabilitación energética de edificios

El crecimiento y desarrollo desmesurado de la mayoría de las ciudades europeas ha llevado a una situación de falta de suelo sobre el cual construir nuevas zonas verdes. A esto, hay que sumarle la creciente preocupación por la crisis energética mundial.

Los cambios realizados en los ecosistemas han contribuido a obtener beneficios netos en el bienestar humano y el desarrollo económico, pero estos se han obtenido con costos reflejados en la degradación de muchos de los ecosistemas. Por ello, es necesario la búsqueda de nuevas fórmulas que, basadas en sistemas tecnológicamente avanzados, permitan aumentar la masa vegetal de la ciudad y con ella, los beneficios ambientales que ésta aporta.

El 40 % del consumo total de energía en la Unión Europea corresponde a los edificios [2]. Por ello, la reducción del consumo de energía en el sector de la edificación forma parte de las medidas prioritarias a llevar a cabo para reducir el consumo energético de las viviendas y al mismo tiempo, conllevaría a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Todo ello permitirá cumplir con el Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

El 55% del consumo total de energía en los edificios se utilizan para la climatización de los edificios ya sea calefacción en invierno o refrigeración en verano [3]. Los investigadores, arquitectos y hasta los propios habitantes de los edificios y ciudades

cada vez están más involucrados en la búsqueda de alternativas sostenibles para conseguir reducir el consumo de energía de los edificios. La reducción del consumo de energía y un mayor uso de energía procedente de fuentes renovables pueden suponer una importante seguridad en el abastecimiento energético y el desarrollo tecnológico y ofrecer oportunidades de empleo [1]

No existe una solución simple a estos problemas, ya que provienen de la interacción de muchos retos, entre los que se incluyen el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y la degradación del suelo, siendo cada uno de ellos de difícil gestión. Las acciones emprendidas en el pasado para aminorar o revertir la degradación de los ecosistemas han generado importantes beneficios, pero esas mejoras, por lo general, no han mantenido el mismo ritmo que las crecientes presiones y demandas. Existe un enorme espacio para la acción, desde de las instituciones e iniciativas ya existentes, pueden contribuir a disminuir la severidad de esos problemas en las próximas décadas.

Una de las posibles alternativas es la fachada vegetal. Las fachadas vegetales son jardines adaptados a los muros verticales, consistentes en disponer una capa base (ya sea sustrato, fieltro, celosía, cable, módulo...) sobre un muro para permitir el desarrollo de las plantas. Existen diversas técnicas y procedimientos para conseguir el crecimiento de las plantas en vertical, permitiendo la adaptación a distintas extensiones y formas de muros.

En las ciudades de hoy en día el espacio horizontal ya está ocupado, pero si algo sobra son las fachadas y paredes medianeras. Estas superficies pueden ser plantadas y pueden servir como soporte para construir las zonas verdes de la ciudad. Aunque las fachadas no se puedan explotar como espacio de uso, si se pueden utilizar para mejorar la calidad de vida de las ciudades.

Las ciudades del siglo XXI deben ser tratadas desde una nueva perspectiva ecológica. Los jardines verticales son una manera de aumentar exponencialmente la biomasa vegetal de una ciudad y contribuir así a la mejora ambiental global. Aun más, sus aportaciones ambientales alcanzan por igual tanto a las personas que viven o trabajan en los edificios donde están instalados, como a los habitantes de la ciudad.

A lo largo de esta Tesis, se demuestra la viabilidad tecnológica y económica de las fachadas vegetales para reducir drásticamente el impacto ambiental de las edificaciones en el medio urbano, aplicable tanto a obra nueva como a rehabilitación, mejorando al mismo tiempo su confort y habitabilidad.

2 Fachadas vegetales

2.1 Introducción y definición

Desde los orígenes de las civilizaciones, ha existido una estrecha relación entre la Naturaleza y los espacios habitados por el hombre. La arquitectura y la vegetación han estado estrechamente unidas debido a la necesidad humana de integrarse, participar, transformar y convivir con el entorno natural.

En los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas más rápida y extensamente que en ningún otro período de tiempo comparable de la historia humana. La fuerte urbanización, creciente industrialización y los consiguientes procesos de urbanización han hecho evidente el problema de salud ambiental [5]. Bajo este escenario, la construcción de espacios verdes en las ciudades se contempla como una posible solución frente a las malas condiciones higiénicas en las que se encuentran los barrios densamente poblados de las urbes. La introducción de espacios verdes en los edificios puede suponer un beneficio en la salud ambiental de las ciudades y ser capaz de proporcionar ambientes más sanos.

2.2 Antecedentes sobre sistemas constructivos

La historia y evolución del jardín vertical vegetal no son fáciles de analizar debido a que muchas de las construcciones del pasado han sido destruidas, como los míticos jardines de Babilonia. Por otro lado, no es hasta el siglo XIX cuando se vuelve a mostrar un interés no sólo estético sino también funcional por este tipo de instalaciones. La vegetación ha servido a los diseñadores y arquitectos a modificar, crear y transformar las ciudades.

Las descripciones más antiguas, que datan del 2600 a.C., provienen de Egipto y Persia. Éstas se refieren a patios y huertos integrados en viviendas, que ofrecían

confort mediante la sombra y autoabastecimiento mediante la cosecha de las mismas.

Históricamente, los jardines colgantes más célebres son los de Babilonia (Bab-ilim o Babil, Puerta de Dios o del Edén). Este complejo fue construido por deseo de Nabucodonosor II (605 / 562 a.C.), quien lo hizo erigir de modo de exuberante vegetación para simbolizará el Paraíso (Fig 2.1). Actualmente se considera como una de las siete maravillas del Mundo Antiguo.

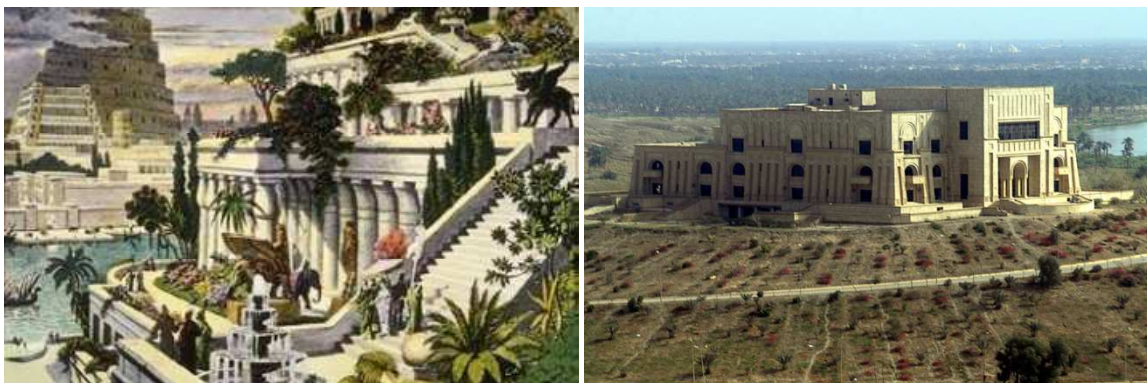


Fig. 2. 1.Izda. Los jardines colgante de Babilonia, del siglo XVI., Interpretación del pintor Danés Maarten van Heemskerck. Fuente : wikipedia.org . Dcha. Imagen actual de las ruinas de Babilonia. Fuente : wikipedia.org.

Los jardines ocupaban una superficie aproximada de 1600 m², consistían en una serie de terrazas sobre un fondo impermeable, con un estrato de material drenante y con un metro de terreno de cultivo. Mediante un mecanismo de riego, se aseguraba un constante flujo de agua para regar los cultivos y árboles.

Los jardines verticales existían ya en la América precolombina y en la arquitectura de la antigua India, en forma de abruptas terrazas. Respecto a Europa, ya desde el siglo IX a.C. las poblaciones locales en Islandia solían cubrir el techo de las viviendas con tierra y césped para aumentar el aislamiento del edificio y de esta forma evitar que la nieve se acumulara encima del mismo. También es destacable la aportación de la cultura romana a la arquitectura vegetal.

En Italia, las primeras cubiertas verdes se remontan a los Etruscos. Desde el siglo IV a.C. adornaban sus monumentos funerarios con cúmulos de tierra donde plantaban árboles. No utilizaban los jardines para el esparcimiento y el descanso, ya que tenían de él un concepto religioso y funerario y por ello dedicaban su uso preferentemente a

monumentos al culto. Algunas de estas construcciones han permanecido hasta nuestros días, como la necrópolis de la Banditaccia, en Cerveteri (Roma). Otros ejemplos destacados del uso de cubiertas verdes en los monumentos funerarios de la Antigüedad son los mausoleos de los emperadores Augusto (29 a.C.) (Fig 2.2. Izda) y Adriano (13 d.C.), de 87m y 64m de diámetro respectivamente. Al igual que las tumbas etruscas, fueron adornados con cúmulos de tierra en los que se plantaban especies vegetales.

En esta misma época, los sistemas vegetales también se integraban en las construcciones civiles como por ejemplo la Villa Adriana en Tivoli (Fig 2.2. Dcha.). En ella la vegetación crecía en vertical mediante estructuras en pérgola dando lugar a elegantes armazones capaces de integrar Naturaleza y Arquitectura, siendo el más grande ejemplo de jardín tipo alejandrino.



Fig. 2. 2. Izda. Vista aérea del Mausoleo de Augusto Roma Italia (s I a.C) Fuente: [Pinterest.com/Panta Rei](https://www.pinterest.com/PantaRei/). Dcha. Fotografía de la Vila Adriana. Tivoli. Italia. (1455-1461). Fuente: [flickr.com/Jean-Pierre Dalbéra](https://www.flickr.com/photos/Jean-Pierre-Dalbera/)

Tras la caída del imperio Romano y durante el periodo de las invasiones bárbaras, el jardín en general cae en el olvido. En la Edad Media pierde su valor artístico y adquiere función de huerto en los claustros de los conventos. Durante este periodo, también se empleaban jardines colgantes en las murallas de las ciudades, como medida de prevención contra ataques enemigos.

A principios de 1400, gracias al interés por la cultura romana, se vuelve a dar importancia a la función estética de los jardines. A partir de este momento, aparece un doble uso de este tipo de jardines: por un lado, artístico y estético como elemento que contribuye a generar espacios de ocio en las grandes villas, y por el otro, técnico y defensivo como elemento incorporado en las murallas.

El primero en recobrar la arquitectura vegetal romana es Giovanni de Medici quien en 1455 que asignó a Michelozzo la ejecución de la villa Fiesole (Florenia, Italia) que constituyó un cambio decisivo respecto a la arquitectura de la época. La villa deja de ser una sencilla residencia que alojaba a los dueños de los campos próximos para convertirse en una villa artística y de arte. Partiendo de esta innovación, Rosellino, a quien el Papa Pío II en 1460 encargó la realización de el Palazzo Piccolomini (Pienza, Italia), consiguió que la naturaleza del jardín enlazará el espacio interior con la inmensidad del paisaje, siendo la parte más interesante del palacio la que asoma al jardín.

A lo largo de los siglos XVI y XVII se construyen solemnes villas donde el jardín es un elemento de gran protagonismo, como ejemplo la Villa Medici, la Villa Del Este en Tivoli o la Villa Aldobrandini en Frascati. Los jardines colgantes en este momento histórico se diseñan exclusivamente bajo fines estéticos y artísticos.

En las grandes urbes del Renacimiento, siglo XV, casi todas las villas tienen un jardín que, de acuerdo a gustos o modas, puede ser grande o pequeño, secreto o abierto, elemento de conexión con el paisaje o, simplemente, un elemento estético.

En el siglo XVI, la Corona española construyó los primeros espacios públicos, jardines y parques arbolados destinados al paseo a pie y en coches de caballos, en forma de alamedas con fuentes, bancos y monumentos. Entre los primeros y el más antiguo conservado es la Alameda de Hércules de Sevilla (1574 durante los siglos XVI y XVII, el uso decorativo de la vegetación se vio reflejado en las pérgolas en forma de bóveda cubiertas de enredaderas, muy comunes en los jardines franceses y holandeses.

En el siglo XIX, con la aparición de nuevos elementos constructivos de hierro y madera abren nuevas posibilidades expresivas para los jardines verticales, siendo la obra del francés Rector Horeau la más representativa, con sus estructuras ligeras de hierro y cristal que se complementan con jardineras suspendidas a gran altura con flores y plantas.

Durante las primeras décadas del siglo XX, una de las preocupaciones más importantes en la arquitectura residencial es integrar la vivienda y su entorno. Arquitectos alemanes como Muthesius, Maab o Schneider entre otros, destacan por haber aplicado vegetación

como acabado de fachadas para mejorar la habitabilidad de la ciudad, utilizando plantas trepadoras para cuya instalación se utilizaban elementos de soporte.

Desde de la segunda Guerra Mundial hasta nuestros días, se ha buscado la forma de introducir los jardines en las edificaciones. Desgraciadamente los materiales utilizados y las soluciones técnicas adoptadas han sido en su gran mayoría ineficaces para conservar el mantenimiento de la vegetación y asegurar las fachadas vegetales. Esta es la principal razón por la cual se desconfía de las fachadas verticales, aún hoy en día, y se considera como origen de daños y problemas.

Partiendo del deseo de cubrir con vegetación las superficies de nuestras ciudades, a menudo grises y no utilizables de otro modo, en los años 60 en países como Alemania, se comenzó a estudiar materiales y desarrollar tecnologías que pudieran hacer seguro y económico la realización de las fachadas vegetales

Durante estos años nace la que tradicionalmente se llamaría “green architecture”, bajo el impulso socio-cultural ligado a temas medioambientales, donde la naturaleza se concibe como parte integrante del edificio, en sustitución, si es necesario, de los componentes tradicionales de la arquitectura. En este periodo, se observa cómo cada vez más artistas se muestran sensibilizados hacia la protección del medio ambiente, dando lugar a nuevas formas de colaboración entre el arte y la botánica.

En síntesis, se puede decir que las fachadas vegetales, han pasado de ser un simple elemento decorativo, ha adquirir condiciones de tecnología desarrollada.

2.3 Beneficios

2.3.1 Aislamiento y regulación térmica de los edificios

La envolvente exterior del edificio juega un papel fundamental en las demandas de consumos de calefacción y refrigeración ya que es crucial para obtener unas condiciones de confort ambientales adecuadas en el ambiente interior del edificio. No se debe olvidar que el principal objetivo de toda envolvente es crear la separación entre el ambiente exterior y el ambiente interior de la vivienda. Evitando la pérdida de calor climas fríos y el sobrecalentamiento de las superficies externas en climas cálidos.

La característica diferenciadora que proporciona la fachada vegetal en los edificios, es su particular capa protectora, la cual sombrea los elementos de la envolvente frente a la radiación solar. La capa de vegetación protege al edificio de la radiación y reduce las tensiones térmicas de la estructura. De esta forma, la vegetación en fachada ayuda a refrigerar los edificios en verano y a aislarlos ligeramente en invierno.

Las superficies de los edificios pueden ser sombreadas mediante elementos constructivos que no sean vegetales, con sus características térmicas específicas. Frente a ellos, la gran ventaja del uso de la vegetación, tanto en sistemas de fachada como de cubierta ajardinada, es la capacidad que está relacionada con los procesos metabólicos y biológicos que llevan a cabo las plantas, en concreto la fotosíntesis y la evapotranspiración. La eficacia de estos mecanismos depende del tipo de vegetación, tamaño y densidad de las hojas, y varían en función de la estación del año (ver Fig. 2.3).

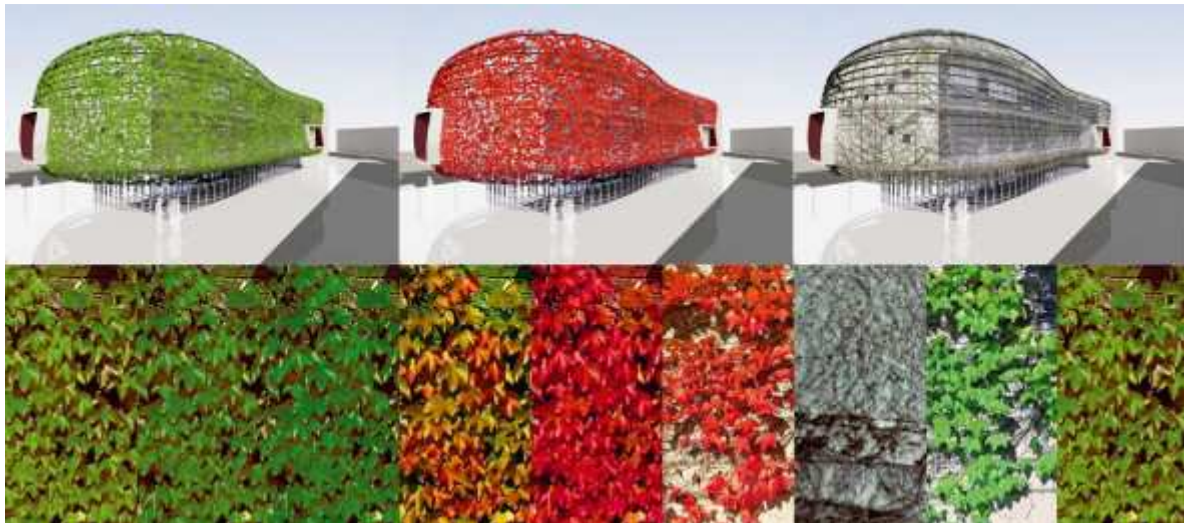
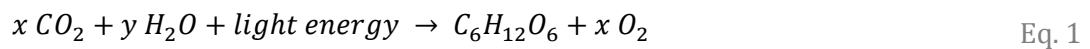


Fig. 2. 3. Representación gráfica de una fachada vegetal a lo largo de las estaciones del año desde invierno al otoño. Fuente: Ayuntamiento de Noain, Pamplona.

La fotosíntesis es un proceso fotoquímico que llevan a cabo las plantas en el cual se sintetizan compuestos orgánicos (principalmente hidratos de carbono) mediante la combinación de dióxido de carbono y agua, la energía necesaria para este proceso bioquímico es de la radiación solar. La reacción fotoquímica de la fotosíntesis no puede ocurrir sin la presencia de clorofila.

La compleja serie de reacciones que implica la fotosíntesis ocurre en dos etapas en los cloroplastos de las plantas. En primer lugar, ocurre el proceso dependiente de la radiación (reacción fotoquímica), este requiere energía radiante directa que excita la clorofila de las hojas (portador de energía) proceso en el cual se consume agua y CO_2 y se libera oxígeno, estas moléculas se utilizan en el segundo proceso, el proceso independiente de luz (etapa de oscuridad-proceso Calvin). Durante la segunda etapa las moléculas de carbono/hidrógeno intermedio se consumen y se generan carbohidratos [6].

Esto indica que la fotosíntesis puede convertir la energía solar en energía química. El proceso global de la fotosíntesis puede ser representada por la siguiente ecuación [7]:



La eficiencia de la fotosíntesis en la conversión de energía solar en carbohidratos para plantas de metabolismo fotosintético C_3 es de 4.6% y para plantas de metabolismo fotosintético C_4 es de 8.5 % [8]. La tasa de producción de carbohidratos es de 3.21×10^{-9} kmol / $m^2 s$ y el calor trasferido al medio ambiente por radiación y convección 6.4 % y 65.3 % respectivamente [6].

El proceso de evapotranspiración, siempre que tenga una cantidad suficiente de humedad en el sustrato, será proporcional al stress térmico. Es decir, en función de las condiciones ambientales de temperatura, humedad, y radiación solar, el mecanismo de enfriamiento biológico será mayor o menor, lo cual afecta directamente a la refrigeración de los edificios.

El 50% energía solar es absorbida y el 30% es reflejada por las hojas y sólo alrededor del 20% de la radiación es capaz de penetrar en la superficie de las fachadas. Esto implica que una fachada cubierta por vegetación es capaz de evacuar el 80% de la energía incidente sobre él, mientras que una fachada tradicional recibirá el 100% de la exposición solar.

Considerando que el aire entre las hojas se mantiene a una temperatura relativamente baja y que la capa de vegetación sombrea la superficie, se consigue que la parte superior del sustrato se mantenga a una temperatura más baja que la temperatura ambiente. Si a esto se le suma la elevada capacidad térmica del sustrato, sobre todo cuando el

contenido de humedad es alto. Se obtiene como resultado un gran potencial de las envolventes vegetales de disminuir la temperatura de la capa exterior de los cerramientos. Este sistema de enfriamiento funciona durante las temporadas cálidas del año.

En las temporadas frías, la evapotranspiración es limitada y la sombra no resulta ser el factor más relevante. Por otro lado, la respiración de las raíces evita el congelamiento de las mismas y mantiene el sustrato en contacto con ellas a una temperatura más elevada que la temperatura ambiente.

A pesar de que el aumento de la resistencia térmica sea limitado [9], la estabilidad térmica y la ausencia de picos bajos de temperatura se reflejan, en mayor o menor medida, en un descenso de las pérdidas térmicas dependiendo del tipo de sustrato utilizado.

La mayoría de los estudios experimentales realizados sobre el comportamiento energético de las envolventes vegetales se basa en comparar las temperaturas superficiales y el flujo de calor que atraviesa un cerramiento convencional y otro con acabado vegetal. A pesar de que la mayoría de las investigaciones se centren en cubiertas verdes, en los últimos años ha aumentado el número de trabajos enfocados a la caracterización del comportamiento térmico de las fachadas.

Eumorfopoulou y Aravantinos (1998) [9], demostraron a partir de un estudio realizado en Grecia que las fachadas vegetales constituyen estrategias de enfriamiento adecuadas para edificios situados en zonas urbanas de la región mediterránea. Al comparar sistemas convencionales de fachada con sistema de fachada vegetal recubiertos de hiedra, todos ellos instalados en un edificio bajo la misma orientación. Se observó que las fachadas con vegetación mantenían las temperaturas mucho más bajas y estables que aquellas sin vegetación. Además, los efectos positivos de las fachadas vegetales eran más significativos en días muy calurosos. Por tanto, su instalación en edificios se pueden considerar como una óptima solución de mejora de las condiciones térmicas interiores.

En otro estudio realizado por Eumorfopoulou y Kontoleon (2009) [10] analizaron la influencia de la orientación de las fachadas vegetales y de la posición de la capa de aislamiento en la demanda de refrigeración de un edificio. Se demostró que, cuando el

edificio contaba con una fachada vegetal, las cargas de refrigeración eran más altas estando colocado el aislamiento en la superficie exterior respecto del caso en el que esta capa se situaba en la superficie interior. Sin embargo, los porcentajes de reducción de la demanda de energía respecto a un edificio sin vegetación variaban en gran medida según la orientación de la fachada en la que se colocaba la capa vegetal, pasando de un máximo del 20.08 % para la orientación oeste a un mínimo de 4.65 % para la orientación norte.

Wong *et al.* (2010) [11], también demostraron que los efectos de las fachadas vegetales en edificios eran muy positivos en condiciones de verano. En este caso, el parámetro de control elegido fue la temperatura media radiante. De todos los casos estudiados, el resultado más llamativo fue la reducción de 10°C la temperatura media radiante bajo unas condiciones determinadas. Se observó que la temperatura de la fachada vegetal era más estable que la temperatura registrada en la fachada sin vegetación.

Pérez *et al.* (2011) [12] centraron su investigación en los efectos provocados por unas pantallas vegetales utilizadas como sistema de sombreado en un edificio situado cerca de Lérída. Las mediciones demostraron que las pantallas vegetales creaban un microclima en el espacio comprendido entre la capa vegetal y el cerramiento, caracterizado por temperaturas más bajas y humedades más altas.

El efecto de enfriamiento debido a las fachadas vegetales fue investigado también por Cheng *et al.* (2010) [13], midieron en términos de flujo de calor entrante en el edificio. Comparando dos fachadas bajo la misma orientación en un edificio, una convencional y otra con paneles vegetales, se observó que la fachada vegetal registraba durante el día flujos por debajo de 10 W/m², mientras que en la fachada convencional el flujo alcanzaba picos de hasta 40 W/m². Por otro lado, respecto a la atenuación del flujo entrante en el edificio, se registraron 4 horas de retardo en el aumento de las temperaturas de la fachada con vegetación respecto de la fachada sin vegetación.

En los últimos años, se han llevado a cabo estudios sobre los efectos de la capa de aire en calma que se crea delante de las superficies vegetales y del sombreado producido por las hojas. En una investigación realizada en Hong Kong, por He y Jim (2010) [14] desarrollaron y validaron un modelo de transmisión termodinámica para simular la

transmisión de calor y las variaciones de temperatura en las superficies vegetales, a fin de ahondar en los efectos de protección solar y sombreado.

Perini *et al.* (2011) [15] llegaron a definir un coeficiente de resistencia térmica superficial para las fachadas vegetales basándose en la reducción de la velocidad del viento en las proximidades de los cerramientos verticales que presentan una capa vegetal. Según los resultados de la investigación, la capa vegetal supondría un aumento de 0.09 m²K/W en la resistencia térmica del cerramiento debido a que el valor de la resistencia superficial exterior, en el caso de las fachadas vegetales, sería equiparable al valor de la resistencia superficial interior.

El estudio realizado por Susorova *et al.* (2013) [16] demostraron que añadir una capa vegetal sobre la fachada en la época de verano puede reducir la temperatura de 0.7 a 13.1 °C, el flujo de calor a través de la pared exterior de 2 a 33 W/m², y mejorar su resistencia térmica efectiva de 0.0 a 0.7 m² K/W. Dependiendo de la orientación de la pared, de la zona climática y de las características de la planta, el índice de área foliar y del coeficiente de atenuación radiante.

En el estudio de una fachada de doble piel realizado por Stec *et al.* (2005) [17] observaron que la temperatura de cada capa que compone la fachada de doble piel es, en general, mucho menor para el caso de plantas que para el caso de la pared o persianas contiguas. Para la misma radiación solar, el aumento de la temperatura de la planta es aproximadamente dos veces menor que para las persianas. Además, la temperatura de la planta nunca sobrepasa la temperatura de 35 °C, mientras las persianas pueden superar los 55 °C.

En el estudio comparativo de una fachada vegetal de plantas trepadoras frente a una fachada convencional realizado por Koyama *et al.* (2013) [18] comprobaron que la temperatura es más baja y que hay mayor porcentaje de humedad en la fachada vegetada que en el resto de fachadas convencionales del edificio. Las viñas de la fachada vegetada regulan y mantiene la temperatura dentro de un rango y convierten la energía solar incidente en calor latente a través del proceso de transpiración, y por lo tanto, la temperatura del aire que rodea las plantas y la temperatura radiante sobre las hojas de las plantas son inferiores a las fachadas no sombreadas por las plantas.

2.3.2 Aislamiento acústico y absorción o reducción de ruido

Debido a sus características, hace años que las plantas y los árboles se utilizan como barreras contra el ruido producido por el tráfico y la contaminación acústica urbana. Las fachadas vegetales tienen efecto de amortiguación y absorción del ruido, pudiendo actuar como pantallas acústicas del mismo modo que son capaces de aislar frente al ruido [19].

Se ha estimado que hasta un 20 % de la población de la Unión Europea está sometida a niveles de ruido por encima de lo aceptable para la salud. Las pantallas acústicas a menudo están hechas de hormigón o tierra. El suelo de las cubiertas ajardinadas o fachadas puede convertirse en una útil barrera al sonido. Una cubierta vegetal puede reducir el sonido dentro de un edificio en más de 8 dB en comparación con un techo convencional [20].

La vegetación, gracias a su capacidad de absorción de ondas sonoras, ayuda a atenuar bajas y altas frecuencias, convirtiendo el sonido en energía. Asimismo, los componentes de las plantas, hojas, ramas y troncos, son capaces de reflejar y difractar el sonido lo que conlleva a un mejor ambiente y confort acústico en las áreas urbanas [21].

En lo que respecta a cubiertas vegetales Van Renterghem y Botteldooren (2008, 2011) [22, 23] estimaron la reducción del ruido urbano entorno a 10 dB posterior a la instalación de una cubierta vegetal extensiva. Connelly y Hodgson (2013) [24] detectaron reducciones de ruido en el interior de edificios de 10 dB, 20 dB en los rangos de baja, media, y mayor de 20 dB, en alta frecuencia, mientras que en otros estudios como el de Yang *et al.* (2012) [25] estimaron que la adición del follaje en los edificios supone una pequeña reducción de ruido por encima de 4 kHz y una absorción de hasta 4 dB de ruido del tráfico rodado.

Por otro lado, en lo que refiere a la capacidad de aislamiento y atenuación de ruido de las fachadas vegetales, el ensayo realizado por Wong *et al.* (2010) [26] sobre ocho tipos de fachadas vegetales (ver Fig.2.4), muestra una elevada atenuación del ruido de frecuencias bajas y medias (entre 5-10 dB), debido al efecto absorbente de sonido del sustrato y la vegetación, siendo menor la atenuación para frecuencias altas (2-3.9 dB). El parámetro de absorción de una fachada vegetal es elevado en comparación con los valores asociados a otros materiales de construcción y mobiliario (dB). A medida que

aumentaba la frecuencia, el coeficiente de absorción acústica también aumentaba y cuanto mayor es la cobertura de vegetación, mayor es el coeficiente de absorción.

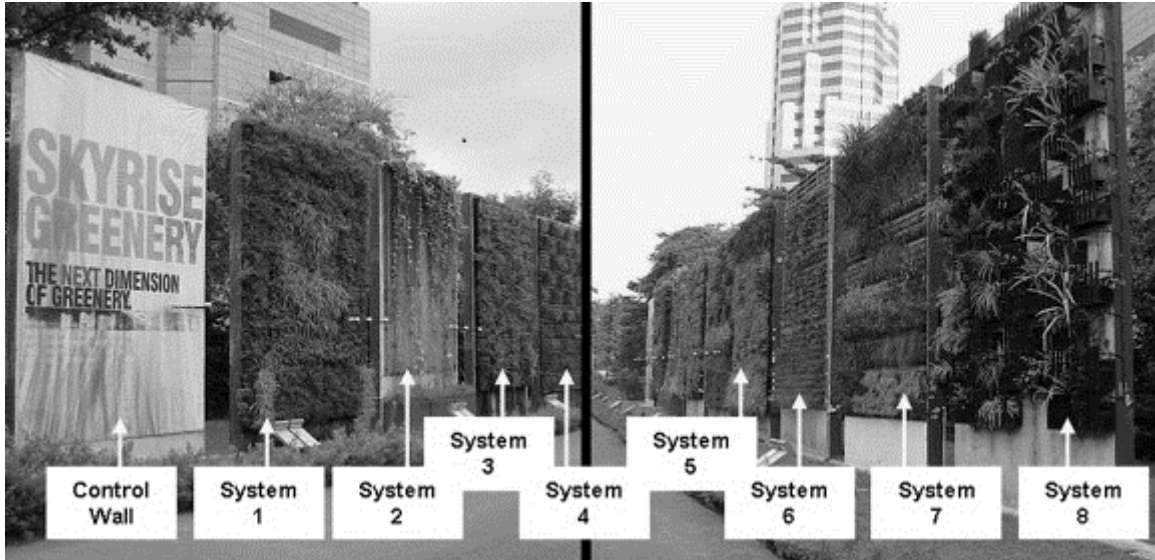


Fig. 2. 4. Muro control y los ocho sistemas de la vegetación verticales en HortPark. Fuente: Wong *et al.* (2008)[26]

Van Renterghem *et al.* (2013) [27] estimaron el efecto máximo de reducción de ruido de las fachadas vegetales en 2 dBA. La utilización de vegetación en la superficie de todo el edificio, es decir en fachadas y cubierta, conduce a una reducción acústica combinada de hasta 4 dBA.

En otro estudio, Connelly y Hodgson (2013) [21] ensayaron los efectos de la vegetación vertical en la mitigación acústica interior. El efecto de la fachada vegetal sobre la mitigación de sonido en las frecuencias de sonido que percibe el oído humano llegó al orden del 2-3 dB. A partir de estos resultados, se puede deducir que las paredes verdes proporcionan buenas capacidades de absorción de sonido, pero la magnitud de su aportación depende del diseño y de los materiales empleados en cada sistema.

Kirill *et al.* (2013) [28] llevaron a cabo un experimento para cuantificar la absorción acústica de cuatro especies diferentes de plantas. De los resultados, se concluye que el coeficiente de absorción de plantas es controlado principalmente por el área foliar, la densidad y la orientación de la hoja (ángulo), de modo que cuanto mayor sea la hoja, la densidad de área y el ángulo de orientación de la hoja, mayores son los valores del coeficiente de absorción acústica. Por otro lado, en el mismo estudio se cuantificó la

capacidad de absorción de diferentes sustratos, analizó para ello dos suelos diferentes: un sustrato de baja densidad y otro de alta densidad (a base de arcilla). La textura de los dos suelos está determinada por el tamaño y distribución del poro que controla sus propiedades acústicas. La primera muestra de sustrato, constituida por fibras, partículas grandes de perlita y polímero de gel, da lugar a poros grandes y, por tanto, influye significativamente en el coeficiente de absorción acústica. La textura de alta densidad del suelo a base de arcilla, formada por partículas que se encuentran estrechamente organizadas y son menores de 2 mm de diámetro, presentan un coeficiente de absorción menor.

En otro estudio llevado a cabo por Yang *et al.* (2012) [25] determinaron que el sustrato y la vegetación juegan diferente papeles en la absorción y dispersión de sonido. En este estudio, se llevaron a cabo una serie de mediciones en una cámara de reverberación para examinar los coeficientes de absorción y dispersión de la vegetación, considerándose diversos factores, tales como la profundidad del suelo, el contenido de humedad del suelo y el nivel de cobertura de la vegetación. Los resultados de diferentes profundidades de sustrato (50, 100, 150, y 200 mm) demostraron que incluso una capa de suelo fino, con una profundidad de 50 mm, proporcionan un coeficiente de absorción significativa de aproximadamente 0.9 a 1000 kHz y que sólo había ligeros cambios en el coeficiente de absorción de aproximadamente 0.1 dB con el aumento de la profundidad del suelo. Se observó una disminución significativa, en aproximadamente 0.6 dB en el coeficiente de absorción acústico, con un aumento del contenido de humedad del suelo. Con el aumento de la cobertura de la vegetación, el coeficiente de absorción aumentó aproximadamente 0.2 dB a bajas y medias frecuencias, mientras que a frecuencias de aproximadamente 2000 kHz, el coeficiente de absorción se redujo ligeramente en aproximadamente 0.1 dB.

2.3.3 Aumento de la biomasa de la ciudad

Previo al desarrollo de las ciudades se encuentran los ecosistemas naturales, formados por plantas y especies animales en equilibrio ecológico dinámico. La construcción de las urbes supone la construcción de calzadas, aceras y edificios que reducen drásticamente la variedad biológica y alteran por lo general la vida de los organismos [29].

Durante la última década, el crecimiento de los ecosistemas urbanos ha demandado gran cantidad de suelo de los ecosistemas cercanos a las ciudades, para garantizar el suministro de materiales, agua y energía necesarios para su funcionamiento, generado una gran presión sobre el resto de ecosistemas [5].

La vegetación vertical tiene un gran potencial en la construcción de paisajes debido a la gran superficie de pared disponible en las ciudades. En Inglaterra, las paredes representan el 10 % de la superficie de suelo urbano total, mientras Grimmond *et al.* (1991) [30] estimaron que esta proporción se eleva hasta el 50 % en una ciudad americana. Se espera que la superficie de las ciudades se duplique para el 2030 por lo tanto, también lo harán las superficie de los edificios.

Las superficies disponibles dependen de la morfología de los edificios y de las ciudades y del contexto socio- económico [31]. Por lo tanto, las construcciones no deberían ser consideradas un obstáculo ecológico, sino grandes aliados para incrementar los espacios verdes para hábitat y refugio de plantas, insectos y animales, aprovechando las superficies de tejado y muros exteriores, sobre todo en zonas densamente pobladas y edificadas [32].

La vegetación asociada a los edificios sirve como refugio a muchas especies animales, tanto de forma permanente o como paso entre las grandes zonas verdes (parques y jardines), lo que mejora la biodiversidad urbana [29].

Existen pocos estudios acerca de la capacidad de aumento de la biodiversidad y biomasa de las envolventes vegetales. Las fachadas y cubiertas vegetales representan técnicas de ingeniería con un notable potencial para la reconciliación ecológica, mediante ecosistemas urbanos seminaturales, al permitir aumentar el potencial de la biodiversidad de los edificios y hacer de la ecología urbana una reconciliación exitosa con la naturaleza [33].

La vegetación vertical se puede considerar como una representación de los hábitats naturales verticales tales como los acantilados cubiertos de plantas trepadoras o cascadas con vegetación, lo que crea hábitats para los organismos [34]. Despommier (2013) [35] muestra la gran capacidad de adaptación de los seres vivos, en especial los insectos, de colonizar las cubiertas vegetales. En el estudio realizado en Basilea sobre 11

cubiertas vegetales, fueron observadas 172 especies diferentes de escarabajos, 60 de arañas y 25 de aves, gracias a la capacidad de la cubierta vegetal de retener agua.

La vegetación en fachadas vegetales ayuda a restablecer rápidamente la vida y el ciclo ecológico, aportando grandes cantidades de biomasa vegetal que son un importante refugio para insectos en las zonas urbanas mejorando cualitativamente y cuantitativamente la biodiversidad urbana [36]. Lo que demuestra el papel positivo de la biodiversidad en el bienestar de las personas mediante los espacios verdes urbanos y periurbanos [37]. En un contexto de áreas urbanas, las fachadas con vegetación ofrecen un gran potencial para mejorar la biodiversidad urbana, siendo refugio para los artrópodos y aumentando su capacidad de desarrollo en las ciudades [38].

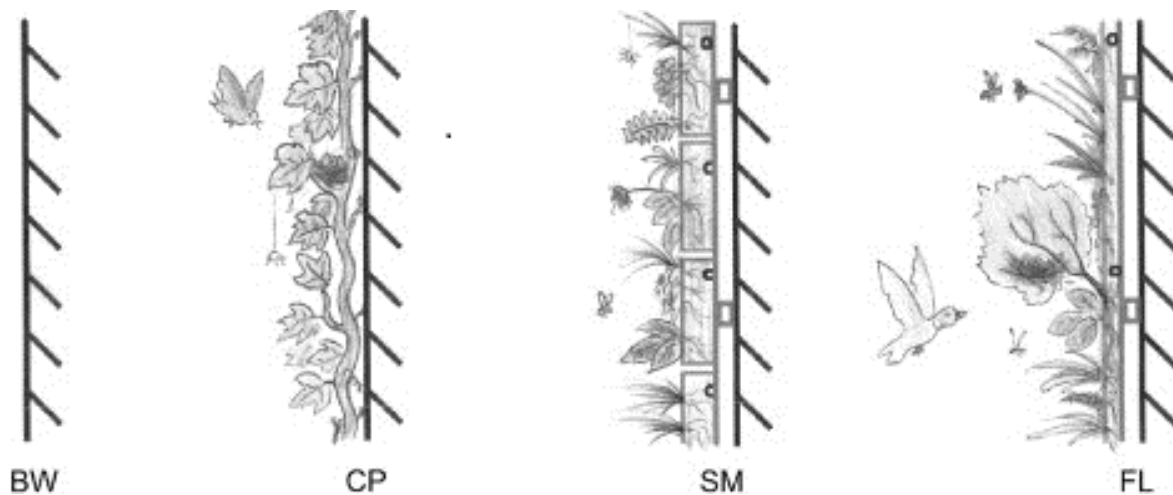


Fig. 2. 5. Efecto del tipo de fachada en la riqueza de especies, en diferentes tipos de fachada vegetal. BW = bare walls , paredes desnudas (hormigón, piedra, ladrillos u otro tipo de material constructivo), CP = climbing plants, plantas trepadoras (directamente sobre las paredes o a lo largo de espalderas), SM = substrate modules, módulos de sustrato (sistemas hidropónicos modulares rellenos de sphagnum u otro material) y FL = felt layers, capas de fieltro (sistemas hidropónicos donde las raíces crecen en el fieltro). Fuente: Madre *et al.* (2015) [38]

Así, Madre *et al.* en 2015 [38] observó un efecto significativo de los diferentes tipos de fachadas en la abundancia, la riqueza de especies y la afinidad a la humedad del hábitat. La abundancia de los artrópodos fue significativamente diferente entre los tipos de fachada siendo mayor en el siguiente orden: BW, CP, FL y SM (Fig. 2.5). En función de la riqueza de especies, la fachada modular vegetal (SM) mostró la mayor riqueza y abundancia de insectos frente al resto de fachadas estudiadas.

Por el otro lado, las paredes desnudas (BW) tienen significativamente un menor ecosistema, siendo fachadas más secas y menos productivas que las fachadas vegetadas. SM y FL se caracterizaron por los ecosistemas más abundante y con de una gran riqueza y variedad de las plantas (principalmente SM que podría significar que el sustrato es un mejor hábitat para plantas y que proporciona un mejor efecto). Los tipos de fachada CP (doble piel) se encuentran en una posición intermedia.

2.3.4 Mejora visual del edificio

Hoy en día, el creciente interés por la ecología urbana y el desarrollo urbano sostenible, ponen de manifiesto las consecuencias ambientales negativas de la expansión urbana y afrontan la forma de lograr soluciones respetuosas con el medio ambiente. Países como Reino Unido con los ideales de " ciudad compacta ", y en Dinamarca "ciudad verde " son iniciativas en pro del desarrollo urbano sostenible [39, 40] así como, la ley que consiguió que a mediados de los años ochenta, alrededor de tres mil municipios alemanes financiaran la construcción de cubiertas vegetales con un incentivo de 25 marcos por metro cuadrado como mínimo, hasta 100 marcos para el caso de Berlín.

La aportación más obvia de los jardines o fachadas vegetales es la mejora visual de las ciudades, sobre todo de paredes medianeras y fachadas posteriores de edificios que son grises, antiestéticas y deslucidas frecuentemente. El aspecto natural de la fachada vegetal constituye un valor añadido para cualquier edificio, mejorando la calidad paisajística del espacio público haciéndolo más agradable y mejorando la calidad de vida humana [41].



Fig. 2. 6. Efecto del verde sobre el gris en Semahmoo Sky Garden Surrey, Vancouver. Fuente: Green over grey. Living Walls. Vancouver, 2009.

En el estudio realizado por White y Gatersleben (2011) [42], para comprobar en cuál de las viviendas preferían los ciudadanos vivir, se examinaron casas con vegetación y sin ella. Los resultados demostraron que las casas con alguno tipo de vegetación integrada fueron significativamente más seleccionadas frente a las que no tenían vegetación, debido a que eran estéticamente más agradables y tenían una cualidad afectiva positiva. La fachada de hiedra y cubierta ajardinada obtuvieron la clasificación más alta. Estos resultados sugieren que la vegetación integrada en el edificio es un complemento valioso para el medio ambiente urbano. Así, estudios americanos y británicos muestran que las cubiertas vegetales pueden aumentar el valor de un edificio entre un 6 % y un 15 % [43].

Por lo que, las actuales estructuras de hormigón, las calles con fachadas grises, los edificios públicos o grandes edificios comerciales, pueden ser una oportunidad para introducir fachadas vegetales [44].

2.3.5 Beneficios para la salud

Tener elementos naturales o un entorno natural, con vistas a jardines, flores o zonas ajardinadas, contribuye positivamente a la satisfacción de los pacientes residentes en los hospitales, aportando bienestar [45]. Este fenómeno es conocido con el nombre de biophilia, conexión con la naturaleza y otras formas de vida, innato y producto de la evolución natural que actúa sobre las especies cuya supervivencia depende de la estrecha conexión con el ambiente [46].

La presencia de vegetación en las ciudades tiene efectos psicológicos positivos sobre los seres humanos. En los núcleos urbanos con mayor presencia de espacios verdes, se observa mayor sentido de comunidad y menor riesgo de delincuencia y violencia [47]. Como ejemplo, el Gobierno de Australia recomienda la utilización de cerramientos verdes ya sean, setos o pantallas verdes para la prevención de los delitos contra las propiedades [48].

Van Herzele y De Vries (2010) [49] compararon dos barrios del centro de la ciudad de Gante, Bélgica, que se diferencian de manera muy diferente en la prestación de los espacios verdes, pero que eran muy similares en características demográficas, factores socio-económicos y con similares construcciones de viviendas. El barrio con mayor

porcentaje de vegetación presentó entre sus habitantes mayor salud y sensación de felicidad.

Está demostrado el efecto psicológico de tranquilidad y relajación que provoca el color verde sobre las personas. Un paseo por un espacio verde de la ciudad, por ejemplo, ayuda a bajar la presión arterial y reduce el ritmo cardíaco [50-52]. También se ha comprobado que la presencia de verde contribuye a una más rápida superación de los síntomas del estrés y cardiacos [53-56] y mejora la estancia y la recuperación de los pacientes en los hospitales [57].



Fig. 2. 7. Garden of Dreams y Friendship Garden, en el Hospital infantil de, San Diego, California.
Fuente: Sherman *et al.* (2005) [57]

Los estudios de mercado demuestran que las personas dan un elevado valor al espacio verde y ajardinado, ya que cuando existen espacios verdes o jardines, los promotores y propietarios de edificios son capaces de atraer compradores de una forma más sencilla.

2.3.6 Reducción del efecto isla de calor urbano

El calentamiento global, el aumento de superficies impermeables y el exceso de calor de los edificios residenciales, la industria y el tráfico están dando lugar a un aumento de la temperatura dentro de las aglomeraciones urbanas. La mitad de la población mundial vive en las áreas urbanas y las perspectivas a corto plazo señalan que su porcentaje será del 60 % para el año 2030, debido a la continua migración de la población rural a las ciudades [58, 59].

Por ello, un elevado número de científicos están abordando el problema de la diferencia de temperatura entre un espacio urbano y su alrededor conocido como efecto isla de calor urbano (Urban Heat Island-UHI). Durante el verano esta diferencia puede llegar a los 10 °C [58-60].

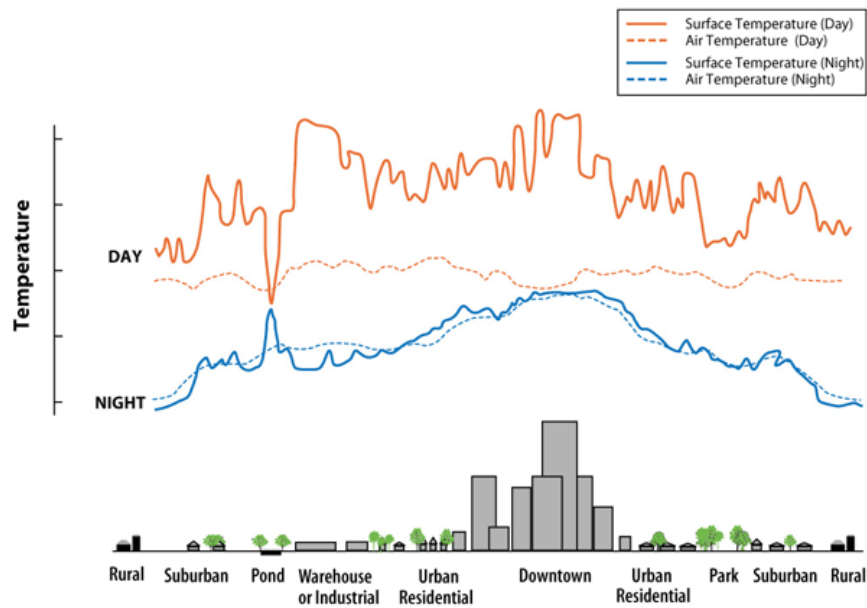


Fig. 2. 8. Gráfica de la variación de las temperaturas superficiales y atmosféricas sobre diferentes áreas de uso de la tierra. Fuente: EPA United States Environmental Protection Agency.

Las plantas pierden agua hacia el medio mediante la evapotranspiración. En ese cambio de fase se utiliza el calor del aire del entorno, de modo que, además de aumentar la humedad ambiental, se disminuye la temperatura del aire (Fig. 2. 8). De tal forma, las plantas son capaces de reducir el efecto isla de las ciudades gracias a la evapotranspiración que realizan [61]. La vegetación aplicada a gran escala es considerada una de las medidas más eficaces para la mejora del microclima urbano [62]. Las superficies de las cubiertas y fachadas verdes son significativamente más frías respecto de las superficies convencionales, por lo que son uno de los principales agentes para reducir sobrecalentamiento de las superficies, y así el efecto isla de calor urbano [63].

En varios estudios realizados sobre cubiertas vegetales se demuestra cómo utilizando estos elementos constructivos la reducción de la temperatura del aire que rodea las superficies de las edificaciones se reduce entre 2 y 5 °C de promedio en verano [61, 64].

En lo referente a fachadas vegetales Alexandri y Jones (2007) [65] demostraron que, debido a la redistribución de la radiación en el interior de las capas vegetales, los intercambios totales por radiación son menores en cerramientos con acabado vegetal que en cerramientos convencionales. En el caso de que las envolventes vegetales sean

instaladas en amplias áreas urbanas, la vegetación es capaz de enfriar las masas de aire, consiguiendo descender la temperatura de la ciudad.

Mediante fachadas vegetales se puede reducir hasta 8.4 °C la temperatura de las ciudades durante el día. Cuanto más caliente y seco sea el clima mayor es el efecto de la vegetación sobre la reducción de temperatura urbana, pudiendo llegar a ahorrar energía para la refrigeración de los edificios entre un 32 y 100 % [66].

El efecto sobre la temperatura del aire de los muros vegetales depende de las características del muro, tipo de vegetación, sustrato, etc... [11]. Los muros sin sustrato no presentan una reducción significativa de la temperatura del aire que los rodea, mientras que los muros con sustrato inorgánico son muy efectivos. La reducción de la temperatura del aire se percibe hasta 0.60 m de distancia del muro.

2.3.7 Protección contra inundaciones

Los desbordamientos y las inundaciones generan considerables daños económicos y medioambientales. Las envolventes vegetales tienen un gran potencial en la gestión de aguas de lluvia y permiten reducir significativamente la cantidad de agua que se vierte en el alcantarillado, debido a que acumulan agua en las plantas y en el sustrato, y la devuelven a la atmósfera a través de la evaporación, reduciendo así la carga de la red de alcantarillado y de los sistemas de saneamiento [67].

Al proporcionar superficies permeables, las superficies verdes pueden retener el agua de lluvia a corto plazo y, dependiendo del sistema constructivo y de drenaje, pueden reducir la cantidad de agua de lluvia que llega al sistema de drenaje urbano.

Fioretti *et al.* (2010) [68] demostraron que la respuesta hídrica de la cubierta vegetal depende de la cantidad de agua contenida en el sustrato en el momento de la lluvia. Es decir, depende del tiempo transcurrido desde la última lluvia o riego. Si el contenido de agua en el sustrato en el momento de la lluvia es mayor que la capacidad de campo, éste no es capaz de almacenar agua de forma permanente o de reducir el volumen de las aguas pluviales [52].

Las cubiertas vegetales son más eficaces que las fachadas vegetales para este fin. Así la capacidad de retención del agua de lluvia en base anual puede variar entre un 75 % en techos verdes intensivos equipados con una capa de drenaje y un 45 % en los techos verdes extensivos [69, 70].

Utilizando la cubiertas vegetales en un 10 % de los edificios se tendría como resultado una reducción de la escorrentía del 2.7 % para la región y del 54 % para los edificios individuales. Por lo tanto, las superficies vegetadas son un instrumento útil para reducir la escorrentía urbana [71].

2.3.8 Protección frente a la radiación solar. Sombra

Las envolventes verdes tiene la capacidad de reducir la radiación solar sobre las superficies de las urbes. La estrategia común para evitar el exceso de radiación solar directa es el sombreado. Los elementos vegetales pueden actuar como protecciones contra las ganancias excesivas de calor provocadas por los rayos solares, ya que la vegetación obstruye, filtra y refleja la radiación solar. En algunos casos se puede llegar a evitar del 50 al 90 % de la radiación incidente.

La cubierta vegetal puede obstruir totalmente la radiación solar, si se superponen suficientes capas de hojas. La absorbencia de la planta depende del color de la hoja. Sin embargo, a diferencia de las superficies inorgánicas, la energía absorbida por las hojas no calienta la superficie, sino que la planta utiliza esta energía solar en la producción de biomasa, o en la autorregulación térmica mediante la evapotranspiración [72].

2.3.9 Mejora de la calidad del aire

2.3.9.1 Sumidero de contaminantes

Las partículas finas suspendidas en el aire constituyen uno de los mayores peligros para la salud pública: causan problemas cardíacos y agravan las enfermedades respiratorias [73]. Son especialmente dañinas aquellas con un diámetro inferior a 10 micras. En el medio urbano el 80 % de estas partículas provienen del tráfico rodado [74].

En los últimos años ha crecido el interés que sobre la salud de las personas puedan tener las pequeñas partículas contenidas en la atmosfera. Dependiendo del diámetro de las partículas se denominan PM₁₀ (10 micrómetros) o PM_{2.5} (2.5 micrómetros). Las partículas más pequeñas son las más peligrosas para la salud. Las partículas de tamaño

inferiores a 10 micras (PM_{10}) se han convertido en la medida estándar de contaminación del aire. En general, las partículas más pequeñas, son las que más profundamente penetran en el sistema respiratorio ya que pueden ser inhaladas profundamente [75].

La vegetación actúa de sumidero sobre la contaminación, tanto porque en el sustrato que las mantiene se depositan partículas que son aprovechadas o metabolizadas por la microflora del suelo (hongos y bacterias) como, porque sobre las mismas superficies foliares se precipitan esas partículas que la planta absorbe y fija en sus tejidos, Fig.2.9, captando así, contaminantes como el plomo, el cadmio u otros metales pesados, que de otro modo permanecerían en suspensión en el aire [76].

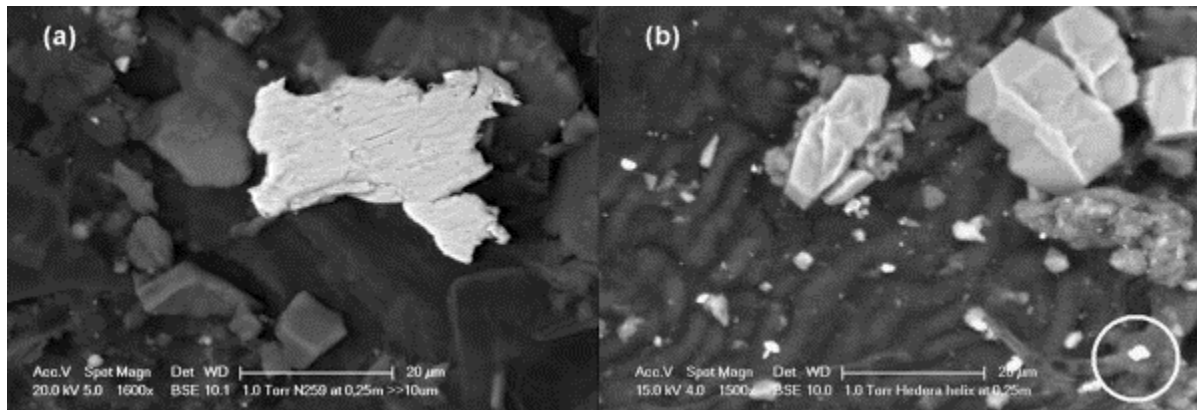


Fig. 2. 9. Microfotografía de partículas de acero inoxidable (a) y varias partículas de materia (b) encontrados sobre *Hedera helix* cerca de la carretera Fuente: Ottelé *et al.* (2010) [76]

Cuando las hojas están expuestas a la lluvia, las partículas contaminantes se derraman sobre el sustrato o se concentran en la punta de las hojas (goteo). Como consecuencia de esta nueva acumulación de partículas, es poco probable que se produzca una nueva resuspensión de partículas hacia el aire. Este fenómeno muestra la capacidad de la vegetación para sedimentar sustancias contaminantes contenidas en el aire [74].

Existen diversos estudios que avalan la capacidad de las envolventes verdes de mitigar las cantidades de contaminantes presentes en las ciudades. Así, Yok Tan y Sia (2005) [77] demostraron que una cubierta vegetal de 4000 m² es capaz de reducir entre un 6-37 % la cantidad de partículas contaminantes. Yang *et al.* (2008) [78] en Chicago establecieron que la reducción de cuatro contaminantes atmosféricos (O_3 , NO_2 , PM_{10} y SO_2) era de 52 %, 27 %, 14 % y 7 %, respectivamente.

Las fachadas recubiertas con vegetación son un elemento muy adecuado para hacer frente a los microelementos procedentes del polvo producido en las ciudades [79], sobre todo la carga relativa de las hojas aumenta durante la época de crecimiento, repercutiendo sobre una menor producción de ozono atmosférico [80].

Las investigaciones actuales demuestran que la capacidad de las envolventes vegetales para mejorar la calidad del aire depende en gran medida de las condiciones específicas del lugar. Para que los efectos positivos que pueden aportar los jardines vegetales sobre la calidad del aire de las ciudades sean perceptibles, se requieren políticas urbanas específicas que fomenten la aplicación generalizada de fachadas y cubiertas verdes.

2.3.9.2 Sumidero de CO₂

En las áreas urbanas los procesos de combustión son tan elevados que el contenido de dióxido de carbono (CO₂) en el aire puede llegar a valores muy altos, disminuyendo drásticamente el porcentaje de oxígeno libre (O₂). El CO₂, junto al vapor de agua y otros gases, es uno de los causantes de la destrucción de la capa de ozono. Un aumento en exceso de los niveles de CO₂ supondría la pérdida de ozono, capa protectora de la superficie terrestre.

La mayor aportación de las fachadas verticales es en forma de beneficios ambientales, contribuyendo a la atenuación del cambio climático. Eliminan directamente el CO₂ de la atmósfera a través de la absorción fotosintética durante el día y lo liberan en forma de O₂, renovando así el aire del entorno y mejorando la calidad de este [81].

Otro aspecto a tener en cuenta durante el proceso metabólico de la fotosíntesis es la captura y transformación del dióxido de carbono (CO₂) en carbono (C) y su almacenamiento como biomasa reduciendo así los niveles de CO₂ atmosféricos [82].

En las áreas urbanas la concentración de O₂ puede verse reducida en torno a un 17-18 %, en relación a los espacios naturales [83], por lo que conseguir áreas con superficies verdes de dimensiones adecuadas podría suponer una importante mejora en la calidad del aire de las metrópolis.

2.3.10 Mejora de la calidad del aire interior

La forma tradicional de selección de materiales para el diseño y construcción de los edificios se ha basado tradicionalmente en factores como el coste, los valores estéticos, disponibilidad y durabilidad [84]. Los materiales y elementos que constituyen los edificios son una posible fuente de patologías futuras. El ser humano pasa una parte considerable de su tiempo respirando el aire de espacios cerrados en los que, por medio de diversas fuentes, pueden generarse contaminantes que deterioren su calidad y constituyan un importante factor de riesgo para la salud de la población en general [85] (Tabla 2.1). La agencia de protección ambiental asegura que las personas que viven y trabajan en edificios construidos con materiales artificiales inhalan más de 300 contaminantes diarios.

Tabla 2.-1. Contaminantes y sus fuentes más comunes Fuente: Organización mundial de la salud (2014)[86]

Situación	Fuentes de emisión	Contaminantes
Exterior	Producción industrial	SO ₂ , NO ₂ , NO, ozono, partículas, CO y COV
	Vehículos de motor	CO, NO ₂ , NO, plomo
	Suelo	Radón
Interior	<i>Materiales de construcción</i>	
	Piedra, hormigón	Radón
	Compuestos de madera	Formaldehído, COV
	Aislamiento	Formaldehído, fibra de vidrio
	Ignífugos	Asbesto
	Pintura	COV, plomo
	<i>Instalaciones y mobiliario</i>	
	Calefacción, cocinas	CO, CO ₂ , NO ₂ , NO, COV, partículas
	Fotocopiadoras	Ozono
	Sistemas de ventilación	Microorganismos
	Actividad metabólica	CO ₂ , vapor de agua
	Actividad biológica	Microorganismos
	Actividad humana	
	Tabaquismo	CO, Partículas....
	Ambientadores	Fluorocarburos, olores
Limpieza	COV, olores	
Ocio, actividades artísticas	COV, olores	

Las actividades de la vida diaria hacen que el individuo pase más del 80 % de su tiempo en espacios interiores (oficinas, colegios, hospitales, guarderías, centros comerciales, viviendas particulares...) por ello, la calidad del aire que en ellos se respire puede afectar a la salud de sus habitantes [87].

La organización mundial de la salud (OMS) ha cifrado en 2 millones anuales el número de muertes en el mundo atribuibles a contaminación del aire interior, y además ha clasificado este fenómeno como el décimo factor de riesgo evitable en importancia para la salud de la población en general [88].

Actualmente la construcción va en la dirección de reducir la exposición de los ocupantes a los productos químicos, potencialmente peligrosos o nocivos. Así mismo, la mayoría de las organizaciones de salud promueven iniciativas de "construcción verde", iniciativas basadas en la preocupación de las personas que participan en la construcción y de las que ocupan los edificios.

Algunas especies de plantas utilizadas en las fachadas vegetales (Tabla 2. 2) son eficientes para absorber y eliminar los contaminantes interiores de los edificios, tales como el formaldehído, monóxido de carbono o los compuestos volátiles, tricloroetileno, benceno, xileno pueden ser eliminados por las plantas [89, 90].

Tabla 2.-2 . Plantas tropicales adecuadas para fachadas vegetales que mejor eliminan las sustancias contaminantes. Fuente: Zalewski *et al.* (1997)[91]

Sustancias Contaminantes	Plantas
Formaldehído (CH ₂ O)	Lirio de la paz (<i>Spathiphyllum sp.</i>) Helecho de Boston (<i>Nephrolepis exaltata "Bostoniensis"</i>) Hiedra inglesa (<i>Hedera hélix</i>)
Monóxido de carbono(CO)	Plata de araña (<i>Chlorophytum comosum</i>) <i>Dracaena "Janet Craig"</i> <i>Ficus sp</i>
Compuestos orgánicos volátiles	Poto de oro (<i>Scindapsus aureus</i>) Hiedra del diablo (<i>Aureun epipemnum</i>) Filodendro (<i>Philodendrum sp</i>)
Tricloroetileno (TCE)	Lengua de suegra (<i>Sansevieria trifasciata "Laurentii"</i>) Crisantemo (<i>morfolium Chrysantemum</i>)
Benceno (C ₆ H ₆) Tolueno (C ₇ H ₈). Xileno (C ₆ H ₁₀)	Helecho Kymberly Quenn (<i>Nephrolepis obliterata</i>) Orquidea sp (<i>Phalepnosis sp</i>) <i>Dieffenbachia sp</i>

2.4 Tipos de sistemas verticales vegetales

Actualmente existe una gran variedad de sistemas verticales vegetales. Entre todos ellos, cabe diferenciar dos grupos principales: las paredes o fachadas vivas que emplean paneles modulares o geotextiles anclados al muro de fachada como soporte para todo tipo de plantas y arbustos de porte pequeño y el resto de fachadas vegetadas que utilizan algún sistema de malla, cableado o enrejado como soporte, para plantas trepadoras principalmente. Por otro lado, se encuentran los muros de contención y las pantallas antirruído.

A continuación se hará un pequeño resumen de las características más importantes que distinguen cada uno de estos sistemas. *Un análisis en profundidad de los diferentes tipos de sistemas verticales vegetales, con sus características técnicas y detalles constructivos se encuentra en el ANEXO I.*

2.4.1 Fachadas vegetales tradicionales

Las fachadas vegetales tradicionales son sistemas de fachada en las que plantas ya sean enredaderas o arbustos de porte colgante se desarrollan de forma dirigida, utilizando el propio muro de la vivienda. Las plantas se suelen colocar directamente en el suelo y se van desarrollando hasta tapizar completamente el muro o fachada.

2.4.2 Fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal

Las fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal son sistemas de vegetación vertical que tienen como objetivo crear una doble piel o cortina vegetal separada de la pared de la fachada.

La separación con la pared de fachada del edificio se puede realizar utilizando diferentes sistemas de apoyo como: enrejados modulares, entramados metálicos, paneles rígidos, sistemas de cable o mallas.

2.4.3 Jardineras perimetrales

Es uno de los sistemas más sencillos, ya que las macetas, jardineras o contenedores se pueden colocar en el suelo, se pueden mover de un lugar a otro, o construir in situ formando parte de la fachada del edificio, y no es necesario elaborar sofisticados sistemas de riego.

2.4.4 Paredes vivas

Los jardines verticales son parte del sistema envolvente del edificio. Los jardines verticales se componen en general de paneles o módulos verticales, o fieltros a base de geotextiles fijados verticalmente a un marco estructural, a su vez fijado a una pared, fachada, muro o estructura. Estos paneles o módulos pueden ser dependiendo del fabricante, de plástico, poliestireno expandido, tejido sintético, arcilla, metal y hormigón, y el apoyo de una gran diversidad y densidad de especies de plantas. Tanto los módulos como los fieltros, sirven de soporte para las plantas y el medio de cultivo.

3 Fachadas ventiladas

3.1 Introducción y definición

La conciencia global acerca de la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector de la construcción ha aumentado el interés por los sistemas pasivos aplicados a la arquitectura. Un edificio pasivo, es en el que el ambiente interior no está regulado por la operación de los sistemas de calefacción y refrigeración mecánicos, sino por la estructura y el diseño arquitectónico del edificio y sus componentes. La integración de las estrategias de diseño pasivo se produce desde el nivel de diseño, mediante la determinación de los elementos que tienen influencia en el rendimiento del edificio, tales como su forma y orientación, la relación pared - ventana, tipo de cerramiento y sombreado, entre otros.

Entre las soluciones pasivas, la fachada ventilada se ha convertido en una tecnología destacada. La motivación para el uso de este tipo de cerramientos viene del interés de combinar la fachada de los actuales edificios con eficiencia energética. Sin embargo, su aplicación viene acompañada con retos significativos debido a la complejidad de los fenómenos térmicos y de flujo de aire que intervienen en su comportamiento, así como la capacidad de adaptación de estas soluciones a las condiciones climáticas.

La fachada ventilada basa su funcionamiento en el principio de efecto chimenea [92]. La incidencia de la radiación solar en la envolvente exterior produce el calentamiento del material que por conducción, llega a la interior del mismo. En ese momento el aire de la cámara de aire eleva su temperatura por medio de la convección. A medida que la

cámara de aire sigue aumentando su aumenta, la diferencia de presión aumenta, el aire comienza a elevarse en el interior de la cámara ejerciendo en la parte baja de la cámara una succión de aire fresco exterior, al mismo tiempo que en la parte superior de la cámara se evacua el aire del interior [93].

3.2 Antecedentes sobre sistemas constructivos

El concepto de fachada ventilada nació a finales de los años 80 y actualmente sigue vigente concentrando la investigación en los diferentes tipos de revestimientos que se pueden integrar, tipos de aislamientos apropiados para el exterior y sistemas de anclaje que mejoren la seguridad y reduzcan los tiempos de colocación y mantenimiento.

La fachada ventilada es una solución constructiva que permite recubrir el exterior de la fachada con piezas cerámicas. La principal característica de las fachadas ventiladas es que en ellas se crea una cámara de aire en movimiento que crea un colchón térmico entre el revestimiento exterior del edificio y su cerramiento. Esta cámara de aire permite una ventilación continua en el interior de esta, con lo cual se garantiza una reducción considerable en las transmisiones térmicas desde el exterior de la edificación. Pero no se debe olvidar que el diseño de la fachada ventilada debe tener propiedades físicas y estéticas propias de las fachadas para poder desempeñar las funciones propias de estas.

La envolvente exterior del edificio juega un papel fundamental en las demandas de consumos de calefacción y refrigeración ya que es crucial para obtener unas condiciones de confort ambientales adecuadas en el ambiente interior del edificio. Además, de la función de envolvente, no se puede olvidar el resto de funciones que ejercen las fachadas, como son el comportamiento acústico, comportamiento frente al movimiento de masas (aire y humedad), la disposición de las instalaciones de servicios, etc. Sin olvidar el papel estético que cumple la fachada ya que es la cara del edificio frente al entorno en el que se ubica, lo que le exige una adecuada integración.

Por otro lado, uno de los principales requerimientos que deben presentar las fachadas ventiladas es la eficiencia energética, tanto en estaciones cálidas como en frías, reduciendo el consumo energético ocasionado por el acondicionamiento de los

interiores, contribuyendo así a la viabilidad estética, energética y ecológica de la edificación.

Destaca en el Plan de Acción 2005-2007 (PAE 4) la medida de “rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios existentes”, cuyo objetivo es reducir la demanda energética en calefacción y refrigeración en el sector de edificios existentes, mediante la aplicación de criterios de eficiencia energética en la rehabilitación de su envolvente térmica.

En la segunda edición de este Plan de Acción 2008-2012 (PAE 4+) se incluyeron 3 medidas estratégicas para el sector edificación dirigidas al parque de edificios existentes, dos de ellas afectan al aislamiento y la tercera a la mejora en instalaciones energéticas.

Actualmente, el segundo plan de acción nacional de eficiencia energética 2011-20 sigue con la misma línea de actuación. En él se recogen los ahorros energéticos realizados de acuerdo a las recomendaciones y metodologías dadas por la Comisión Europea desde el 2004 tanto en el sector Industrial, Transporte, Edificios, Servicios públicos, Agricultura y Pesca y Transformación de la energía.

En la misma línea, las medidas adoptadas con el Código Técnico de la Edificación (CTE) Real Decreto 314/2006, para procurar un uso más racional de la energía en el ámbito de la edificación, tiene el ámbito de aplicación en:

- edificios de nueva construcción.
- modificaciones, reformas o rehabilitaciones de edificios existentes con una superficie útil superior a 1000 m² donde se renueve más del 25 % del total de sus cerramientos.

Artículo 15. Exigencias básicas de ahorro de energía (HE)

1. El objetivo del requisito básico “Ahorro de energía” consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir asimismo que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

2. Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán, utilizarán y mantendrán de forma que se cumplan las exigencias básicas que se establecen en los apartados siguientes.
3. El Documento Básico “DB HE Ahorro de energía” especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de ahorro de energía.

Exigencia básica HE 1: Limitación de demanda energética

Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.

3.3 Beneficios

- Menor dispersión del calor. Ausencia de deterioro a lo largo del tiempo.
- Ausencia de humedad y eflorescencia en las paredes exteriores. Contribuye a la dispersión de la humedad.
- Eliminación de la condensación superficial.
- Estabilidad a la estructura y a los muro soporte.
- Insensible a la corrosión provocada por la contaminación.
- Bajo coste de mantenimiento.
- Posibilidad de sustitución de elementos del revestimiento.
- Mejora del aislamiento térmico/acústico del edificio.
- Renueva la estética del edificio.
- Mejora de las condiciones ambientales.
- Dispersión de la humedad presente en el interior.

3.4 Tipo de sistemas de fachada ventilada

Una fachada ventilada es un sistema construido por un elemento de aplacado o revestimiento exterior, sustentado por elementos soportables interiores, a través de una subestructura, mediante fijaciones y anclajes, quedando entre el revestimiento y la zona portante un espacio donde el aire puede circular libremente por convección [94].

Es complejo definir una clasificación que recoja de forma precisa y completa el amplio conjunto de soluciones que se engloban dentro del término fachada ventilada. En la actualidad la definición de fachada ventilada aparece en la norma EN 13119 “Curtain walling–terminology”, pero no existe una clasificación general única ya que cada diseñador o fabricante presenta en si mismo un amplio catálogo o clasificación propia.

Una clasificación general puede ser dividirla por el tipo de hoja exterior basándose en la capacidad de aprovechamiento de la radiación solar que realiza la fachada a través de si la hoja exterior es opaca ó acristalada (Fig. 2.10).



Fig. 2. 10. Detalle de fachada ventilada con hoja exterior opaca de plaqueta cerámica y fachada ventilada con hoja exterior acristalada. Fuente: kraspan.ru/system

Una segunda clasificación puede realizarse en base al peso de la hoja exterior. La configuración de la hoja exterior puede basarse en sistemas muy ligeros como los que emplean placas metálicas hasta las soluciones más pesadas que presentan las hojas de albañilería apoyadas. Se toman como soluciones de hoja ligera a aquellas cuyo peso superficial no es mayor de los 75 kg/m².

Una tercera clasificación de las fachadas ventiladas puede ser dividirla en dos grandes familias en función de si están formadas por una sola cámara de aire, o si presentan un

dispositivo de lamas centradas en la cámara de aire que permiten dividirla a su vez en dos subcámaras según las condiciones climáticas.

Por último las fachadas ventiladas se pueden clasificar por el tipo de ventilación que presentan, la ventilación está relacionada con las fuerzas motoras del movimiento de aire en la cámara ventilada y estas pueden ser (Fig. 2.11):

- Ventilación natural: el efecto de flotación producido por la diferencia de presión entre volúmenes con diferente densidad debido a las variaciones de temperatura a lo largo de la fachada generan un movimiento de masas. Otro motor del movimiento de aire dentro de la cámara es una velocidad de viento elevada en la superficie exterior de la hoja, lo que genera a su vez una subpresión que acelera el aire dentro de la cámara.
- Ventilación forzada: el movimiento de aire es generado y controlado mediante un sistema de impulsión mecánico, en general, conectado al sistema de climatización.
- Ventilación híbrida: en este tipo de ventilación se intenta aprovechar al máximo la ventilación natural, y en aquellos casos en los que las fuerzas de flotación por convección natural no sean suficientes entraría la convección forzada.

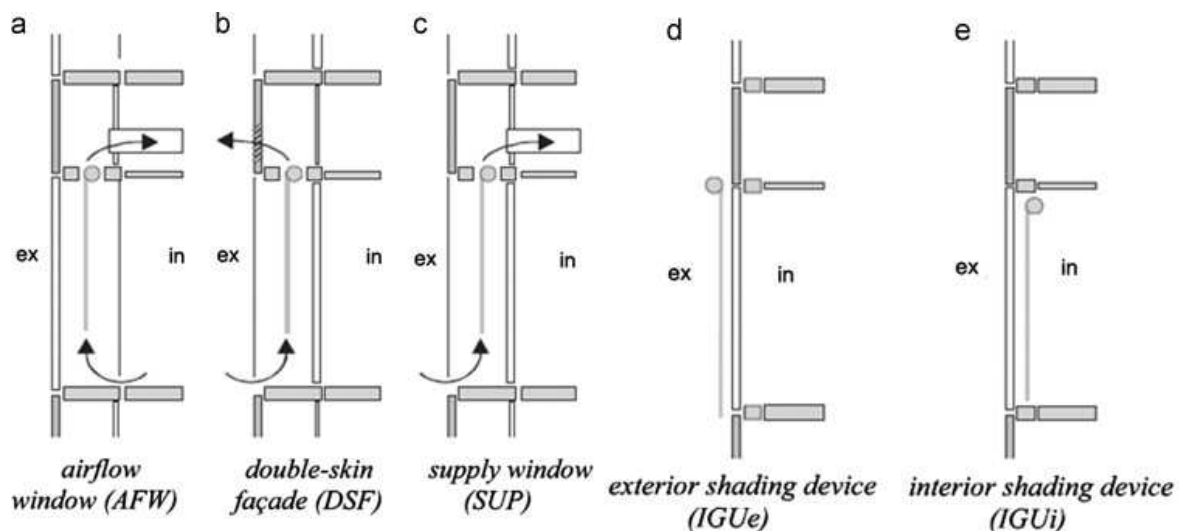


Fig. 2. 11. Representación esquemática de varias fachadas ventiladas y soluciones tradicionales.
Fuente: Saelens (2008) [92]

3.5 Modelos de análisis numéricos de fachadas ventiladas

Las publicaciones científicas en fachadas ventiladas son abundantes y existe una amplia bibliografía técnica orientada al estudio de fachadas ventiladas, tanto en la referente a análisis de soluciones constructivas, así como sobre las características de los materiales empleados.

Modelos analíticos para la validación del comportamiento de fachadas ventiladas

- L Zalewski, M Chantant, S Lassue, B. Duthoit. Experimental thermal study of a solar wall of composite type. *Energy and Buildings*, 1997;25:7-18 [95].
- T. Pasquay. Natural ventilation in high-rise buildings with double façades, saving or waste of energy. *Energy and Buildings*, 2004;36:381-389 [96].
- V Gavan, M Woloszyn, F Kuznik, JJ. Roux. Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with venetian sun-shading device: a full investigation in controlled environment. *Solar Energy*.2010; 84:183-195 [97].
- Gratia, E. , De Herde, A. Optimal operation of a south double-skin façade *Energy and Buildings*.2004;36:41-60 [98].
- C Balocco. A simple model to study ventilated façade energy performance. *Energy and Buildings*. 2002;34:469-475 [99].
- C Popa, D Ospir, S Fohanno, C Chereches. Numerical simulation of dynamical aspects of natural convection flow in a double-skin façade. *Energy and Buildings*. 2012;50:229-233 [100].
- C Cianfrini, M Corcione, E Habib, A Quintino. Energy performance of a lightweight opaque ventilated façade integrated with the HVAC system using saturated exhaust indoor air. *Energy and Buildings*. 2012;50:26-34 [101].
- E. Giancola, C. Sanjuan, E. Blancob, M.R. Herasa. Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*. 2012;54:363-375 [102].
- D Saelens, S Roels, H Hens. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin façades. *Building and environment*.2008;43:638-650 [92].

- C Sanjuan, M J Suárez , M González, J Pistono, E Blanco. Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade. *Solar Energy*. 2011;85:1851-1863 [103].

4 Caracterización térmica de componentes de edificios en células de ensayo calorimétricas.

4.1 Células de ensayo calorimétricas

Las instalaciones de ensayo ó células PASLINK mediante sus procedimientos de análisis de datos bajo condiciones reales de ensayo tienen como objetivo obtener las características térmicas de los elementos constructivos del edificio. Para ello, es fundamental el desarrollo y mejora continua de los métodos de ensayo y procedimientos de análisis de datos.

Las células de ensayos PASLINK (Figura 2.12) son una herramienta de diseño y simulación con la ventaja que proporcionan una sala de ensayo, que se encuentra totalmente controlada sin efectos de ocupación, de un tamaño real al de una habitación estándar de una vivienda.

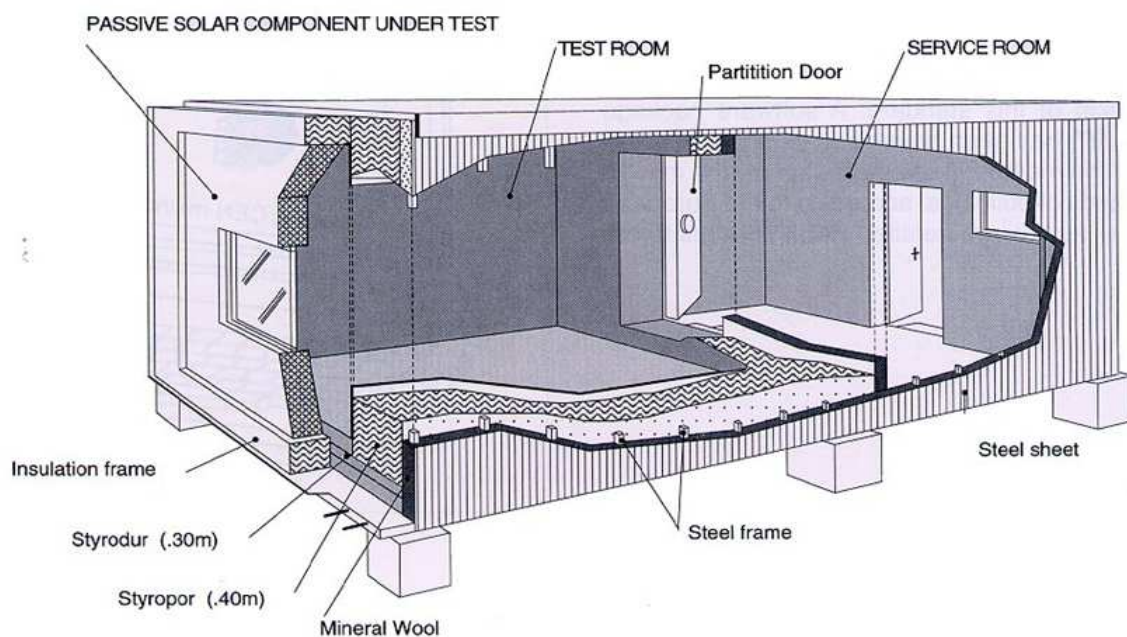


Fig. 2. 12. Estructura general de una célula de ensayo PASSYS. Fuente Vandaele & Wouters (1994) [104]

El proyecto PASLINK evolucionó desde el proyecto Europeo PASSYS (Passive Solar Components and Systems Testing) que en 1985 comenzó la Comisión Europea con el propósito de aumentar la eficiencia de la energía solar y de los elementos constructivos pasivos mediante la aplicación de nuevas técnicas.

La Red PASLINK ha implementado la calidad de los procedimientos de ensayo y ha promovido el desarrollo de la experiencia de los participantes en el diseño, preparación y ejecución de las pruebas y el análisis de los datos. Los principales esfuerzos se dedicaron a desarrollar métodos de ensayo comunes, instalaciones de ensayo y herramientas de simulación.

Todos los miembros de la Red Paslink contribuyen a los objetivos comunes compartiendo sus experiencias de datos, ensayos y evaluación, mediante la recopilación de información de otros proyectos de investigación y de estudios, mediante la aplicación de los procedimientos comunes y la difusión de la información a la red hacia los potenciales usuarios profesionales.

Desde el inicio del Proyecto PASSYS hasta hoy en día, tanto el análisis como la metodología de los ensayos han evolucionado. Las células de ensayo PASSYS originales ha aumentado su precisión tanto en la medición como en la caracterización de los elementos constructivos, gracias a un programa Europeo llevado a cabo para la mejora de los ensayos [105].

La metodología de análisis y métodos de prueba en las primeras fases de PASSYS se basaron en el estado estacionario, sin embargo, a medida que el proyecto avanzaba se hizo patente la necesidad de estudio del ensayo dinámico.

Para el estudio dinámico bajo condiciones reales de elementos constructivos se requieren métodos de análisis y datos de alta calidad. Por ello, la eficacia y rigidez se han mantenido desde los estudios iniciales, en estado estacionario, hasta los métodos dinámicos actuales.



Fig. 2. 13. Pasos en el desarrollo de diseño, monitorización, identificación y validación de modelos matemáticos en células Paslink

En paralelo con las mejoras en la metodología de los ensayos, se han desarrollado diferentes programas informáticos que permiten la identificación de las características térmicas de los elementos constructivos. Actualmente, se pueden llevar a cabo ensayos con periodos de prueba más cortos que son capaces de optimizar la información y consiguen resultados precisos que a la vez proporcionan información estadística precisa sobre los parámetros identificados.

4.2 Estudio en estado estacionario.

4.2.1 Método de la media o del promedio

En esta sección se describe la aplicación del método de estado estacionario clásico, también conocido como el método de la media o del promedio. Este método es una técnica de análisis sencillo que proporciona información cuantitativa y cualitativa sobre los datos medidos y por lo tanto es muy útil como un primer paso en el proceso de análisis de datos. Sin embargo, en general, la desventaja de la aplicación de este método reside en el largo periodo de prueba o recopilación de los datos necesarios para poder obtener resultados precisos. Por otro lado, no da información acerca de la dinámica del sistema físico.

El método del promedio utiliza las mediciones de tres características medidas durante todo el período de prueba o análisis. Estas son la temperatura del aire interior ($T_{i, \text{aire}}$, en $^{\circ}\text{C}$), la temperatura del aire exterior ($T_{e, \text{aire}}$ en $^{\circ}\text{C}$) y la densidad de flujo de calor a través de la superficie de la pared interior (q_i , en $[\text{W}/\text{m}^2]$) el intervalo de tiempo entre mediciones sucesivas depende del sistema de seguimiento y los datos de preprocesamiento.

Mediante el uso de la Eq. 2 conseguimos la estimación del valor de la resistencia térmica de aire a aire después de las N mediciones (R_N en $^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$) de la solución constructiva o elemento estudiado

$$R_{N, \text{aire-aire}} = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{i, \text{aire}, k} - T_{e, \text{aire}, k})}{\sum_{k=1}^N q_{i, s, k}} \quad \text{Eq. 2}$$

Mediante la ecuación Eq. 3 conseguimos calcular la de resistencia al calor mediante el método de la media de la superficie a la superficie después de las N mediciones (R_N en $^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$).

$$R_{N, s-s} = \frac{\sum_{k=1}^N (T_{i, s, k} - T_{e, s, k})}{\sum_{k=1}^N q_{i, s, k}} \quad \text{Eq. 3}$$

En las dos fórmulas anteriores, Eq 2 y Eq 3 k representa el índice de una observación. Es decir, la estimación es igual a la diferencia de la temperatura media dividida por la media de la densidad de flujo de calor.

Para el cálculo y medición insitu de la resistencia térmica y transmitancia térmica (ISO 9869 [106] de los componentes de construcción y elementos constructivos el método de la media es exacta siempre que cumpla las siguientes cinco condiciones:

- La duración de la prueba tiene que exceder de 72 horas (3 días).
- La estimación al final del período de prueba no debe diferir en más de un 2 % de la estimación a las 24 horas antes.
- La estimación correspondiente a la primera 2/3 parte del período de prueba no debe diferir en más de un 2 % de la estimación correspondiente a la última 2/3 parte de ese período.

- Durante la duración de la prueba la pared no debe estar expuesta a la radiación solar y ni a lluvia.
- El cambio en la energía interna de la pared tiene que ser de menos de 2 % del calor que pasa a través de la pared durante el período de prueba. Se estima que el intercambio de la energía se debe a la diferencia entre la temperatura media de la pared en el inicio del período de ensayo (T_{inicial} en $^{\circ}\text{C}$) y la temperatura al final de ese período (T_{final} en $^{\circ}\text{C}$), multiplicados por el calor específico (C en $[\text{J}/\text{kg K}]$) y la masa de la pared (m en $[\text{kg}/\text{m}^2]$).

Estas circunstancias reflejan la necesidad de condiciones estables y bien controladas durante el período de medición.

Las desventajas del método de la media o del promedio son:

- No se puede realizar la estimación de la capacidad térmica.
- El método no proporciona ninguna información sobre la dinámica del componente.
- Necesita un largo periodo de muestreo para obtener un resultado preciso.
- El método no tiene en cuenta el posible efecto de las variaciones a corto plazo en las condiciones climáticas sobre el componente.
- Dificultad en la estimación del parámetro cuando la densidad de flujo térmico medio o la diferencia de temperaturas es pequeña, ya que las incertidumbres, en este caso, son demasiado grandes.

4.2.2 Análisis de los parámetros en las células PASSYS

Desde el punto de vista del diseñador del edificio, las principales características que determinan el rendimiento de un componente son el coeficiente de transferencia de calor o coeficiente de transmisión térmica (UA) y el factor de ganancia solar o transmisión solar (gA). Estos parámetros se definen a continuación:

- UA $[\text{W} / ^{\circ}\text{C}]$ es la cantidad de flujo de calor $[\text{W}]$ en estado estacionario dividido por la diferencia de temperatura $^{\circ}\text{C}$ entre el entorno y el interior del componente o sistema.
- gA $[\text{m}^2]$ es la cantidad de flujo de calor $[\text{W}]$ transmitida a través del componente desde el exterior al interior en condiciones de estado estacionario, causado por la

radiación solar incidente en la superficie exterior del componente dividida por la intensidad de la radiación solar incidente [W/m^2].

La determinación experimental de estas propiedades no es sencilla ya que los procesos térmicos involucrados son muy complejos. Por otra parte, el rendimiento térmico depende de la superficie relativa, la orientación y posición del componente, la influencia de la masa térmica del edificio, la presencia de diferentes fuentes de calor, etc...

La tarea principal en cualquier ensayo es aislar estos factores para poder comprender tanto el rendimiento del componente, como su interacción con el edificio y sus ocupantes.

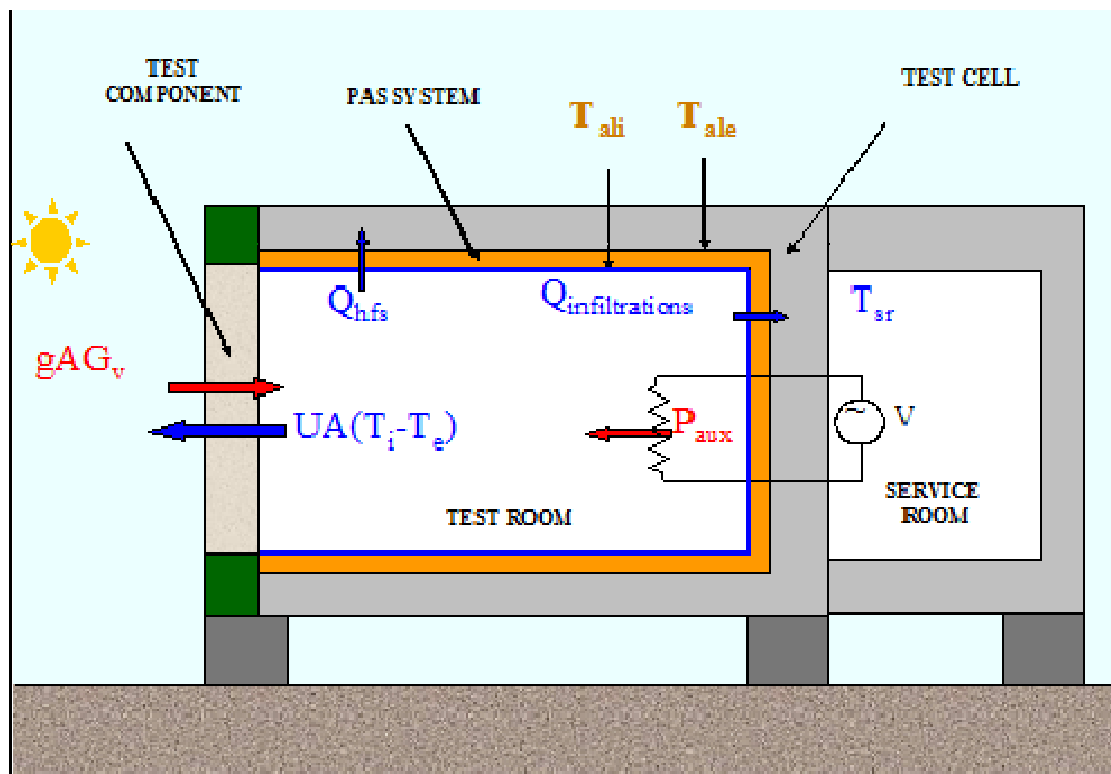


Fig. 2. 14. Representación esquemática del balance térmico en una celda de ensayos PASSYS.
 Fuente: Jiménez (2008) [107]

En una situación de estado estacionario, el balance de calor en la célula de ensayo (Fig. 2.14) se puede expresar de la siguiente forma Eq.4:

$$Q = P_{hc} - (UA)_{tr,e} \cdot \Delta T_{tr,e} - (UA)_{tr,s} \cdot \Delta T_{tr,s} \quad \text{Eq. 4}$$

Donde: Q es la transferencia de calor neta [W] desde la sala de ensayo a través del componente exterior (desconocido); P_{hc} es la potencia de calefacción [W] suministrada a la sala de ensayo; $(UA)_{tr,e}$ es el valor de UA [W/ °C] de la envolvente de sala de ensayo; $\Delta T_{tr,e}$, es la diferencia de temperatura en la envolvente de sala de ensayo [°C], entre la temperatura de la superficie interior ($T_{tr,s}$) y la temperatura de la superficie exterior ($T_{e,s}$); $(UA)_{tr, sr}$ es el valor de UA [W/ °C] de la sala de ensayo en contacto con la sala de servicio ; $\Delta T_{tr, sr}$ es la diferencia de temperaturas aire-aire [°C] entre las salas de ensayo y la sala de servicio.

Para definir las características de la componente de la envolvente y la tasa de flujo de calor neto, en el caso de condiciones de estado estacionario, se puede expresar en términos de pérdida de calor y en partes de ganancia de calor, respectivamente:

$$Q = UA (T_i - T_e) - g A I_{sol,v} \quad \text{Eq. 5}$$

Donde: Q es la transferencia de calor neta [W] desde la sala de ensayo a través del componente exterior; UA es el coeficiente de transferencia de calor [W/ °C] del componente; T_i y T_e son las temperaturas internas y externas respectivamente [°C] (medidas); gA es la apertura solar del componente [m²]; $I_{sol,v}$ es la irradiación solar [W/ m²] sobre el componente.

La exactitud lograda en la caracterización del componente utilizando la celda de ensayo, depende en gran medida del método de medición empleado en la determinación de la tasa de flujo de calor a través de la envolvente.

En las células de ensayo iniciales, como las que se desarrollaron en el proyecto PASSYS, la tasa de flujo de calor a través de la envolvente se obtenía partiendo de calibraciones previas y mediante la medida de las temperaturas en la superficie interna y externa de la celda de ensayo durante el tiempo del ensayo.

4.3 Estudio Dinámico

Los métodos de análisis dinámicos, son técnicas que analizan los procesos dinámicos e identifican los parámetros de los procesos físicos. La principal característica de los métodos dinámicos es que tienen en cuenta el aspecto del tiempo mientras que un método de análisis estacionario no lo hace.

El uso de una metodología de identificación dinámica tiene la ventaja de aportar información sobre la capacidad térmica del componente y así, poder reducir la duración del ensayo. Existen varios métodos de identificación dinámicos que se pueden aplicar para la determinación de la resistencia térmica de los componentes.

El período de tiempo máximo entre dos registros (de temperatura y de flujo de calor) y la duración de la prueba mínima dependen de:

- La naturaleza del elemento (pesado, ligero , aislamiento externo o interno)
- Temperatura interior y exterior (promedio y fluctuaciones , antes y durante el ensayo)
- El método empleado para el análisis.

Una cuestión importante a tener en cuenta en el análisis de datos dinámicos es la experiencia del usuario, ya que para la misma serie de datos, el mismo software y los mismos parámetros a identificar, se pueden obtener diferentes resultados dependiendo del usuario.

Otra cuestión que debe abordarse en el análisis de datos, una vez que las ecuaciones del balance de energía están definidas, es la correcta asignación de las entradas y de las salidas. Esta decisión, debe basarse en criterios físicos, como la causalidad y las correlaciones entre las variables medidas. En ocasiones, los ensayos se deben configurar para mejorar este enfoque de salida única, por ejemplo usando ROLBS (Randomly Ordered Logarithmically distributed Binary Sequence) o secuencias de PRBS (pseudo random binary signals) que excitan el sistema y las variables de correlación [108].

4.3.1 Análisis de los parámetros en las células PASLINK

Para conseguir una mayor precisión en la medida de la tasa de flujo de calor a través de la envolvente de la sala de ensayos se desarrollaron dos métodos por la red PASLINK dentro del proyecto europeo COMPASS.

El Pseudo Adiabático Shell (PAS), se compone de una lámina de calefacción eléctrica utilizada para compensar la pérdida de calor a través de la envolvente de la sala de ensayos. La diferencia de temperatura media entre las placas de aluminio a ambos lados de la célula PAS se mide mediante termopilas. La señal de la termopila se utiliza para controlar la lámina de calentamiento de tal manera que el flujo de calor resultante se acerque a cero.

Por otro lado, la idea de TNO (Building and Construction Research, Delft, Netherlands) fue sustituir la PAS por los sensores de flujo de calor en forma de baldosas que cubren todas las superficies internas de la sala de ensayo. La ventaja de este método es que el espesor de los elementos es de sólo unos pocos milímetros y que de los rápidos cambios térmicos pueden ser recogidas mediante las mediciones directas de las baldosas.

Por medio de los dos métodos anteriores, se consigue una mayor precisión de la medida y es posible reducir la duración de la prueba significativamente. En una semana de mediciones se recoge suficiente información para que los principales parámetros térmicos se puedan determinar.

A continuación se presentan los métodos de identificación de parámetros utilizados en las células PASLINK:

4.3.1.1 Modelo espacio-estado (*State space models*)

Los modelos de espacio estado son el enfoque más general para representar sistemas dinámicos. Los parámetros físicos del sistema aparecen de manera explícita en el interior del modelo lo que es una ventaja cuando se aplican las técnicas de identificación. Los modelos de espacio-estado pueden ser deterministas o estocásticos, lineal o no lineal, variable tiempo o invariable en el tiempo y pueden ser tratadas a tiempo continuo o discreto.

4.3.1.1.1 Resumen de la metodología para un modelo Continuous time stochastic nonlinear state-space models

- Kristensen NR, Madsen H, Jørgensen SB. Parameter estimation in stochastic grey-box models. Automatica 2004;40:225-37 [112].
- Friling N, Jiménez MJ, Bloem H, Madsen H. Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules. Energy Build 2009;41:1051-7 [109].
- Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62 [110].
- Jiménez MJ, Madsen H, Bloem JJ, Dammann B. Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules. Energy Build 2008;40:157-67 [107].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy 2008;82:573-87 [111].

4.3.1.1.2 Resumen de la metodología para un modelo Continuous time stochastic linear state-space models

- Madsen H, Holst J. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building. Energy Build 1995;22:67-79 [114].
- Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62 [110].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. Build Environ 2009;44:361-7 [113].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy 2008;82:573-87 [111].

4.3.1.1.3 Resumen de la metodología para un modelo Discrete time stochastic linear state-space models

- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. Build Environ 2009;44:361-7 [113].

4.3.1.1.4 Resumen de la metodología para un modelo Continuous time deterministic nonlinear state-space models

- Mejri O, Palomo Del Barrio E, Ghrab-Morcos N. Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques. Energy Build 2011;43:285-99 [115].
- Palomo Del Barrio E, Guyon G. Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools. Energy Build 2003;35:985-96 [116].

4.3.1.2 *Proceso autoregresivo y media móvil con variables exógenas (autoregressive-moving-average (ARMAX))*

Los modelos ARMAX describen el error en la ecuación como un promedio móvil, pueden ser de forma discreta o continua en el tiempo. Se denota y define como indican las siguientes ecuaciones:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + C(q)e(t)$$

$$C(q) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_n q^{-n}$$

Eq. 6

La forma continua en el tiempo se utiliza en la teoría de control con señales analógicas.

Dado que los ensayos se realizan en la célula de ensayo PASLINK los datos se registran de forma discreta en el tiempo, por lo que sólo los modelos de tipo ARMAX de tiempo discreto son válidos.

En función de la disposición, los modelos ARMAX se nombran de manera diferente. Los modelos tipo ARMAX de tiempo discretos pueden ser transformados por z - transforman en forma de función de transferencia. El modelo de un sistema en forma de función de transferencia (o la forma ARMAX) puede obtenerse a partir de la forma modelo general,

y también de la forma de espacio-estado. Durante la transformación de la forma espacio de estado a tipo ARMAX o función de transferencia forman los parámetros físicos quedan ocultos. Esto significa que algunos de los parámetros (o funciones) del modelo que se identificó debe ser posteriormente relacionada con los parámetros físicos que quieren ser identificados.

4.3.1.2.1 Resumen de la metodología para un modelo Discrete time tranfers function form

- Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62 [110].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy 2008;82:573-87 [111].

4.3.1.2.2 Resumen de la metodología para un modelo ARMAX

- Jiménez MJ, Madsen H, Andersen KK. Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB. Build Environ 2008;43:170-80 [117].
- Norlén U. Estimating thermal parameters of outdoor test cells. Build Environ 1990;25:17-24 [118].

4.3.1.2.3 Resumen de la metodología para un modelo ARX

- Jiménez MJ, Heras MR. Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing. Solar Energy 2005;79:302-10 [119].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. Build Environ 2009;44:361-7 [113].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy 2008;82:573-87 [111].

4.3.1.2.4 Resumen de la metodología para un modelo FIR

- Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62 [110].

4.3.1.2.5 Modelo output error (OE)

El modelo Output-Error (OE), es un tipo de modelo ARMAX, el cual posee una relación de entrada/salida sin perturbación, y que adicionalmente posee ruido blanco en la salida.

4.3.1.3 *Regresión lineal*

El modelo de regresión lineal, describe la situación o estado de equilibrio en situación estacionaria, se puede obtener directamente de los modelos de estado utilizando el hecho de que, en la situación estacionaria, $dT / dt = 0$. Este modelo no tiene en cuenta la dinámica del sistema.

4.3.1.3.1 Resumen de la metodología para un modelo de Regresión lineal:

- Jiménez MJ, Madsen H. Models for describing the thermal characteristics of building components. Build Environ 2008;43:152-62 [110].
- Baker PH, van Dijk HAL. PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. Build Environ 2008;43:143-51 [120].

4.3.2 **Método parámetros concentrados (RC)**

El modelo de caja gris fue desarrollado durante los años 70 para representar el comportamiento térmico de una vivienda. En primer lugar, es necesario el conocimiento físico de los elementos que conforman la envolvente para poder formular en base a ellos un conjunto de ecuaciones diferenciales y poder así desarrollar el método. Las ecuaciones diferenciales describen un modelo de la dinámica térmica del edificio. El modelo de la parte física se combina con la información obtenida por los datos observados insitu que después se utilizarán para la estimación de los parámetros.

Algunos autores como Ramallo-González *et al.* (2013) [121], se han enfrentado a la problemática de la caracterización térmica de elementos constructivos, haciendo frente a este problema mediante simulaciones simples [122, 123]. Algunas determinaciones se

basan en modelos dinámicos lineales, basados en la teoría de la transferencia de calor y la resistencia y su analogía con la capacitancia.

La ecuación de transferencia de calor a través de sólidos podría suponerse lineal, y puede representarse mediante la analogía eléctrica. Dentro de esta analogía, la conductividad de los materiales se representa como conductividad eléctrica, y la capacidad térmica de los materiales como la capacidad eléctrica.

Por lo tanto, estos modelos, los llamados modelos de parámetros concentrados, simplifican la descripción del comportamiento de los sistemas físicos en un modelo que consiste en entidades discretas que se aproximan al comportamiento del sistema bajo ciertos supuestos. Los principios fundamentales de cálculo de estos modelos se basan en el cálculo de las redes eléctricas.

La caracterización de edificios mediante los modelos de caja gris consiste en representar los diferentes elementos constructivos que definen el edificio con resistencias y capacitancias (RC) que representa el sistema físico: una pared se divide en diferentes nodos que están interconectados con conductancias térmicas (H) y capacidad (C).

Se pueden establecer diferentes niveles de detalle. Llegando a poder definir una construcción de capas múltiples simplemente con dos resistencias, una capacitancia y un nodo interno. Obviamente, incluyendo todas las capas que constituyen la pared y todas las superficies de la envolvente se puede conseguir definir completamente el edificio mediante grandes redes de RC. El nivel de detalle será fijado por el autor en base a los objetivos del modelo y a la información disponible.

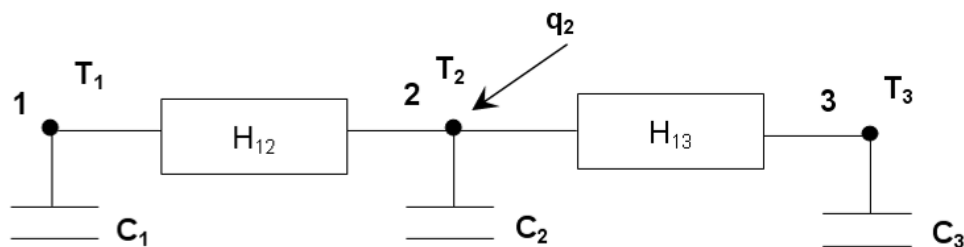


Fig. 2. 15. Esquema del balance de energía en un nodo (nodo número 2)

En la Figura 2.15 se muestra un ejemplo RC donde se observa el balance de calor en el nodo número 2, a continuación se presenta la ecuación Eq. 7 que lo define:

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = (T_1 - T_2) \cdot H_{1-2} + (T_3 - T_2) \cdot H_{2-3} + q_2 \quad \text{Eq. 7}$$

Donde H_{1-2} y H_{2-3} son las conductancias y q_2 es el flujo externo de calor (de la radiación solar, la calefacción o la refrigeración del sistema, etc.). Una ecuación diferencial análoga es válida para el resto de los nodos de temperatura desconocida.

La Eq.7 puede ser escrita en forma de diferencias finitas como:

$$\frac{dT_2}{dt} \approx \frac{\Delta T_2}{\Delta t} = \frac{T_2(t+1) - T_2(t)}{\Delta t} = \frac{T_{2,k+1} - T_{2,k}}{\Delta t} \quad \text{Eq. 8}$$

Una ecuación similar a la Eq. 8 puede ser escrita para todos los nodos con temperatura desconocida, de esta manera se obtiene un sistema de ecuaciones en forma de diferencias finitas. En el caso de que sólo se utilice una salida (output) para la identificación, se ajustarán los parámetros de las ecuaciones hasta que se reduzca al mínimo el error Eq. 9:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N ((T_{obs} - T_{calc}))^2 \quad \text{Eq. 9}$$

Los parámetros del modelo contienen, las propiedades térmicas del estado dinámico y del estado estacionario del sistema. Para las mismas condiciones de entrada (inputs) se comparan con las salidas (output) obtenidas del ensayo llevado a cabo con la salidas (outputs) producidas por el modelo. Los parámetros se ajustan por iteraciones con el fin de reducir y minimizar la desviación entre la medida y la salida del modelo. Este proceso iterativo se lleva a cabo con la ayuda de herramientas de software especializados (por ejemplo, LORD, CTSM)

La Figura 2.16 muestra un esquema del principio de identificación de parámetros.

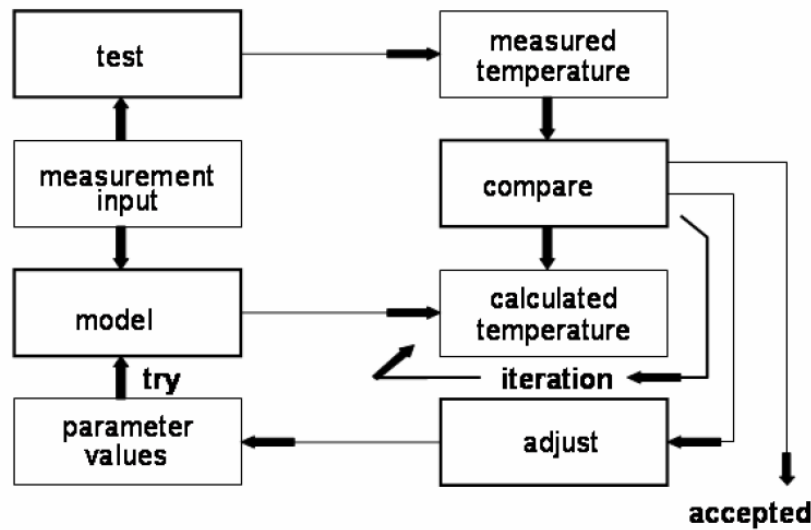


Fig. 2. 16. Principle of parameter identification

Es necesario obtener información estadística sobre la fiabilidad de los parámetros identificados. La fiabilidad puede verse afectada negativamente por los errores de medición y modelo y por la correlación entre los parámetros.

Los requisitos que debe cumplir un modelo son los siguientes [124]:

- El modelo debe ser capaz de reproducir con precisión los procesos térmicos de estado estacionario y de estado dinámico.
- Debe ser capaz de relacionar las propiedades físicas con las definiciones de las normas internacionales.
- No debe ser demasiado detallado, es decir, debe evitar que algunos de los parámetros no puedan ser identificados debido a la correlación con otros de los parámetros del modelo.
- Debe introducir la experiencia previa de otros modelos.
- Debe permitir la opción de añadir características lineales específicas, tales como una resistencia térmica que cambia con la temperatura o con la velocidad del viento , o transmitancia solar que cambia con las condiciones solares

4.3.2.1 *Resumen de la metodología para un modelo RC*

- Olaf G. Parameter Identification under difficult conditions - How much information is contained in the objective function? Athen Workshop Proceedings 2005 [128].
- Olaf G. Parameter identification with the software package LORD. Build Environ 2008;43:163-9 [129].
- Baker PH, van Dijk HAL. PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. Build Environ 2008;43:143-51 [120].
- Davies MG. Optimum design of resistance and capacitance elements in modelling a sinusoidally excited building wall. Build Environ 1983;18:19-37 [125].
- Gouda MM, Danaher S, Underwood CP. Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. Build Environ 2002;37:1255-65 [126].
- Hammarsten S, van Hatten D, Bloem H, Colombo R. Passive solar component testing with identification methods. Solar Energy 1988;41:5-13 [127].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value. Build Environ 2009;44:361-7 [113].
- Jiménez MJ, Porcar B, Heras MR. Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions. Solar Energy 2008;82:573-87 [111].

4.3.2.2 *Ventajas y limitaciones del modelo de caja gris*

Los modelos de RC requieren una pequeña cantidad de información para la determinación del comportamiento térmico de los elementos constructivos. Además, los datos requeridos pueden ser obtenidos directamente a partir de mediciones realizadas insitu. Esto hace que el desarrollo del modelo sea más sencillo, siempre que sea posible la obtención de los datos del elemento constructivo.

Es decir, la representación del modelo de transferencia de calor de un elemento constructivo puede ser explicada por modelos RC, de modo que se pueden construir modelos basados en ecuaciones de balance energético cuyos límites de aplicabilidad vendrán impuestos por los supuestos que implica aceptar su utilización en problemas de

transferencia de calor en sólidos bajo condiciones de ensayo in-situ, regidas por la meteorología del lugar [130].

4.3.2.3 Pasos para el desarrollo del modelo de caja gris

En general, los datos gestionados por un modelo se dividen en tres grupos: variables independientes (x), variables dependientes (y) y los parámetros del modelo (A, B, \dots), que definen $f(x)$ dependiendo de los valores desconocidos del modelo y , a continuación, se obtiene el modelo. Para desarrollar un modelo se pueden llevar a cabo tres metodologías de trabajo diferentes: Procedimiento directo, Procedimiento inverso y Procedimiento integrado.




	Conocido	Desconocido	Uso
 $y = Ax$	$x, f(x)$	y	Verificación
Directo: - Simulación			
 $A = x/y$	x, y	$f(x)$	Diseño
Inverso: - Identificación de parámetro - Estimación de estado - Estimación de estructura			
 $x = y/A$	$f(x), y$	x	Control
Control - Control			

Fig. 2. 17. Tipos de procedimientos llevados a cabo en modelos RC

El procedimiento directo se utiliza cuando se conocen los parámetros del modelo y los resultados sobre la respuesta del modelo. Las simulaciones típicas de construcción siguen este procedimiento, donde se sabe cuáles son las condiciones externas que afectan al modelo (condiciones meteorológicas) y los parámetros (que definen las características de construcción, tales como la resistencia térmica y la capacidad), y el objetivo es obtener la respuesta del edificio (por ejemplo, la temperatura interior o la energía de consumo).

El procedimiento inverso se puede utilizar de dos maneras. La primera es cuando se desconocen los parámetros característicos del modelo, pero las entradas y respuestas del modelo son conocidas. Un ejemplo de este caso es el procedimiento de identificación de parámetros, mediante el uso de datos experimentales (entradas y salidas) para conseguir definir los parámetros.

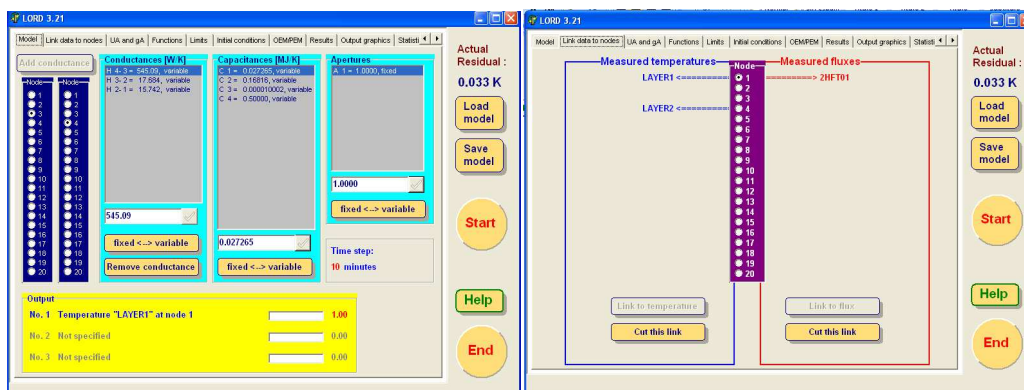
La segunda forma del procedimiento inverso es cuando sólo se conocen los parámetros y las respuestas del modelo, y la parte desconocida corresponde a la entrada del modelo. Esta es una situación típica en los modelos de control, por ejemplo, donde se definen las características del edificio, y el modelo calcula las entradas para obtener esa salida definida (por ejemplo, la entrada de calor).

Por último, algunas ocasiones requieren el uso de procedimiento tanto directo como inverso, este es el denominado procedimiento compuesto.

4.3.2.4 Identificación de parámetros concentrados - Software Lord

El MRQT (Marquardt-Levenberg) [131] constituyó la base para la creación del software LORD [129]. MRQT identifica los valores de los parámetros que producen la mínima desviación media cuadrática entre la salida medida y la total calculada (o sobre una parte seleccionada) del período de ensayo (Output Error Method –OEM). El enfoque del modelo se basa en un modelo RC de parámetros concentrados escrito como diferencias finitas.

El programa LORD permite el modelado e identificación térmica de los elementos constructivos, tales como, envolventes, ventanas, e incluso edificios completos. Para su correcta aplicación es necesario un cierto grado de experiencia. El programa está equipado con un interfaz gráfico que facilita el uso por parte del usuario ver Fig. 2.18.



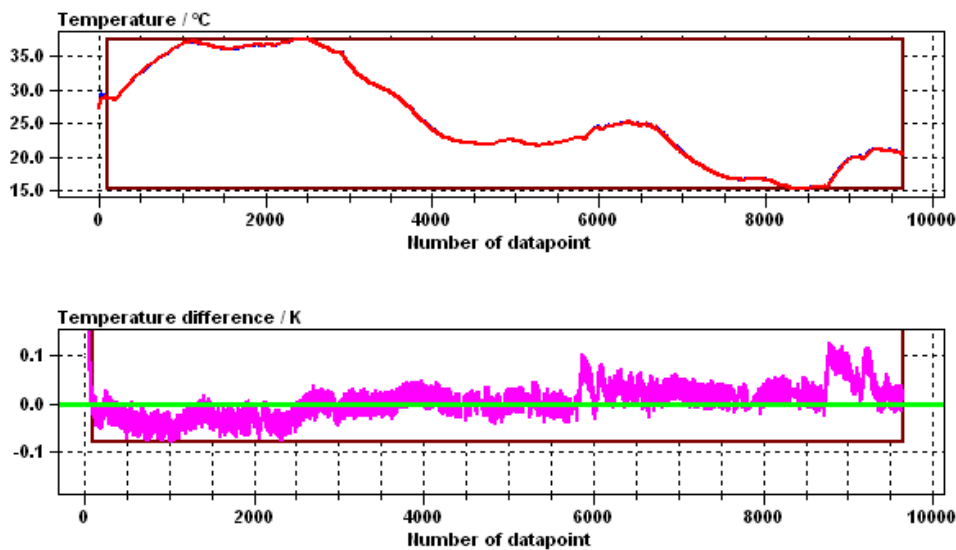


Fig. 2. 18. Interfaces del programa LORD .Introducción de datos, análisis de los parámetros así como los resultados

El método que utiliza para la identificación es el de parámetros concentrados, que describe el sistema térmico como una red eléctrica analógica (RC). El uso de este programa proporciona varias mejoras, una de ellas es el tratamiento estocástico de los datos. El método de estimación de errores que utiliza es el OEM (Output Error Method). Estos desarrollos del programa han producido mejores resultados y han ampliado su aplicación.

LORD se ha adaptado a las necesidades específicas de la Red PASLINK, para el caso de experimentos de células de ensayo. También es posible especificar resistencias y capacitancias variables que pueden ser funciones (no lineales) de variables de entrada tales como la velocidad del viento y la temperatura.

4.3.3 Modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas (SDE).

El modelo de ecuaciones diferenciales estocásticas (SDE) consiste en un conjunto de ecuaciones de medición de tiempo discreto. Este tipo de modelo refleja correctamente los sistemas dinámicos, donde la dinámica de los sistemas es continua y, al mismo tiempo están sujetos a los efectos aleatorios, mientras que, las mediciones son intrínsecamente discretas. Por otra parte, muchas características de los sistemas, sobre todo aspectos físicos, químicos o biológicos, tienen un elevado número de variables de estado, de las cuales por lo general sólo un subconjunto se puede medir, y esto se expresa fácilmente por este tipo de modelos.

Otra ventaja de los modelos SDE es que permiten una descomposición del ruido que afecta el sistema en, un término de ruido del proceso y en un término de ruido de la medición. Como consecuencia de esta descomposición del error de predicción, los parámetros desconocidos de los modelos se pueden estimar a partir de datos experimentales en un error de predicción (PEM). Este modelo se opone al error más comúnmente utilizado de salida de ajuste (OEM), lo que da resultados más sesgados y más reproducibles en presencia de ruido. Esto significa, que los efectos aleatorios son absorbidos en las estimaciones de los parámetros.

Por otra parte, la estimación PEM permite la posterior aplicación de una serie de herramientas estadísticas que proporcionan indicaciones para posibles mejoras en la estructura del modelo. En particular, las estimaciones de los parámetros del término de difusión pueden ser utilizadas para evaluar la calidad de un modelo, e identificar deficiencias entre modelos con el fin de optimizarlo.

Una vez conseguidas las ecuaciones que representan el modelo que se desea estudiar, se pueden estimar los parámetros basándose en la aplicación del principio de máxima verosimilitud, es decir, hallando el valor de los parámetros que maximiza la función densidad de probabilidad. La evaluación de la función de verosimilitud que es necesaria realizar para poder conocer la función de densidad de probabilidad se puede obtener mediante la utilización de técnicas de filtrado de estados como por ejemplo, el Filtro de Kalman.

El Filtro de Kalman es un algoritmo predictivo que produce una estimación de los valores de una serie temporal de valores no observados, usando los valores de otras series temporales de variables observadas y relacionadas con la primera. Esta estimación de valores no observados puede ir acompañada de la estimación de parámetros del modelo teórico que genera esos valores no observados. Las estimaciones de la variable no observada, así como las de los parámetros de su modelo teórico, son actualizadas a intervalos regulares de tiempo, coincidentes con la disponibilidad de nuevos valores de las variables observadas. El filtro de Kalman obtiene un nuevo valor para la variable no observada [132]

Posteriormente se deben resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales estocásticas lo que permite que conjuntos de datos independientes se puedan utilizar. Una vez estimados los parámetros, se pueden aplicar diversos métodos estadísticos para verificar la calidad del modelo.

4.3.3.1 Identificación de parámetros Software CTSM-R

El CTLSM (Continuous time linear stochastic modelling-CTLSM) [133] es un método estocástico que tiene en cuenta las incertidumbres, tanto de las mediciones como de los cálculos. Es un modelo que utiliza ecuaciones diferenciales estocásticas. El CTLSM se ha convertido en el programa informático CTSM-R [134] (continuous time stochastic modelling- CTSM) utilizado para la estimación e identificación de sistemas físicos, tales como la dinámica térmica de un edificio completo, las características térmicas de las envolventes de los edificios, la dinámica de los intercambiadores de calor, radiadores y termostatos, etc...

Las ecuaciones diferenciales estocásticas tienen un término de difusión para explicar los efectos aleatorios. Por lo tanto, los principios de modelado convencionales pueden aplicarse para establecer el modelo de estructura.

Con el modelo de estructura aportado, el programa proporciona métodos para estimar los datos de los parámetros desconocidos del modelo, incluyendo los parámetros del término de difusión. Estos métodos son capaces de manejar modelos lineales y no lineales. El programa también es capaz de proporcionar flexibilidad con respecto a los conjuntos de datos que pueden ser utilizados para la estimación. La estimación de los parámetros se realiza con el método de máxima verosimilitud (ML).

A continuación se muestran los criterios para la determinación de modelo y su validación [117]:

1. Ajuste a los datos. Los residuos del modelo deben ser pequeño y en forma de "ruido blanco". Una condición necesaria para ' ruido blanco ' es que no debe existir ni autocorrelación en los residuos, ni correlación entre los residuos y las variables de entrada
2. La validez interna. El modelo debe estar contrastado con datos diferentes a los datos utilizados para la estimación de parámetros (validación cruzada)
3. La validez externa. El resultado del modelo no deben estar en oposición con experiencias previas u otras condiciones conocidas.
4. Estabilidad dinámica. A partir de un estado de equilibrio, el modelo debe dar una salida a cada cambio temporal en una variable de entrada
5. Identificabilidad. Debe ser posible determinar los parámetros del modelo de forma única a partir de los datos.
6. Simplicidad. El modelo debe ser lo más simple posible.

Dentro del programa CTSM -R los modelos de espacio de estado estocástico continuo-discretos se dividen en tres clases distintas:

4.3.3.1.1 Modelos no lineales (Nonlinear models NL)

El CTSM-R puede contener ecuaciones de espacio- estado en una forma general, la clase No Lineal (NL) modelos descritos por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} dx_t &= f(x_t, u_t, t, \theta) \cdot dt + \sigma(u_t, t, \theta) \cdot dw_t \\ y_k &= h(x_k, u_k, t_k, \theta) + e_k \end{aligned} \quad \text{Eq. 10}$$

En la Ecuación de estado del sistema $t \in \mathfrak{R}$ es el tiempo, $x_t \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de las variables de estado, $u_t \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de las variables de las estradas (input variables).

En la Ecuación de observación: $y_k \in \mathfrak{R}^l$ son las variables de salida del modelo (output variables) medidas en un tiempo discreto, $\theta \in \mathfrak{R}^p$ es el vector de los parámetros definidos en un tiempo continuo, $f(\cdot) \in \mathfrak{R}^n$, $\sigma(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ y $h(\cdot) \in \mathfrak{R}^l$ son funciones lineales,

$\{w_t\}$ es un proceso de Wiener que representa el error del proceso. $\{e_k\}$ es el ruido blanco que representa el error residual del modelo $e_k \in N(0, S(u_k, t_k, \theta))$. $\{e_k\}$ es el error medido y se supone que está distribuido normalmente con ruido blanco, media igual a cero y varianza $S(u_k, t_k, \theta)$.

Una vez obtenidas las ecuaciones que representan al modelo que se desea estudiar, se pueden estimar los parámetros basándose en la aplicación del principio de máxima verosimilitud, es decir, hallando el valor de los parámetros que maximiza la función densidad de probabilidad posterior, definida por la siguiente ecuación:

$$p\left(\frac{\theta}{Y}\right) \propto p\left(\frac{Y_N}{\theta}\right) p(\theta) \quad \text{Eq. 11}$$

Donde Y_N es una secuencia estocásticamente independiente de N medidas consecutivas como se representa en la siguiente ecuación:

$$Y_N = [Y_N \dots Y_1, Y_0] \quad \text{Eq. 12}$$

De modo tal que la estimación de los parámetros se hará de acuerdo al cumplimiento de la expresión mostrada en:

$$\hat{\theta} = \arg \min \{-\ln(p(\theta, Y))\} \quad \text{Eq. 13}$$

4.3.3.1.2 Modelos de tiempo lineal variante (LTV)

El CTSM puede gestionar modelos más simples, tales como modelos lineales variantes en el tiempo (linear time varying-LTV). Los modelos LTV son una simplificación del modelo no lineal descrito por la ecuación. El modelo de LTV se describen de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 dx_t &= (A(x_t, u_t, t, \theta) \cdot x_t + B(x_t, u_t, t, \theta) \cdot u_t) \cdot dt + \sigma(u_t, t, \theta) \cdot dw_t \\
 y_k &= C(x_k, u_k, t_k, \theta) \cdot x_k + D(x_k, u_k, t_k, \theta) \cdot u_k + e_k
 \end{aligned} \quad \text{Eq. 14}$$

Donde $t \in \Re$ es el tiempo, $x_t \in \Re^n$ es el vector de las variables de estado, $u_t \in \Re^m$ es el vector de las variables de las estradas (input variables); $y_k \in \Re^l$ son las variables de

salida del modelo (output variables) medidas en un tiempo discreto; $\theta \in \mathfrak{R}^p$ es el vector de los parámetros definidos en un tiempo continuo, $A(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times m}$, $\sigma(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $C(\cdot) \in \mathfrak{R}^{l \times n}$ y $D(\cdot) \in \mathfrak{R}^{l \times m}$ son funciones lineales, $\{w_t\}$ es un proceso de Wiener que representa el error del proceso $\{e_k\}$ es el ruido blanco que representa el error residual del modelo con $e_k \in N(0, S(u_k, t_k, \theta))$. $\{e_k\}$ es el error medido y se supone que está distribuido normalmente con ruido blanco, media igual a cero y varianza $S(u_k, t_k, \theta)$.

4.3.3.1.3 Modelos de tiempo lineal invariante (LTI)

Por último, existe otro método donde se supone que los parámetros son invariantes en el tiempo. Son un tipo más simple de los modelos que la presentada en la ecuación anterior.

$$\begin{aligned} dx_t &= (A(\theta) \cdot x_t + B(\theta) \cdot u_t) \cdot dt + \sigma(\theta) \cdot dw_t \\ y_k &= C(\theta) \cdot x_k + D(\theta) \cdot u_k + e_k \end{aligned} \quad \text{Eq. 15}$$

Donde $t \in \mathfrak{R}$ es el tiempo, $x_t \in \mathfrak{R}^n$ es el vector de las variables de estado, $u_t \in \mathfrak{R}^m$ es el vector de las variables de las estradas (input variables); $y_k \in \mathfrak{R}^l$ son las variables de salida del modelo (output variables) medidas en un tiempo discreto; $\theta \in \mathfrak{R}^p$ es el vector de los parámetros definidos en un tiempo continuo, $A(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $B(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times m}$, $\sigma(\cdot) \in \mathfrak{R}^{n \times n}$, $C(\cdot) \in \mathfrak{R}^{l \times n}$ y $D(\cdot) \in \mathfrak{R}^{l \times m}$ son funciones de tiempo invariables lineales, $\{w_t\}$ es un proceso de Wiener que representa el error del proceso $\{e_k\}$ es el ruido blanco que representa el error residual del modelo con $e_k \in N(0, S(u_k, t_k, \theta))$. $\{e_k\}$ es el error medido y se supone que está distribuido normalmente con ruido blanco, media igual a cero y varianza $S(\theta)$.

4.3.3.1.4 Resumen de la metodología para un modelo de espacio de estados en tiempo continuo

- H. Madsen, J. Holst, Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy and Buildings* 22 (1) (1995) 67-79 [114].
- K. K. Andersen, H. Madsen, L. H. Hansen, Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations, *Energy and Buildings* 31 (1) (2000) 13-24 [135]
- N. Kristensen, H. Madsen, Continuous Time Stochastic Modelling CTSM 2.3 User Guide (2003) [134].
- R. Juhl, CTSM for R, r package version 0.5.0-12 (2012) [136].
- R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing (2012) [1].

4.3.3.2 *Autocorrelación de los residuos*

El concepto estadístico de autocorrelación en el análisis de residuos, define la autocorrelación de una serie temporal de un proceso X_t como la correlación de dicho proceso con una versión desplazada en el tiempo de la propia serie temporal.

Si X_t representa un proceso estacionario de segundo orden con un valor principal de μ se define la Eq.16:

$$R(k) = \frac{E[(X_i - \mu)(X_{i-k} - \mu)]}{\sigma^2} \quad \text{Eq. 16}$$

Donde: E es el valor esperado y k el desplazamiento temporal considerado (normalmente denominado desfase). Esta función varía dentro del rango $[-1, 1]$, donde 1 indica una correlación perfecta (la señal se superpone perfectamente tras un desplazamiento temporal de k) y -1 indica una autocorrelación perfecta.

El concepto de autocorrelación se emplea para estudiar los residuos de los diferentes modelos empleados en el ensayo y así obtener de los parámetros térmicos de los elementos constructivos.

4.3.3.3 *Períodograma acumulado de los residuos*

La descomposición espectral de series temporales es una técnica que divide un objeto complejo en otros objetos más sencillos para poder estudiarlo más fácilmente.

Dada una serie temporal con n términos, consideraremos n par, es posible encontrar una suma de senos y cosenos, tales que sus periodos sean $n, n/2, \dots, n/(n/2) = 2$ que represente dicha serie.

Esto se puede expresar con la Eq 17.

$$x(t) - \bar{x} = \sum_{k=2}^{\frac{n}{2}+1} \gamma_k [a_k \cos(2\pi(t-1)\omega_k) + b_k \text{sen}(2\pi(t-1)\omega_k)] \quad \text{Eq. 17}$$

Donde, $\omega_k = (k-1)/n$, γ_k es dos, excepto cuando $k=n/2+1$ que es uno, y a_k y b_k son las partes real e imaginaria de la transformada discreta de Fourier $z(1), \dots, z(n)$ de los datos.

Realizando la transformada de Fourier podemos llegar a la siguiente expresión Eq.18 que es conocido como el períodograma acumulado de un conjunto de datos:

$$\hat{F}(\omega_k) = \frac{\sum_{j=1}^k \hat{f}(\omega_j)}{\sum_{j=1}^q \hat{f}(\omega_j)}, \quad k = 1, \dots, q = \left(\frac{n}{2}\right) + 1 \quad \text{Eq. 18}$$

\hat{F} comienza cerca de cero para $\omega_1 = 0$ y crece hasta ser igual a uno para $\omega_q = 0.5$ dado que \hat{f} es positivo por definición.

La interpretación del períodograma aplicado a un conjunto de datos, como se hará en el presente estudio, parte del hecho de que cuando se tiene una serie aleatoria que cumple con la definición de ruido blanco, \hat{F} es una línea recta que va desde (0,0) hasta (0.5,1). De modo que para series con un exceso de bajas frecuencias, \hat{F} comenzará por encima de la línea $y = 2x$ y para series con un exceso de frecuencias altas, \hat{F} comenzará por debajo de dicha línea. Además, podrán observarse en el períodograma acumulado las frecuencias para las que el conjunto de datos presente desviaciones apreciables de la línea recta que debería seguir un conjunto de datos con propiedades de ruido blanco.

4.3.3.4 Test de verosimilitud

Sea un modelo que contiene los parámetros $\theta \in \Omega_0$ donde $\Omega_0 \in \mathbb{R}^r$ es el espacio de los parámetros, y r -dim (Ω_0) es el número de parámetros en el modelo. Sean un modelo mayor que contiene los parámetros $\theta \in \Omega$ donde $\Omega_0 \in \mathbb{R}^m$ es el espacio de los parámetros, y m -dim (Ω), suponiendo que $\Omega_0 \subset \Omega$, es decir, el primer modelo es un submodelo del segundo modelo tal que, $r < m$.

Entonces, el test del cociente de máxima verosimilitud para determinar si es mejor estadísticamente el modelo que contiene los parámetros $\theta \in \Omega_0$ frente al modelo más complejo que contiene a los parámetros $\theta \in \Omega$ puede expresarse como:

$$\lambda(\gamma_N) = \frac{\sup_{\theta \in \Omega_0} L(\theta; \gamma_N)}{\sup_{\theta \in \Omega} L(\theta; \gamma_N)} \quad \text{Eq. 19}$$

Donde γ_N es el conjunto de los valores observados y puede utilizarse el contraste de hipótesis

$$H_0: \theta \in \Omega_0 \quad \text{vs} \quad H_a: \theta \in \Omega \setminus \Omega_0 \quad \text{Eq. 20}$$

Bajo la hipótesis H_0 el test estadístico $-2\log(\lambda(\gamma_N))$ converge como una distribución χ^2 con $(m-r)$ grados de libertad cuando el número de muestras de γ_N tiende a infinito. Si la hipótesis H_0 es rechazada frente a la hipótesis (esto será aceptado en el presente trabajo dentro de un intervalo de confianza del 95%, al aplicar el test estadístico del valor-p, es decir, cuando $(p < 0.05)$ la verosimilitud del modelo mayor, $\theta \in \Omega \setminus \Omega_0$, será significativamente mayor, dentro del intervalo de confianza elegido, que la verosimilitud del sub-modelo, $\theta \in \Omega_0$. Y se puede concluir estadísticamente que el modelo con los parámetros ajustado utilizando el conjunto de datos, es más verosímil, o en otro modo, el modelo mayor es estadísticamente mejor para describir la información imbuida en los datos [137].

5 Conclusiones

En el proceso de urbanización actual las ciudades crecen a un ritmo acelerado por lo que las actuales urbes, se presentan como sinónimo de crecimiento desordenado, especulación inmobiliaria, segregación social y contaminación ambiental. Tomando todo ello como principio esta Tesis doctoral tiene como objetivo general analizar sistemas de fachada ventilada y fachada vegetal para conseguir de forma pasiva reducir el gasto energético en la edificación, y éste sea beneficioso a todos los niveles urbanos incluyendo el consiguiente ahorro energético y mejora ambiental.

El estudio, se ha centrado en la rehabilitación de edificios mediante fachadas ventiladas y fachadas vegetales, para ello se han caracterizado los efectos térmicos y acústicos que estas tienen sobre los edificios. Se ha partido de un estudio detallado de la bibliografía existente relativa al campo de investigación. En primer lugar, se ha detallado la evolución y la relación que han tenido las fachadas vegetales a lo largo de la historia hasta llegar a los actuales sistemas de fachada vegetal.

En segundo lugar, se han analizado los efectos beneficios que las envolventes verdes presentan tanto a escala urbana como de edificio. La literatura científica está de acuerdo en su carácter beneficioso, pero la cuantificación de estos depende de muchos factores tales como el substrato y su contenido de humedad, tipo de plantas, densidad de plantación, índice foliar, así como, de las condiciones climáticas.

Posteriormente se ha realizado un análisis de los diferentes tipos de sistemas vegetales que actualmente podemos encontrar en el mercado. Para cada sistema, se detallan sus principales características. Señalar que el mercado de fachadas vegetales se encuentra todavía en fase de desarrollo tecnológico y se prevé que en los próximos años se trabaje en la optimización de los sistemas existentes y en el desarrollo de nuevos.

Con el fin de comparar el uso de las fachadas vegetales con otro tipo de sistemas de ahorro pasivo en la rehabilitación energética, y así facilitar su aplicación en diferentes ámbitos, se han caracterizado las fachadas ventiladas. Las fachadas ventiladas son un sistema constructivo que permite la fijación de un revestimiento independiente a la hoja de cerramiento. La separación del revestimiento respecto al cerramiento permite alojar una capa aislante y una cámara de aire, con las ventajas que esto supone en términos de

ahorro energético. Constituyen un campo muy amplio y altamente analizado que ha dado numerosas referencias.

Todos los ensayos de la Tesis se han desarrollado en células calorimétricas, de las cuales se hace un breve recorrido histórico y resumen de los diferentes tipos de ensayo que se pueden llevar a cabo. El estudio en células Paslink posibilita la realización de ensayos dinámicos a tiempo real con el objetivo de obtener características térmicas de los elementos constructivos que componen las envolventes del edificio. En cada uno de los diferentes tipos de ensayo se introduce la referencia de las publicaciones más destacadas.

Por todo ello, resulta obvio que a pesar de que se trata de una línea de investigación relativamente nueva, el estudio de fachadas vegetales constituye un campo totalmente abierto que seguirá dando resultados en el futuro. Además, debido a la gran presencia de superficies verticales en los entornos urbanos, la utilización de fachadas vegetales parece muy prometedora.

"No temas a las dificultades: lo mejor surge de ellas."

Rita Levi-Montalcini (1909-2012)



CAPÍTULO 3

ESTUDIO DE LOS COMPONENTES E INSTRUMENTACIÓN

RESUMEN

Este capítulo tiene por objetivo describir los componentes e instrumentación utilizados en los ensayos realizados, tanto en fachada ventilada como en fachada vegetal. La monitorización se llevó a cabo durante 22 meses en los que se obtuvieron datos de temperatura, humedad, consumos de las fachadas y datos meteorológicos. Entre otros aspectos, en este capítulo se muestra la importancia que toma la monitorización en el desarrollo posterior de los ensayos.

ABSTRACT

This chapter aims to describe the components and instrumentation used in tests for a ventilated façade and for a green wall. A field study was performed during 22 months. Data of temperature, humidity, consumption of façades and meteorological data were obtained. Amongst other factors, the importance of making monitoring in the further development of the tests is shown.

1 Introducción

Los sistemas experimentales estudiados se han llevado a cabo en dos células de ensayo Paslink, EGUZKI e ILARGI, en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco, Vitoria-Gasteiz, Álava.

El objetivo del LCCE es contribuir a la mejora del conocimiento sobre la calidad energética de los elementos de la edificación, llevando a cabo ensayos para determinar las propiedades térmicas de los cerramientos. Para lograr estos objetivos se realiza la caracterización térmica de materiales y componentes de construcción de manera experimental y numérica, así como se contribuye en la investigación y desarrollo de metodologías para la evaluación energética de materiales y viviendas.

El conocimiento de dichas propiedades persigue mejorar el diseño de edificios con vistas a aumentar su ahorro energético sin pérdida de confort, y poder predecir así el comportamiento térmico de los mismos.

El laboratorio dispone de dos células de ensayo (EGUZKI e ILARGI) equipadas con sistemas de acondicionamiento e instrumentación para el ensayo de componentes constructivos a escala real y bajo condiciones meteorológicas reales. Las células de ensayo disponen de una habitación de ensayo. Las paredes completamente aisladas de este dispositivo impiden el intercambio de energía entre la habitación de ensayo y el

exterior. En estas células es posible sustituir uno de los cerramientos originales, ya sea fachada o cubierta por el cerramiento a cuantificar. Una vez instalado este cerramiento sólo es significativa la parte del intercambio de energía a través de él, lo cual permite la caracterización energética del mismo.

Actualmente se realizan ensayos de diferentes tipos de componentes de la construcción en contacto con empresas del sector, además se trabaja en la mejora de los procedimientos de evaluación empírica de los componentes. Estas investigaciones van encaminadas tanto a la obtención de modelos empíricos, como al desarrollo mejora y optimización de los procedimientos de ensayos de los diferentes componentes. Para ello, se aplican métodos de análisis de datos estacionarios y/o dinámicos basados en técnicas de identificación de sistemas. En este laboratorio también es posible llevar a cabo ensayos para la validación de modelos de simulación obtenidos a partir de valores de diseño y geometría

En el presente trabajo se utilizan ambas células de ensayo, donde se estudiarán un muro de hoja doble antes y después de constituir una fachada ventilada y una fachada vegetal.

2 Objetivos del capítulo

Este capítulo se centrará en cuatro objetivos principales; el primero de ellos consta de la descripción en detalle de la composición y características del muro base de hoja doble, así como las dos soluciones constructivas estudiadas: fachada ventilada y fachada vegetal. La diferencia entre ambas soluciones constructivas reside en la última capa, en la primera se trata de una fachada ventilada ligera cerámica y la segunda se trata de una fachada vegetal modular.

La segunda cuestión que se presenta en este capítulo, es la descripción del sistema de adquisición de datos. Se presentan tanto el software utilizado para el control de prueba como el de adquisición de datos.

En tercer lugar, se presentan los sensores instalados en las celdas de ensayo EGUZKI e ILARGI que serán los empleados en las pruebas realizadas, junto a ellos también se describirá la instrumentación utilizada para la adquisición de los datos climatológicos. Este conjunto mínimo de sensores son los descritos en la documentación de garantía de calidad de la red PASLINK.

Finalmente, se describen los sensores utilizados en el interior de los componentes de ensayo de fachada en detalle. Estos sensores son específicos de cada muestra de ensayo.

3 Definición de los componentes de ensayo

3.1 Composición y características del muro base de doble hoja

El muro base consiste en un cerramiento vertical de doble hoja constituido de exterior a interior por los siguientes materiales: ladrillo caravista a media asta de 10.5 cm, cámara de aire de 10 cm de espesor, tabique de ladrillo hueco doble de 6.4 cm de espesor y mortero de cemento junto a raseo fino de 1.5 cm de espesor. Las dimensiones de la muestra han sido 2.7 x 2.7 metros (superficie de la muestra 7.3 m²). La muestra ha sido construida sobre un premarco aislante. Características de los ladrillos utilizados:

- El ladrillo hueco doble tiene unas dimensiones medidas de 322 mm de largo, 141 mm de alto y 64 mm de espesor. El peso medio medido del bloque es de 1.735 kg (Fig. 3.1)
- El ladrillo caravista tiene unas dimensiones medidas de 49 mm de alto, 228 mm de largo y 105 mm de espesor. El peso medio medido del bloque ha sido de 2.463 kg (Fig. 3.1).

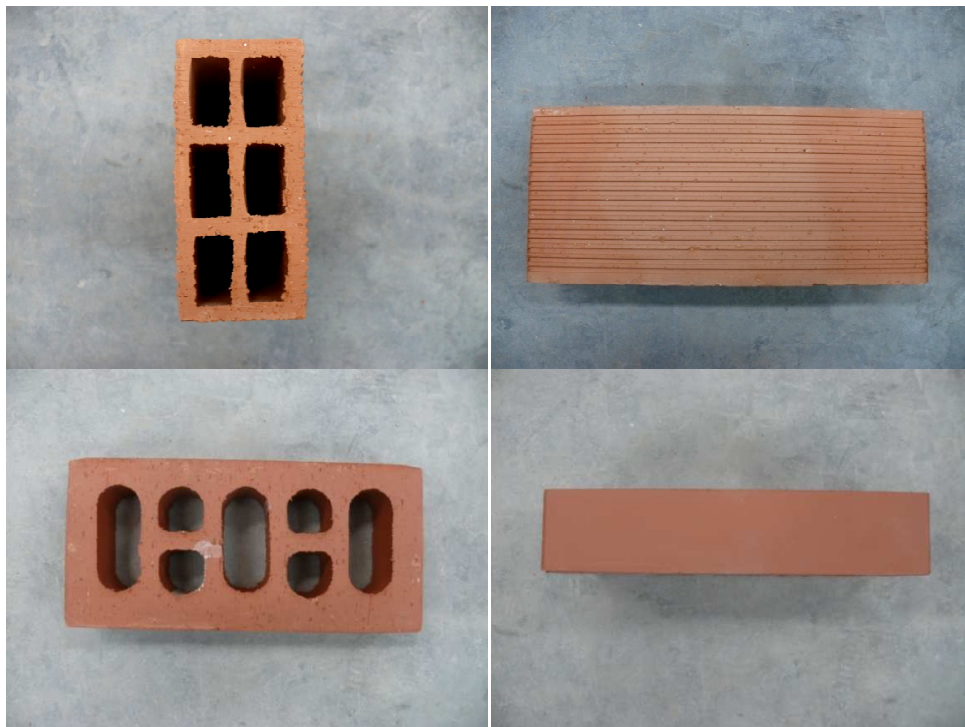


Fig. 3. 1. Arriba detalle del ladrillo hueco doble. Abajo detalle del ladrillo caravista

En la siguiente imagen (Fig. 3.2.) se pueden observar los dos tipos de ladrillos utilizados para este ensayo separados mediante la cámara de aire:



Fig. 3. 2. Detalle del ladrillo hueco doble con cámara de aire y ladrillo caravista

En la siguiente imagen (Fig. 3.3.) se observa el detalle de la construcción del ladrillo caravista y el detalle de la distancia de la cámara de aire.



Fig. 3. 3. Detalle del ladrillo caravista y de la cámara de aire

A continuación (Fig. 3.4.) se presenta en detalle los pasos del levante de los ladrillos que componen la muestra del muro de hoja doble y su posterior raseo:



Fig. 3.4. Detalle del levante del ladrillo y raseado del muro base de doble hoja

En la siguiente imagen (Fig. 3.5.) vemos el detalle del espesor del revestimiento de mortero y el revestimiento de mortero (Fig. 3.6.) aplicado sobre el ladrillo caravista.



Fig. 3.5. Detalle del mortero de cemento +Raseo fino de 1,5 cm



Fig. 3. 6. Fotografía de la aplicación de revestimiento de mortero de cemento sobre el muro base

3.2 Composición y características de la fachada ventilada

La fachada ventilada ligera está compuesta de un revestimiento exterior cerámico, una subestructura metálica portante anclada a la fachada del muro base mediante unos ángulos, una cámara de aire (5 cm) y un aislamiento térmico de lana de roca (5 cm).

La estructura metálica portante (aluminio) actúa como soporte, a la que se han fijado plaquetas de material cerámico, mediante unos perfiles de aluminio adheridos a ellas y que se encajan sobre los soportes horizontales de la estructura metálica, ver Fig. 3.9.

La estructura metálica sirve de soporte a las losas cerámicas, esta va anclada al muro base mediante unos ángulos atornillados. Los ángulos están separados del muro base 5 cm, permitiendo que la fachada ventilada quede vertical. La separación forma una cámara de aire ventilada con entrada de aire inferior y a través de las separaciones verticales y horizontales entre losas. Las losas por su parte, se unen a la estructura metálica colgando de unas pletinas con un perfil específico que están atornilladas a los perfiles cuadrados.

En la Figura 3.7 se muestra de forma esquemática la muestra de fachada de doble hoja ventilada con acoplado cerámico, formada por el muro base de doble hoja más el aislante, lana de roca, cámara de aire, y las placas de cerámica.

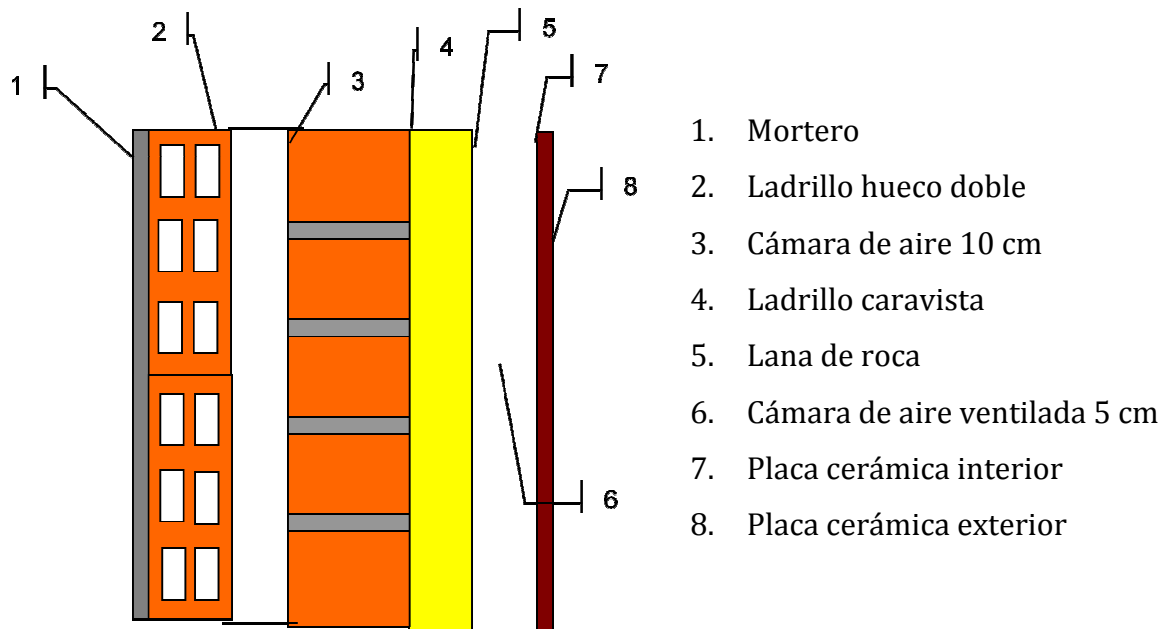


Fig. 3. 7. Detalle de la composición de la fachada ventilada ensayada

El material utilizado como aislante es la lana de roca Rockwool Alpharock E. A 60 x 60 x 5 cm (Fig. 3.8.). Esta muestra de lana de roca ha sido testada en el conductivímetro del laboratorio LCCE según la norma EN 12667 (HFM 436/6 de Netzsch) dando un valor de conductividad térmica de $0.033 \pm 3 \%$ [W/m °C] a una temperatura media de 10 °C con un valor de incertidumbre del 3 %.



Fig. 3. 8. Aislante utilizado en la fachada ventilada

Entre el aislante, lana de roca, y las placas cerámicas se ha dejado una cámara de aire de 5 cm. Finalmente como revestimiento exterior, se han colocado sobre los portantes unidos a la muro base las placas cerámicas de 1.2 cm.

A continuación (Fig. 3.9.) se detalla gráficamente el montaje de la fachada ventilada cerámica ligera sobre el muro base de hoja doble:



Fig. 3. 9. Detalle gráfico de la instalación de la fachada ventilada. Arriba en primer lugar se muestra la fachada caravista donde se han colocado los anclajes de sustentación. A continuación, se muestran los anclajes utilizados para la lana de roca y su colocación. Abajo, se puede observar la estructura metálica portante anclada a la fachada original y la colocación de las placas cerámicas sobre los portantes

3.3 Composición y características de la fachada vegetal

La fachada vegetal consta de un modulo vegetal, una subestructura metálica de soporte a la fachada del muro base, una cámara de aire (5 cm) y sistema de riego y drenaje.

A continuación se presentan las características y composición de la fachada vegetal ensayada. En la Figura 3.10 se muestra de forma esquemática la muestra de fachada vegetal formada por el muro base más la estructura de soporte y los módulos prevegetados.

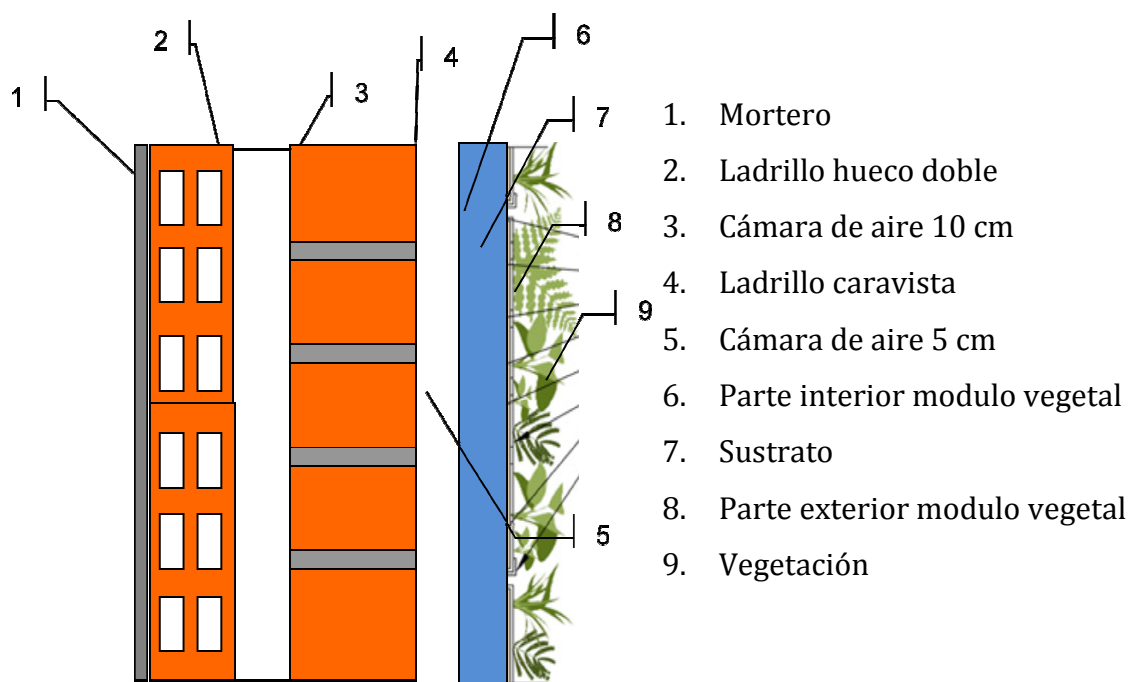


Fig. 3. 10. Detalle de la composición de la fachada vegetal ensayada

3.3.1 Módulo vegetal

Los módulos vegetales utilizados en el ensayo están contruidos de materiales reciclados y reciclables, por lo que la unidad se puede considerar sostenible. Constan de las siguientes partes, el modulo de polietileno reciclado, el sistema de anclaje, el sistema cerrado de fertirrigación y drenaje, el sustrato y la vegetación (Fig. 3.11).

Lo módulos están fabricados en polietileno reciclado resistente a la radiación ultravioleta de dimensiones, 600 mm de ancho por 400 mm de alto y 80 mm de espesor. No contienen ningún material de cloruro de polivinilo (PVC) por lo que son aptos para construcción sostenible. Gracias a sus dimensiones proporcionan una reserva hídrica suficiente para minimizar riesgos de falta de agua [138].

Los módulos, en su parte superior tienen cuatro entradas para los goteros y en su parte inferior dos salidas de drenaje. Están herméticamente cerrados por lo que al ser estancos no se pierde agua por la parte interior de la fachada vegetal, con lo que no es necesario impermeabilizar la pared. Del mismo modo, al tener una cobertura del 100 por 100 no hace falta revocar la pared puesto que la estructura se puede anclar directamente a la fachada.

En su parte interior están divididos por los separadores de polietileno para garantizar que el sustrato interior esté homogéneamente dividido.

Cada modulo tiene un peso de 5 kg en vacío, llegando a los 11 kg con el sustrato y las plantas prevegetadas en seco y hasta los 21 kg en estado de saturación.

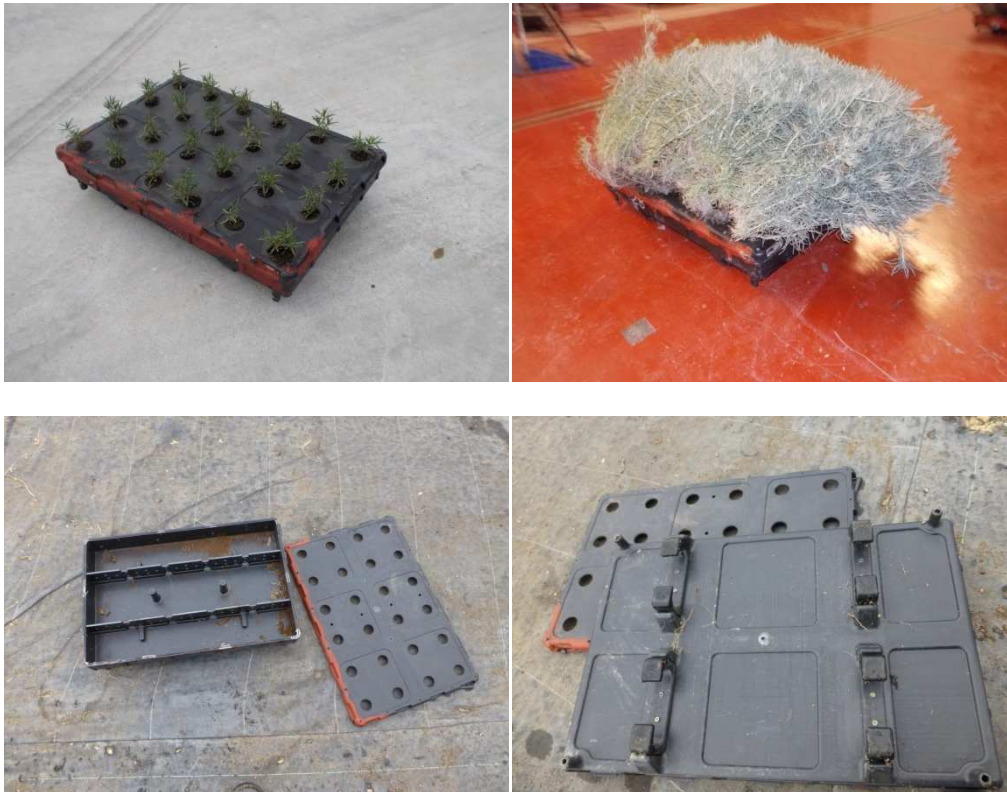


Fig. 3. 11.Detalle del modulo vegetal utilizado (a) con la plantas recién trasplantadas, (b) módulos con las plantas completamente desarrolladas, (c) detalle del interior de los módulos (d) detalle posterior del modulo con el gancho de sujeción a la estructura de anclaje

3.3.2 Estructura de anclaje

La sujeción entre los módulos vegetales y la fachada del edificio se realiza mediante una estructura vertical de acero inoxidable que actúa como elemento de soporte donde se colocan los módulos (Fig. 3.12.). En la parte posterior del módulo vegetal tienen cuatro ganchos de polietileno reciclado que sirven para engancharse a la estructura horizontal secundaria dispuesta sobre la perfilaría vertical. Esta estructura no permite extraerse perpendicularmente los módulos vegetados del conjunto del cerramiento, lo que evita el robo. A continuación se detalla gráficamente el montaje de la estructura de la fachada vegetal modular sobre el muro base de hoja doble:

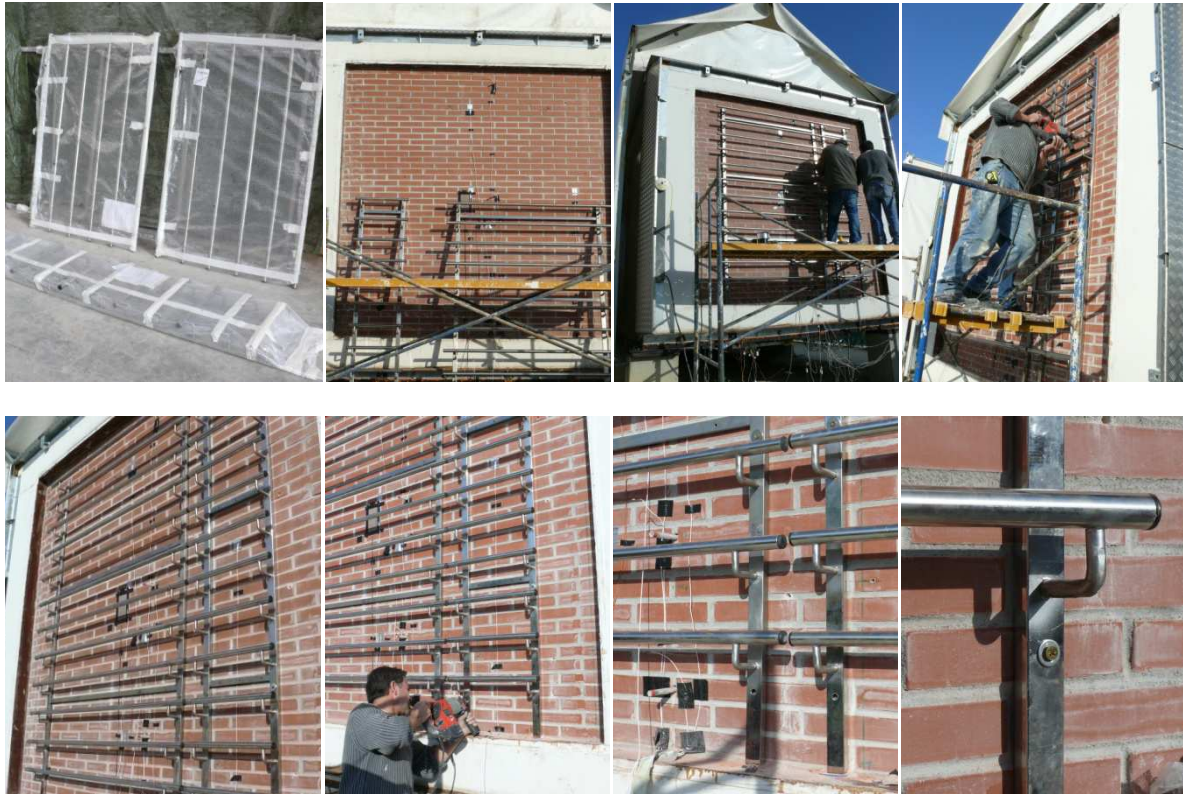


Fig. 3. 12. Detalle del proceso de montaje de la estructura de anclaje, desde la llegada de la propia estructura metálica hasta su posterior colocación

3.3.3 Sistema de riego y drenaje

Las plantas utilizadas en los jardines verticales requieren de un sistema de fertirrigación en su interior para aportar los nutrientes y elementos necesarios que propicien su adecuado crecimiento.

El sistema de riego utilizado en el ensayo es automático y responde a las técnicas de fertirriego utilizadas en cultivos hidropónicos. Mediante goteros autocompensantes distribuye la solución nutritiva en pequeñas cantidades en zonas localizadas de modo que mediante el ajuste de la solución nutritiva se puede controlar el crecimiento vegetal, disminuyendo las necesidades de agua de riego (Fig. 3.13)

El sistema se complementa con elementos de filtrado, control riego y una bomba para elevar y distribuir el agua a lo largo de la fachada vegetal.

Cada unidad puede regarse individualmente o de forma conjunta mediante un circuito que conecta todos los módulos desde una red general de riego. Esta posibilidad permite

poner plantas de elevadas necesidades hídricas al lado de especies de escaso consumo de agua, aumentando las posibilidades en el diseño.

Los módulos tienen dos salidas inferiores para el agua de drenaje que confluyen en una salida general.

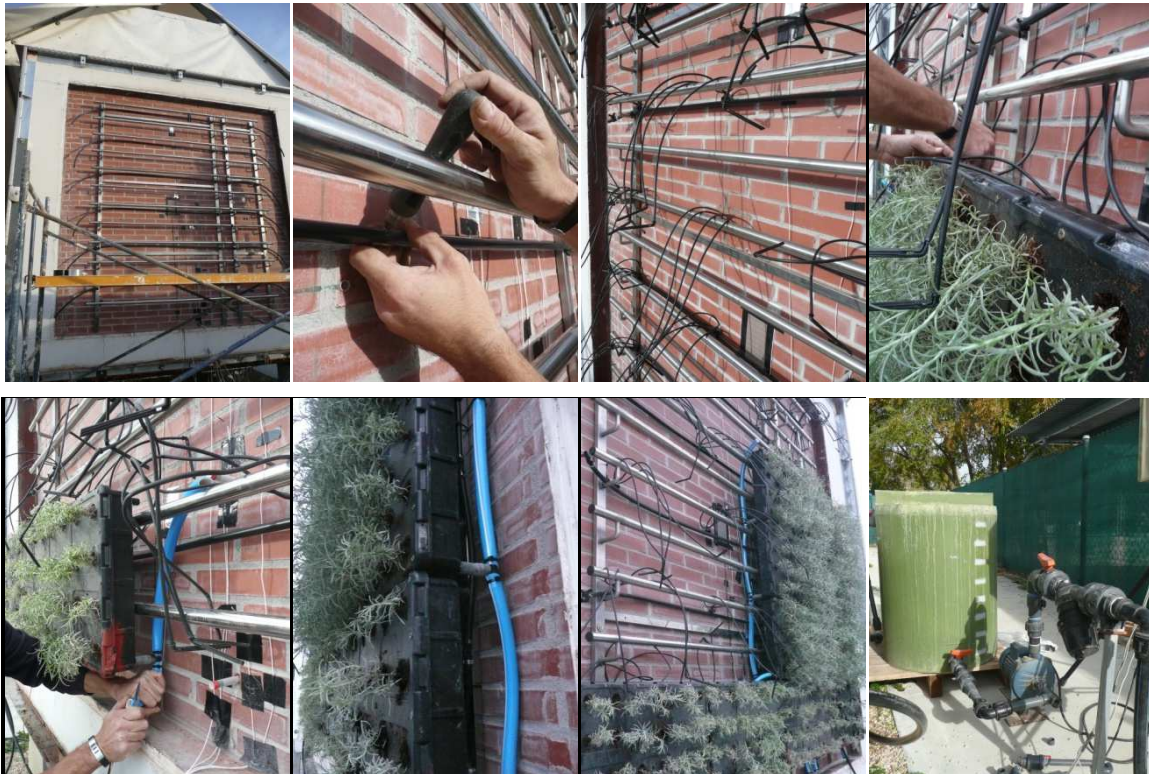


Fig. 3. 13. Detalle del proceso de montaje del sistema de riego y drenaje. Arriba: Colocación del sistema de riego, mangueras de riego, goteros autocompensantes y piquetas en los módulos. Abajo: instalación del sistema de drenaje y del sistema de bombeo

3.3.4 Vegetación

Es fundamental que se elijan especies adaptadas a la zona climática propia del lugar donde se instale la fachada vegetal. También es de vital importancia el hecho de que las especies elegidas requieran poco mantenimiento en cuanto a riego y poda.

La elección del tipo de especie dependerá del lugar en donde se encuentre emplazado el edificio así como de la orientación edificio y de la exposición de sus fachadas (sombra, pleno sol, semisombra) Las especies han de ser de tipo perenne, pudiendo elegir aquellas que tengan floración de colores diversos o especies que aseguren muros verdes durante todo el año. Las posibilidades de combinar las especies vegetales son múltiples, permitiendo así la creación de una gran diversidad de cerramientos únicos.

Para este ensayo se ha optado por una única especie vegetal para garantizar la uniformidad de la fachada vegetal. La especie vegetal elegida ha sido *Helichrysum italicum* (planta del curry) (Fig. 3.14.).



Fig. 3. 14. Fotografías del *Helichrysum italicum* a lo largo de su desarrollo y en diferentes épocas del año. Detalle de las hojas, tallos e inflorescencias

El *Helichrysum italicum* (Roth) G. Don fil. (*Familia Asteraceae*) es una planta herbácea, aunque a veces su base puede ser leñosa, con los tallos erguidos creando una forma arbolada de unos 50 cm de altura. Tiene hojas lineales, estrechas y vellosas, de color grisáceo por el haz y verdes por el envés. Tiene flores amarillas en capítulos pequeños y esféricos de 5 mm de diámetro agrupados en la parte superior de los tallos. Soporta la

exposición directa a pleno sol, así como es resistente al frío, tolerando fuertes heladas y de gran resistencia a la sequía [139].

3.3.5 Sustrato

El sustrato es el elemento fundamental para la subsistencia de la vegetación, siendo la fuente de alimento y albergue de raíces. El sustrato utilizado es 100 % orgánico y reciclado de los invernaderos de Almería está compuesto por:

- fibra de coco (70 %)
- turba rubia (30 %)

3.3.6 Montaje

El proceso de completa con el montaje de todos los componente del sistema, que engloba tanto la estructura de soporte de la vegetación, el sistema de riego y drenaje y los modulo prevegetados. Se caracteriza por su sencillez de montaje ya que está pensado para que su instalación y reposición sean fáciles y rápidas. De hecho, el peso de los módulos permite que cada uno pueda ser transportado por una sola persona. Además, la modularidad del sistema permite, en este caso, que la reposición de una o más piezas pueda realizarse sin necesidad de desmontar la fachada entera, únicamente la columna en la se encuentra el modulo dañado.

4 Descripción e Instrumentación de la célula de ensayo Paslink

4.1 Descripción de la célula de ensayo Paslink

La célula Paslink consiste en una zona de ensayo de dimensiones adecuadas para obtener resultados comparables a las condiciones reales de un edificio, 5 m de longitud con sección cuadrada de 2.7 m de lado, formada por paredes muy aislantes salvo en la superficie bajo estudio donde es colocada la muestra (fachada sur).

La sala de ensayo es un calorímetro que permite medir con alta precisión los flujos de calor que se intercambian, tanto ganancias como pérdidas, entre el ambiente interior

controlado y el exterior, pudiendo discriminar los intercambios a través del elemento a ensayar de los que se producen a través del resto de paredes.

Adyacente a la cara norte de la sala de ensayo se dispone de un pequeño cuarto de servicios (ver Fig. 3.15) en el que se sitúa la instrumentación necesaria para la medida y control de los ensayos. Los puntos de comunicación entre ambas estancias están perfectamente controlados para reducir al máximo las posibles fugas de calor no controladas o cuantificadas reduciendo al mínimo los errores de medida.



Fig. 3. 15. Izda: Detalle del exterior de la célula Paslink, fachada de orientación oeste. Centro: sala de servicios ,en su interior se encuentra la instrumentación de control de la célula de ensayo. Dcha.: interior de la celda de ensayo sin muestra, fachada de orientación sur

Para proteger la estructura de la célula, las superficies exteriores disponen de un revestimiento de acero inoxidable. Las células se apoyan en seis pilares de hormigón, asentados en sendas zapatas, con una elevación entre el suelo y la superficie inferior de 50 cm lo que asegura unas condiciones de temperaturas de aire homogéneas en todas las caras. La orientación del eje longitudinal es sur geográfico con una desviación inferior a $\pm 1^\circ$, y con una inclinación de la sección transversal de 89.5° .

La instrumentación y la monitorización de la toma de datos en las células de ensayo Paslink se han llevado a cabo bajo los requisitos establecidos en los manuales de medida y calibración para las células Paslink [140-142]. Del mismo modo, toda la sensórica necesaria (temperatura, flujo de calor, radiación solar, humedad, dirección del aire y velocidad de aire) se ha instalado cumpliendo con las especificaciones de los manuales Paslink. Para la realización de la toma de datos se ha utilizado un equipo de adquisición de los datos llamado MeCOP programado para recoger los datos de todos los instrumentos en "archivos día" con una frecuencia de 1 minuto gracias al desarrollo de una medición y programación de control.

4.2 Proceso de adquisición y tratamiento de datos

El tiempo de muestreo debe ser elegido de acuerdo con el tiempo de respuesta del objeto estudiado. En el caso de una célula PASLINK, este tiempo de respuesta podría ser asumida en el intervalo de 30-60 minutos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la tasa de muestreo seleccionado para este estudio ha sido de 1 minuto, es decir las mediciones se tomaron con frecuencia de 1 minuto.

La toma de datos con frecuencia de 1 min., permite comprobar las mediciones en detalle. Después de esta primera comprobación, los datos se integran en períodos de 10 minutos, mediante el cálculo del valor medio de cada período. De esta manera, el valor promedio contiene información más precisa sobre el período de 10 minutos que si tomamos el valor de cada período como un valor aislado.

El sistema de adquisición genera diariamente un archivo de datos (Rawdata). Cada archivo de datos (en bruto) se trata en primer lugar y las medidas generadas por cada sensor se calculan con los factores de calibración de cada una de las sondas.

El procedimiento seguido para la generación de los datos es el siguiente: en primer lugar, se estudian día-por-día cada uno de los sensores. Este procedimiento permite identificar el comportamiento imprevisto de los sensores, y evaluarlos en detalle y también permite comprobar que todos los sensores estaban midiendo correctamente y si están conectados correctamente. En segundo lugar, los datos obtenidos minuto a minuto se integran en periodos de diez minutos, como se describe en la sección anterior, y de esta forma se obtienen los valores medios de cada elemento (temperatura del aire interior y exterior, temperatura de la superficie interior y exterior...).



Fig. 3. 16. Detalle delantero y posterior del adquisidor de datos HP Agilent 34980A para el registro y control de las pruebas PASLINK: Izquierda. HP Agilent 34982 se conecta a un ordenador donde se almacenan los datos y se envía por correo electrónico a los investigadores en el formato " dayfiles". Derecha: la interfaz del programa desarrollado para el registro y control de las pruebas PASLINK

El registro y medida de los datos se realizó con el Agilent 34982A, (ver Fig.3.16) canal multiplexor y bloque de terminales 34921T. La información detallada sobre el sistema se muestra en la siguiente Tabla 3.1. Todos los sensores utilizados en los ensayos fueron calibrados y validados previamente en la LCCE del Gobierno Vasco, de acuerdo con el procedimiento interno.

Tabla 3. 1. Especificaciones del adquisidor de datos

Función	Rango	Resolución	Error
Voltaje DC	100 mV	0.1 μ V	4 μ V
	1 V	1 μ V	7 μ V
	10 V	0.01 mV	0.05 mV
	100 V	0.1 mV	0.6 mV
	300 V	0.1 mV	9 mV
Intensidad DC	10 mA	0.01 μ A	2 μ A
	100 mA	0.1 μ A	5 μ A
	1:00 AM	1 μ A	100 μ A
Resistencia	100 k Ω /1mA	0.0005 Ω	0.005 Ω
	1 M Ω /1mA	0.0001 Ω	0.005 Ω
	10 M Ω /100 μ A	0.0001 Ω	

4.3 Equipos de medida de temperatura interior

El ensayo en Células PASLINK se basa en una sala de ensayo de un volumen representativo que imita las condiciones reales de una habitación estándar de un edificio. El ambiente de la sala de ensayo está completamente controlado y supervisado minuto a minuto. Las dimensiones útiles interiores de la sala de ensayo son las siguientes 2.7 x 2.7 [m] con una profundidad de 5 metros, lo que supone un volumen de control de 36.5 m³.

4.3.1 Medida de temperatura del aire interior

La sala de ensayos está construida con un elevado grado de aislamiento y completamente monitorizada, lo que permite mantener en todo momento la sala bajo condiciones de homogeneidad en contrapartida a las condiciones oscilantes de la temperatura exterior. Mediante el ventilador axial ubicado en el centro de la sala de ensayo se consigue evitar la estratificación de la temperatura interior a lo largo del tiempo.

En las siguientes imágenes (Fig. 3.17) se muestran los detalles interiores de la célula de ensayo, tanto los sensores utilizados para la medida de temperatura de aire y superficie y el ventilador.





Fig. 3. 17. En las imágenes se muestra la vista frontal de la celda de ensayo ILARGI sin la pared sur donde se coloca la muestra de ensayo. Detalle de los sensores de temperatura de aire y de superficie interior empleados en los ensayos. La caja verde ignífuga contiene las resistencia eléctrica y el ventilador axial que protege de la estratificación de temperatura en el interior de la célula de ensayo.

Los datos del código, descripción y precisión de los sensores de aire interior de la sala de ensayo que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.2):

Tabla 3. 2. Código, descripción y precisión de los sensores de aire interior de la sala de ensayo

Code	Description	Accuracy
2ATI01	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the test room 15 [cm] above the floor.	± 0.1°C
2ATI02	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the test room 15 [cm] below the ceiling.	
2ATI03	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the east wall 15 [cm] from it.	
2ATI04	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the west wall 15 [cm] from it.	
2ATI05	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the test room.	
2ATI06	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the partition wall 15 [cm] from it.	
2ATI07	Air temperature. (Protected against radiation). Centre of the south wall 15 [cm] from it.	

Los datos de temperatura de aire interior que se muestran en la siguiente figura corresponden a los datos registrados durante el periodo comprendido del 27 enero al 6 de febrero de 2014, durante una secuencia PRBS. Los datos han sido tomados cada minuto y después promediados en base a 10 min.

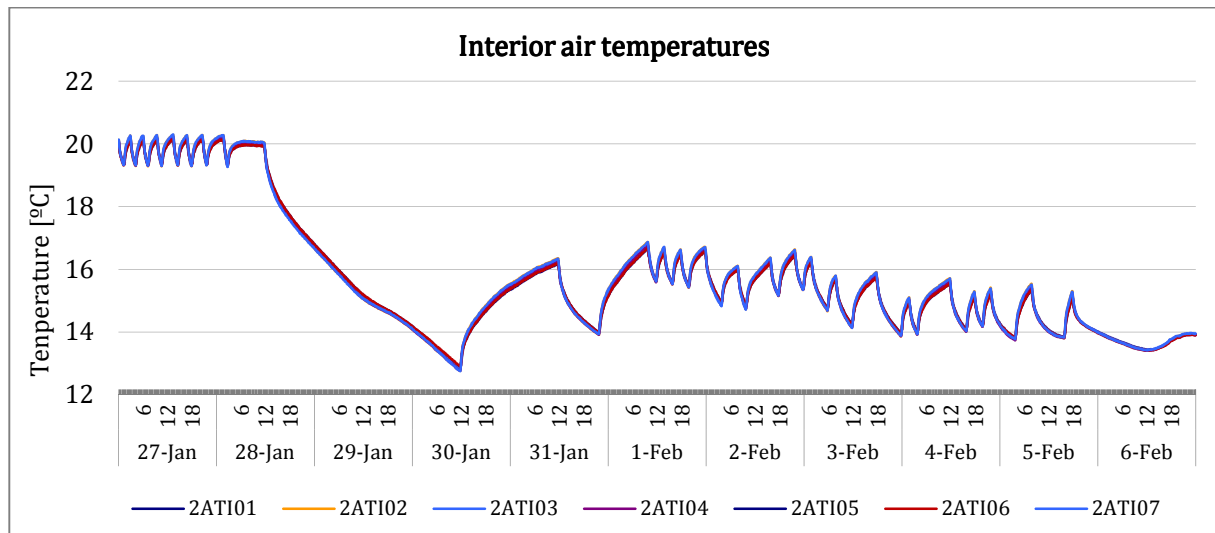


Fig. 3. 18. Evolución de la temperatura de aire interior del interior de la celda de ensayo ILARGI durante una secuencia PBRs (Enero-Febrero 2014)

Cómo se puede observar la diferencia máxima de temperatura entre el conjunto de los siete sensores de aire es menor de 0.25 °C. Esto indica la alta homogeneidad de las condiciones de ensayo del aire interno de la célula lo que cumple con los requisitos de prueba de red PASLINK, esta dice que: las diferencias máximas de temperatura del aire en interiores deben ser menores de 0.5 °C. El promedio de temperaturas de aire interno obtenido de los siete sensores se ha utilizado como temperatura de aire interno.

En la siguiente figura. (3. 19) se han graficado la diferencia entre la temperatura media del aire interno respecto a las temperaturas máximas y mínimas de la serie temporal medida.

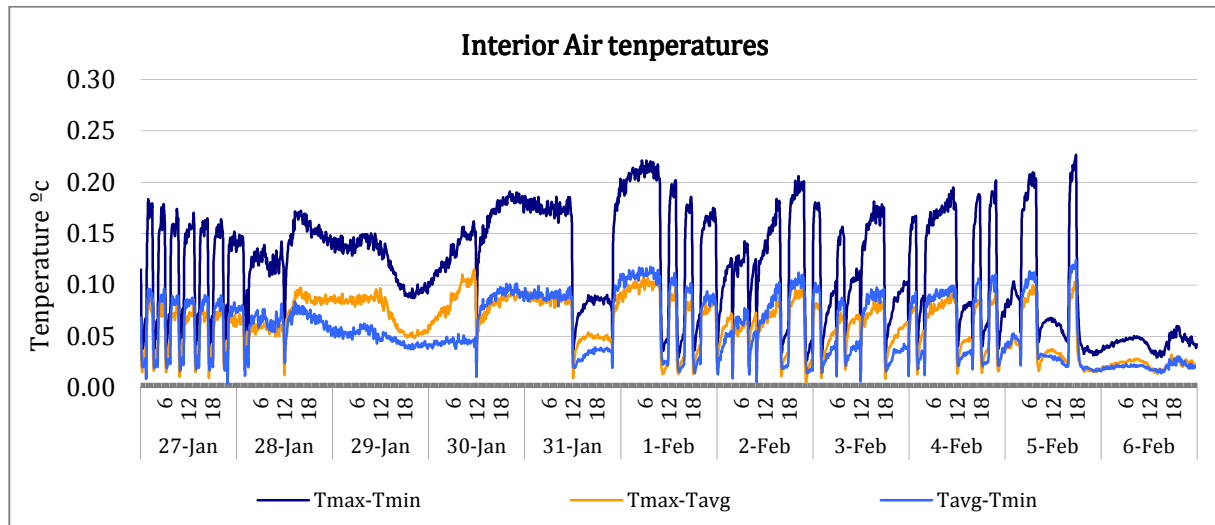


Fig. 3. 19. Evolución de la diferencia máxima entre los sensores de temperatura de aire del interior de la celda de ensayo ILARGI durante una secuencia PRBS (Enero-Febrero 2014)

En estas curvas se puede observar que al utilizar la temperatura media de aire interior, el error máximo cometido se encuentra siempre por debajo de 0.15 °C. En el caso de que se utilice el promedio de temperaturas para toda la secuencia temporal, el error de medida cometido está por debajo de 0.1 °C, que coincide con la exactitud de los sensores utilizados.

4.3.2 Medida de temperatura de las superficies interiores

La envolvente de la célula PASLINK está construida con un elevado aislamiento lo que conlleva que en su interior las condiciones térmicas estén muy controladas y sean homogéneas en relación con las temperaturas de la superficie interior de la pared donde está colocada la muestras sobre la cual se realizan los ensayos.

Los datos del código, descripción y precisión de los sensores de superficie interior de la sala de ensayo que se muestran en la siguiente tabla (Tabla 3.3):

Tabla 3. 3. Código, descripción y precisión de los sensores de superficie interior de sala de ensayo

Code	Description	Accuracy
2STI01	Surface temperature. Centre of the calibration roof, over HFS Tiles.	± 0.1°C
2STI02	Surface temperature. Centre of the west wall, over HFS Tiles.	
2STI03	Surface temperature. Centre of the east wall, over HFS Tiles.	
2STI04	Surface temperature. North wall, not in the centre, over HFS Tiles.	
2STI05	Surface temperature. Centre of the movable door of the north wall, over HFS Tiles.	
2STI06	Surface temperature. Centre of the floor, over HFS Tiles.	

Los datos que se muestran en la siguientes figuras (3.20-3.21) corresponden a los datos registrados durante el periodo comprendido del 27 enero al 6 de febrero de 2014 durante una secuencia PRBS.

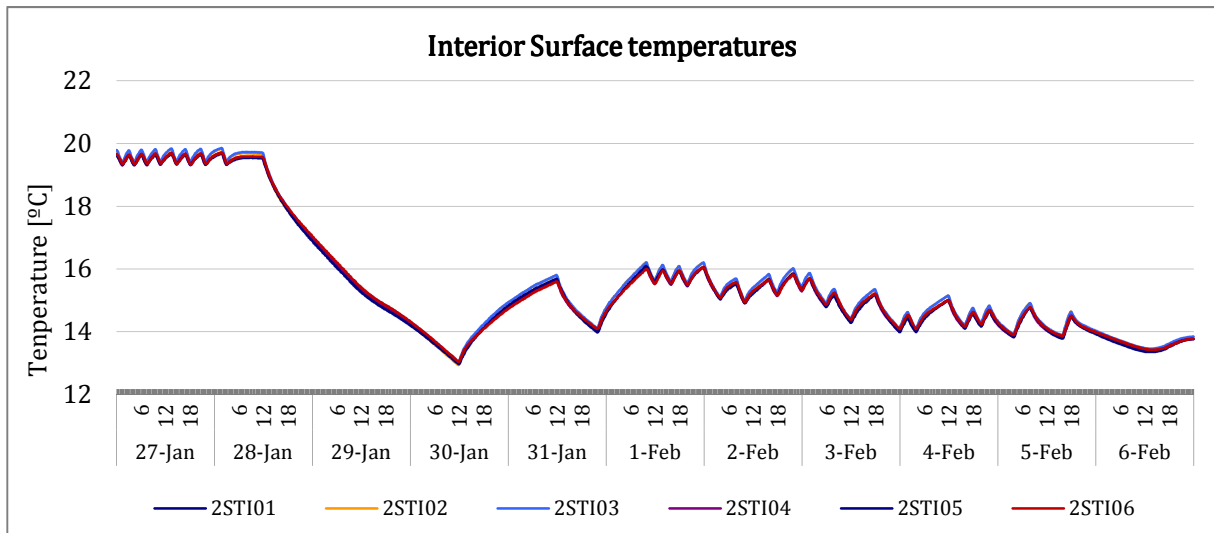


Fig. 3. 20. Evolución de la temperatura de superficie interior del interior de la celda de ensayo ILARGI durante una secuencia PRBS (Enero-Febrero 2014)

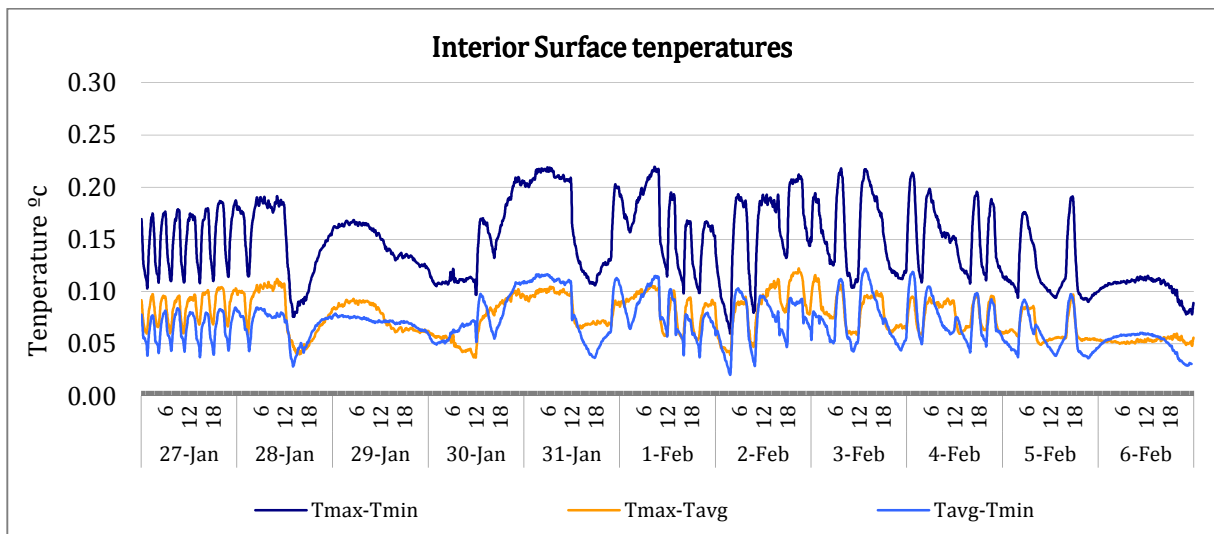


Fig. 3. 21. Detalle de la diferencia máxima entre los sensores de temperatura de aire del interior de la celda de ensayo ILARGI durante una secuencia PRBS (Enero-Febrero 2014)

El análisis de estos valores muestra que la diferencia máxima entre la temperatura del conjunto de los seis sensores de es siempre menor a 0.25°C. Esto indica la alta homogeneidad de las condiciones de ensayo respecto a la temperatura superficial interna de la célula de ensayo. Por lo que cumple con los requisitos de prueba de red PASLINK.

Los datos de la gráfica muestran que el error máximo cometido al utilizar la temperatura media de los sensores superficiales respecto a las temperaturas máxima o mínima se encuentra por debajo de 0.2 °C. Esto permite trabajar con un único valor de temperatura de superficie interior en la sala de ensayo, utilizado como temperatura de superficie interna.

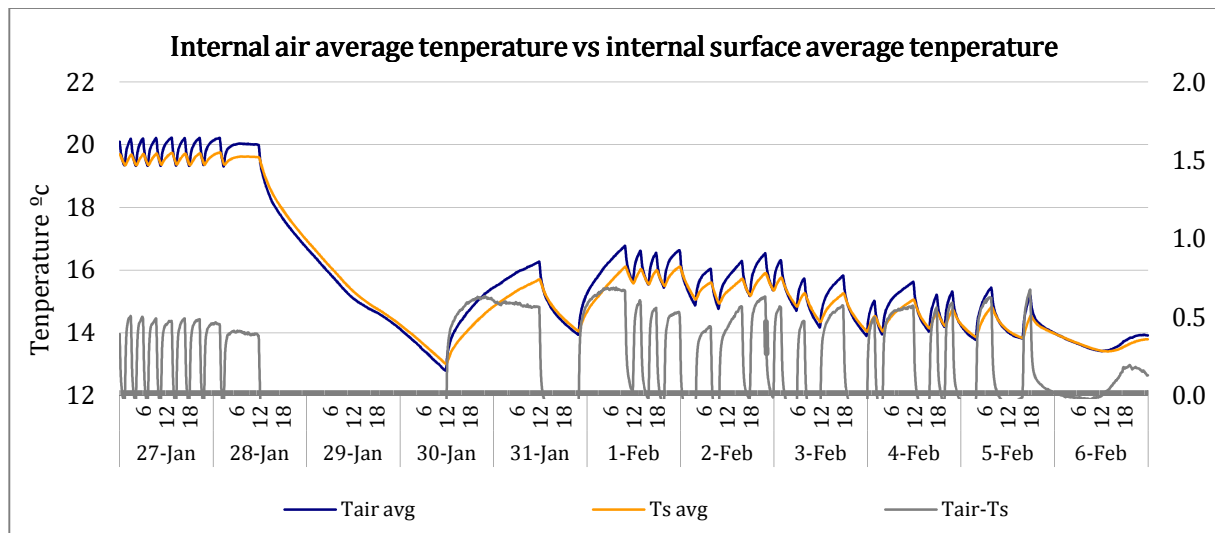


Fig. 3. 22. Evolución de la diferencia máxima entre los sensores de temperatura de aire del interior de la celda de ensayo ILARGI durante una secuencia PRBS (Enero-Febrero 2014)

Las condiciones de ensayo permiten verificar que la diferencia máxima entre la temperatura media de superficie y la temperatura media de aire es menor de 0.8 °C. Este hecho, hace insignificantes los efectos de la radiación de onda larga en el interior de la sala de ensayo.

Estas condiciones permiten comprobar que los resultados entre la diferencia máxima de la temperatura media del aire y de las temperaturas máximas o mínimas de superficie individuales son del orden de la exactitud del sensor. Este supuesto se puede utilizar para asegurar que la superficie de los medidores de flujo de calor en la superficie interna de la muestra de ensayo no se ven afectados por las diferentes emisividades entre la superficie internas de la celda y la superficie de la muestra [143].

4.4 Equipos de medida de temperatura exterior y datos climatológicos

La medida de la temperatura exterior junto con la recopilación de los datos climatológicos tiene una importancia fundamental, ya que la diferencia entre la temperatura del aire interior y la temperatura del aire exterior es la fuerza impulsora del flujo de calor a través de la muestra.

El flujo de calor junto con las temperaturas del aire interior de la célula de ensayo y la temperatura del aire exterior y la radiación solar son las principales magnitudes utilizadas para obtener las propiedades térmicas de la muestra ensayada.

4.4.1 Medida de temperatura exterior

La medida de la temperatura del aire exterior y la descripción, ubicación y precisión de cada uno de los sensores se puede observar en la Tabla 3.4 y sus detalles en la Fig. 3.23:

Tabla 3. 4. Código, descripción y precisión de los sensores de temperatura exterior

Name	Description	Accuracy
2ATE01	Outdoors air temperature. This sensor is placed in front of the south wall at the roof test sample height, protected against radiation and ventilated mechanically. (South ventilated)	± 0.1°C
2ATE02	Outdoors air temperature. This sensor is placed in below the test cell, protected against radiation and not ventilated mechanically. (Ground)	
2ATE03	Outdoors air temperature. This sensor is placed over the test cell but under the sun screen, protected against radiation and not ventilated mechanically. (Roof)	
2ATI09	Service room air temperature. It is located in the centre of the test room protected against radiation and not ventilated mechanically.	
2STI08	Service room surface temperature. Over the surface of the partition wall.	
0ATE04	Outdoors air temperature. This sensor is part of the VAISALA meteorological station of the test site located at 10 [m] height. Protected against radiation not ventilated mechanically.(Meteorological station ME)	



Fig. 3. 23. Detalle de los sensores 2ATE01-2ATE02-2ATE03 y 2ATI09-2STI08

En la figura. 3.24 se muestran las temperaturas de aire exterior de las diferentes sondas instaladas y en la figura 3.25 se observa la diferencia de la temperatura máxima y mínima registrada durante una secuencia de análisis PRBS entre el 1 y 10 de mayo de 2014.

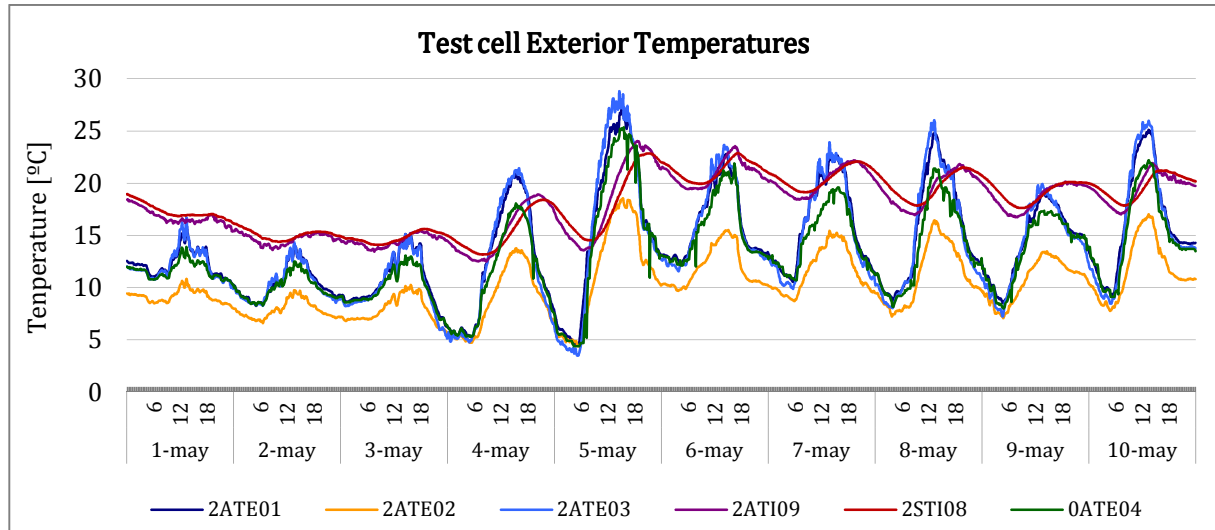


Fig. 3. 24. Evolución de las temperaturas exteriores

Durante las horas de la noche, las temperaturas bajan hasta alcanzar los 4 °C y durante el día la temperatura llega a alcanzar valores de 25 °C. Se puede observar como durante las horas de sol, la temperatura es más elevada en el techo, en la parte sur y en la estación meteorológica que debajo de la celda de ensayo. Esto se debe a que la celda de ensayo es más fresca por la parte inferior por tratarse de un lugar sombreado y de mayor inercia térmica.

En el caso de las temperaturas del aire de sala de servicio, se observa que las oscilaciones de temperatura son menores a las temperaturas registradas en el exterior. Debemos recordar que esta sala se encuentra conectada con el ambiente exterior a través de una ventana de ventilación que está abierta en todo momento.

Por último remarcar que la temperatura registrada por el sensor 2ATE01 es la temperatura del aire registrada en la estación meteorológica provista de ventilación mecánica lo que garantiza la precisión de la temperatura del aire en ausencia de radiación solar. Esta temperatura se tomará como referencia para la comprobación del resto de temperaturas.

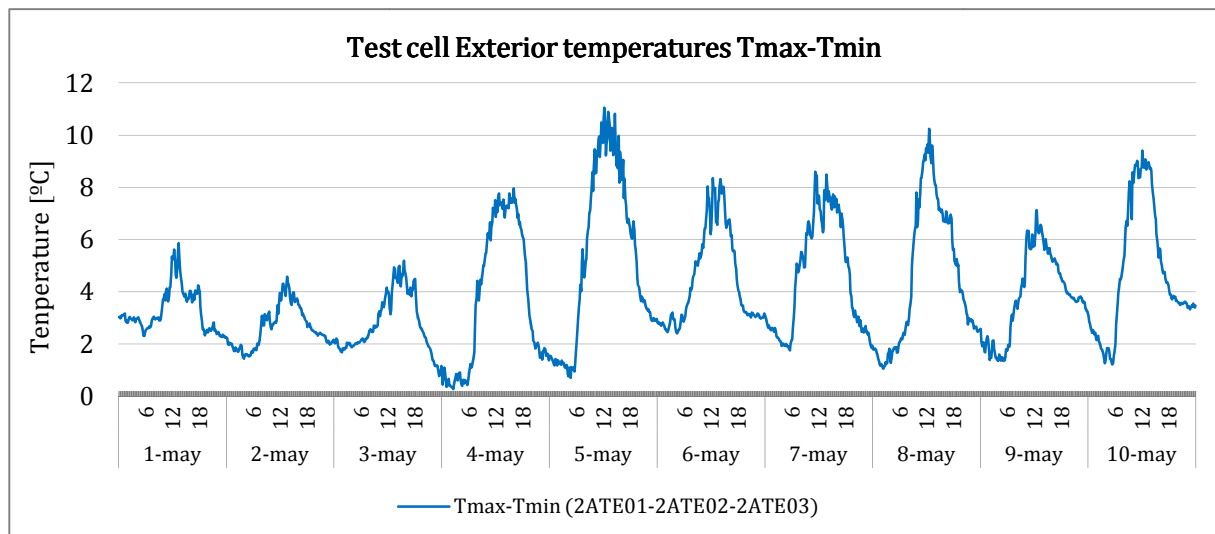


Fig. 3. 25. Diferencia de las temperaturas máxima y mínima exteriores

La temperatura 2ATE03, correspondiente a la parte inferior de la celda, se desvía considerablemente de la temperatura medida en la sonda colocada frente a la muestra 2ATE01 la cual se encuentra ventilada y con orientación sur, sobre todo cuando la radiación solar es alta. En los días calurosos y soleados la desviación entre las temperaturas ventilados y no ventilados es considerable, superando los 10°C.

4.4.2 Medida de radiación solar

La radiación solar junto con la temperatura exterior son las variables ambientales más importantes a tener en cuenta en los ensayos realizados. Esto hace que la medición de la radiación solar incidente sobre la muestra sea significativa. El flujo de radiación solar participa en el intercambio de calor entre la muestra y la célula de ensayo. Para evitar al máximo su incidencia, la celda Paslink se encuentra totalmente apantallada de la radiación solar mediante unas lonas blancas.

Los valores de radiación solar se han tomado mediante dos solarímetros que registran los valores de radiación global vertical sobre la muestra, consulte la Tabla 3.5, y sus detalles en la fig. 3 .26.

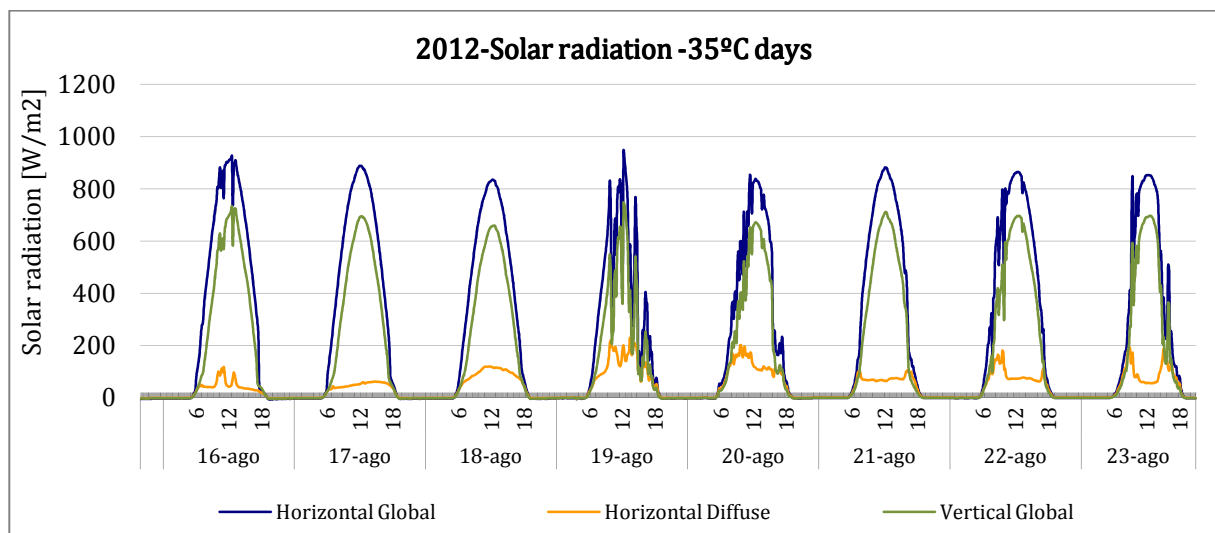
Tabla 3. 5. Código, descripción y precisión de los solarímetros

Name	Description	Accuracy
2GVT01	Global vertical solar radiation. This sensor is placed in the west-center corner of the green façade	$\pm 3\%$
0DHE01	Global diffuse solar radiation. This sensor is placed in the test site	$\pm 3\%$
0GHE01	Global horizontal solar radiation. This sensor is placed in the test site	$\pm 3\%$
0GVE01	Global vertical solar radiation. This sensor is placed in the west-center corner of the ventilated façade	$\pm 3\%$



Fig. 3. 26. Detalle de los solarímetros y de su posicionamiento en la fachada ventilada como en la vegetal.

A continuación se detallan las curvas de la radiación global vertical, radiación global horizontal y la difusa medidas con ambos solarímetros figura. 3. 27.



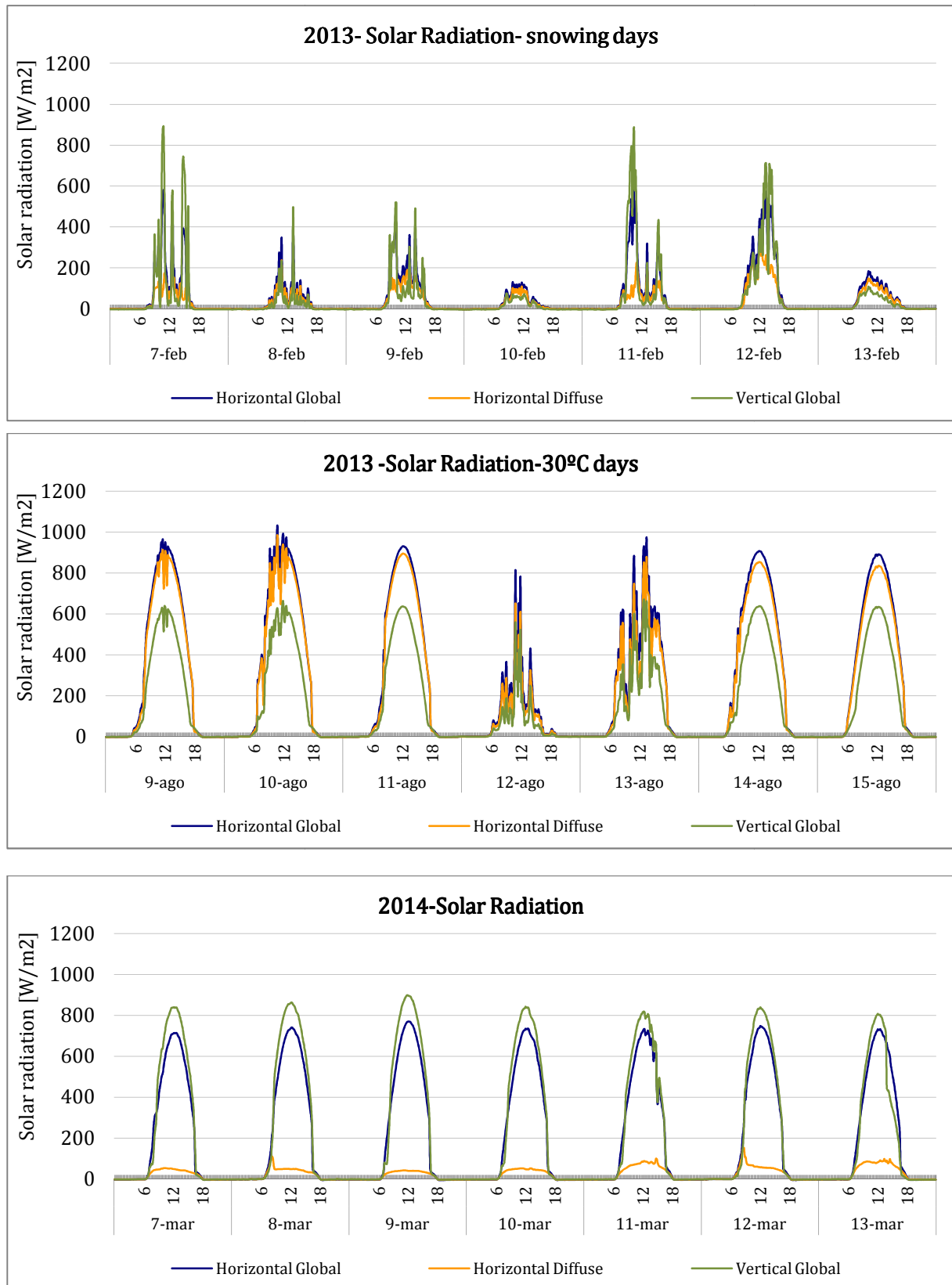


Fig. 3. 27. Evolución de la señal de los solarímetros (radiación global horizontal, vertical y difusa)

A continuación se analizan de forma más detallada la radiación solar durante todo el proceso de ensayos que comprende de junio de 2012 a diciembre de 2014.

Analizando los datos relativos a la irradiación sobre el plano vertical, descartando las horas nocturnas (45 % del total) y si se consideran exclusivamente las horas con valores de irradiación mayores a cero, se comprueba cómo las horas que comprenden el anochecer y el amanecer (irradiación $< 100 \text{ W/m}^2$) representan aproximadamente una cuarta parte de los datos.

La irradiación total sobre plano vertical alcanza valores máximos de 1100 W/m^2 , durante los meses de julio.

En la mayoría de las horas diurnas se registran valores comprendidos entre 100 y 800 W/m^2 . Partiendo de estos valores, el 30.7 % se encuentra entre 100 y 400 W/m^2 y, el 30.3 %, entre 400 y 800 W/m^2 , respectivamente.

4.4.3 Medida de CO_2

Otros parámetros que se han medido han sido la concentración de CO_2 en la fachada vegetal y en la estación meteorológica. Los sensores se enumeran en la Tabla 3.6 con el código y la descripción correspondiente y sus detalles en la Fig. 3.28:

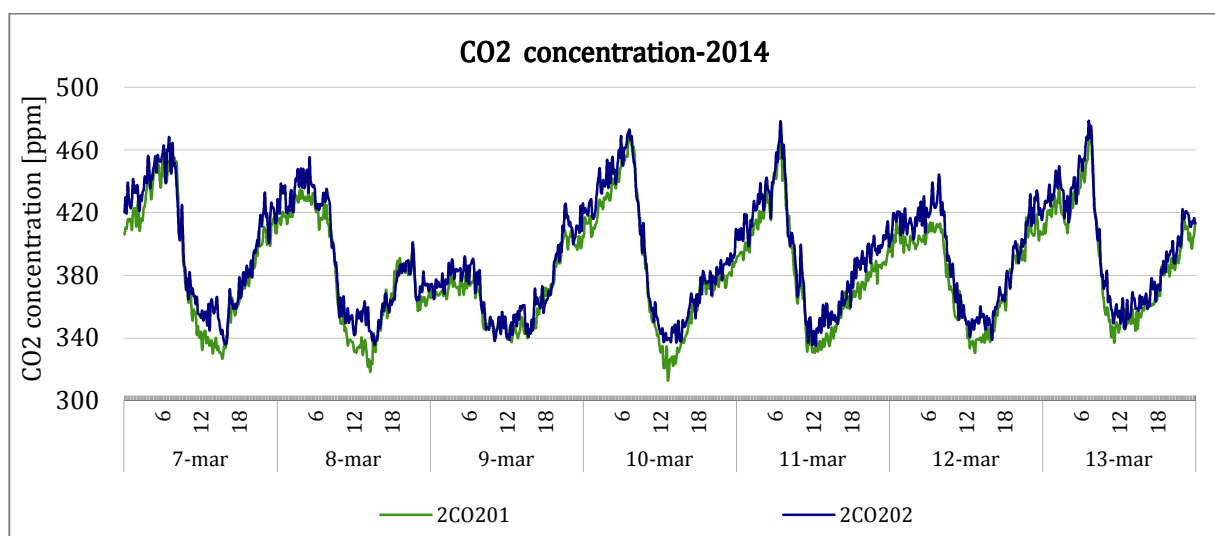
Tabla 3. 6. Código, descripción y precisión de los medidores de CO_2

Name	Description	Accuracy
2CO201	CO_2 concentration. Measurement inside the vegetal sample	$\pm 1.5 \text{ ppm}$
2CO202	CO_2 concentration.. Measurement in the meteorological station at the same height of the sample	$\pm 1.5 \text{ ppm}$



Fig. 3. 28 .Detalle y lugar de posición de los sensores 2C0201 y 2C0202

En la figura. 3.29 se muestran la concentración de CO₂ de las diferentes sondas instaladas en dos épocas diferentes del año 2014.



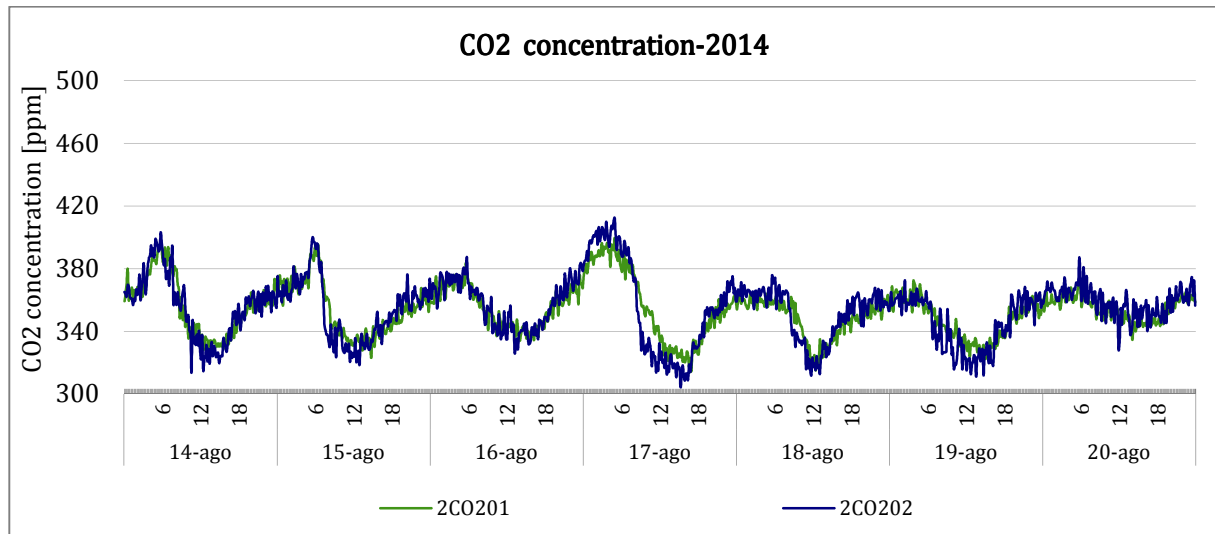


Fig. 3. 29. Evolución de la concentración de CO₂ de primavera a verano de 2014

En la figura 3.29 se puede observar el ciclo del CO₂ atmosférico y verificar como durante las horas diurnas, la concentración de CO₂ es inferior a las nocturnas alcanzando el mínimo al mediodía, y este va aumentando paulatinamente hasta alcanzar los valores máximos en las horas de oscuridad. Gracias a la acción de la fotosíntesis de la vegetación Comparando dos momentos anuales representativos se puede observar el ciclo anual del CO₂. En meses de alta radiación solar (agosto) la actividad fotosintética es más elevada, lo que disminuye la concentración de CO₂ respecto a los periodos de menor radiación solar (marzo).

Por otro lado, se puede observar una concentración menor de CO₂ en la fachada vegetal respecto a la concentración de CO₂ de la estación meteorológica, debido a que las plantas son capaces de convertir el CO₂ en biomasa, es decir son sumideros de carbono, extrayendo el CO₂ de la atmósfera y almacenándolo en forma de biomasa.

4.4.4 Medida de otros datos meteorológicos

La velocidad y dirección del viento son variables importantes a tener en cuenta durante los ensayos. Estas variables pueden ser introducidas en los modelos si los coeficientes convectivos externos se asumen dependientes del viento.

Por lo general, la humedad relativa del aire exterior no afecta considerable en el cálculo de los componentes constructivos. Pero en el caso de este ensayo en concreto, modelización de una fachada vegetal, el proceso de evapotranspiración es dependiente de la presión de vapor de agua del aire exterior por lo que su importancia es elevada.

Otro parámetro importante durante este ensayo es la cantidad de precipitación. En este ensayo, las necesidades hídricas de las plantas están reguladas mediante un sistema de fertirriego por goteo, el cual les aporta la cantidad de agua y nutrientes necesaria. A pesar de ello, es necesario tener contabilizada la precipitación recogida sobre la fachada. La presión atmosférica se midió mediante la estación meteorológica situada en la prueba. Todos los sensores se presentan en este apartado se enumeran en la tabla 3.7 con el código y la descripción correspondiente.

Tabla 3. 7. Código, descripción y precisión de la estación meteorológica

Name	Description	Accuracy
2AVE01	Anemometer. Wind velocity measurement in the same height of the sample.	± 1%
0AVE02	Anemometer. Measured in the VAISALA meteorological station 10 [m] height.	± 1%
2ADE01	Wind direction. Wind direction measurement in the same height of the sample.	± 10°
0ADE02	Wind direction. Measured in the VAISALA meteorological station 10 [m] height.	± 10°
ORHE01	Relative humidity of outdoors air. Measured in the VAISALA meteorological station 10 [m] height.	± 3%
0APE01	Atmospheric pressure. Measured in the VAISALA meteorological station 10 [m] height.	± 10 Pa
ORPE01	Rain precipitation. Measured in the VAISALA meteorological station 10 [m] height.	-

En la siguiente figura (Fig. 3.30) se puede observar un ejemplo de la velocidad del aire registrada en un periodo de tiempo, tanto en la estación meteorológica junto a la muestra como en la estación situada a 10 m sobre ella

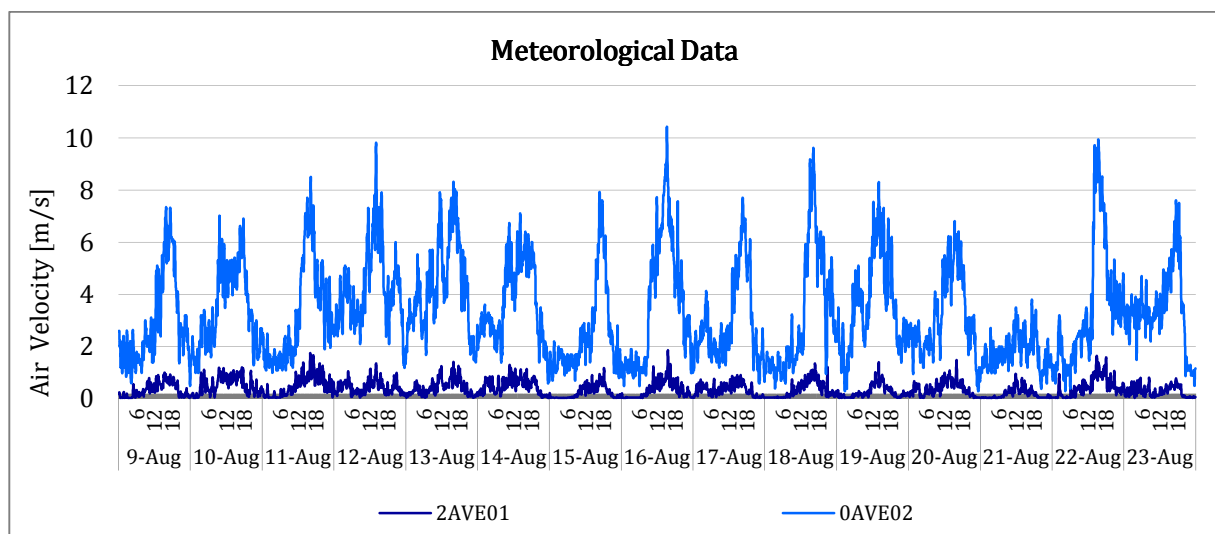


Fig. 3. 30. Evolución de las señales de los anemómetros, a) a la misma altura de la muestra y b) en la estación meteorológica a 10 m de altura

Como cabía esperar, la velocidad que alcanza el aire a 10 m de altura es muy superior a la velocidad del aire a la altura de la muestra. La propia muestra es un obstáculo para el viento como se observa en la siguiente gráfica (3. 31) donde se muestra la dirección del viento y la perturbación que la muestra infringe sobre la dirección del viento

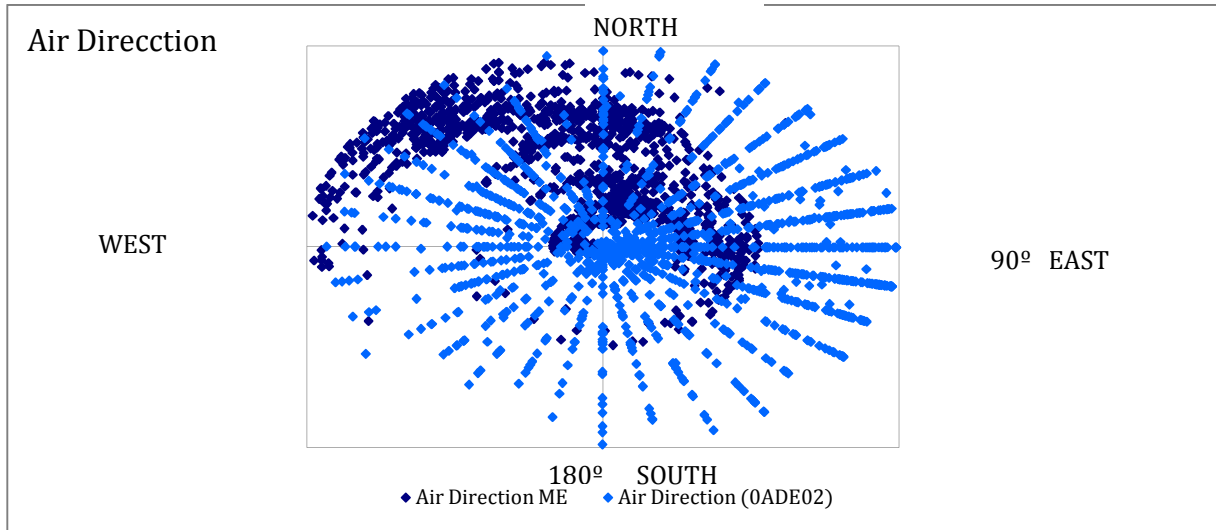


Fig. 3. 31. Evolución de la dirección del viento el 11 de agosto 2013

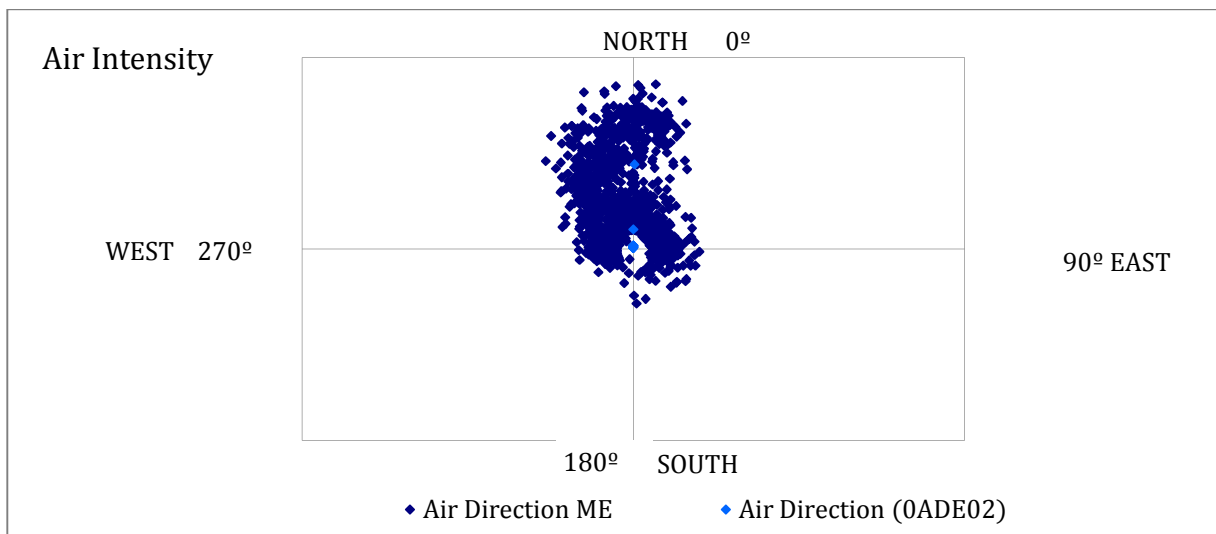


Fig. 3. 32. Evolución de la intensidad del viento el 11 de agosto 2013

En la siguiente figura (Fig. 3.33) se puede observar un ejemplo de la evolución de los datos meteorológicos de presión y humedad relativa tomados en la estación meteorológica.

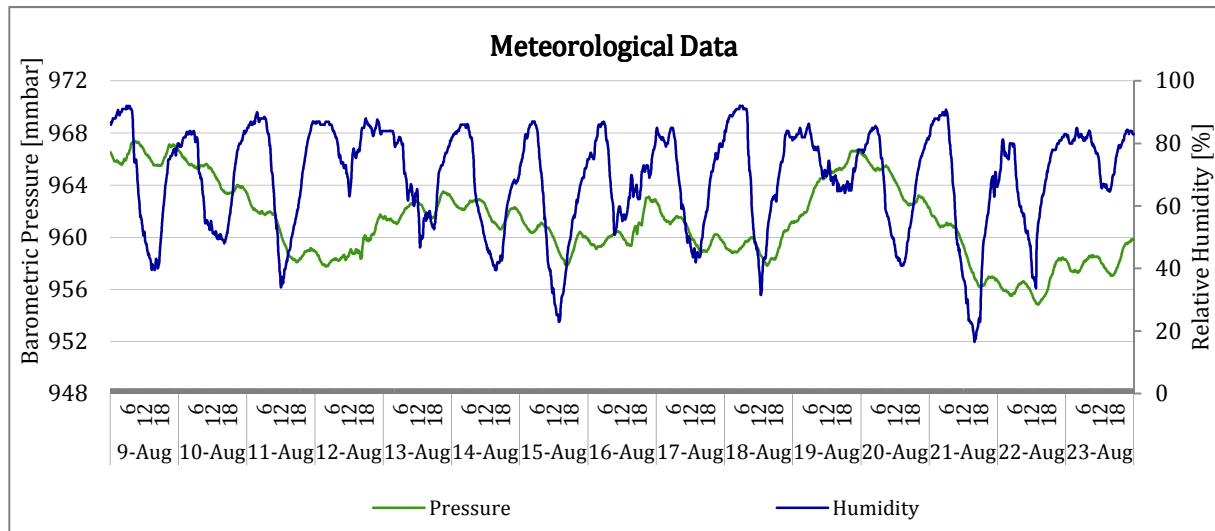


Fig. 3.33. Evolución de los datos meteorológicos de presión y humedad relativa

4.5 Medida de Potencia y de las HFS Tiles

La medición de flujo de calor de forma directa en la superficie interna de la muestra de ensayo, de los elementos constructivos semitransparentes no es posible, por lo tanto para realizar la estimación del flujo de calor a través de ellos se debe realizar de forma indirecta. Los HFS Tiles permiten calcular el flujo de calor a través de la muestra analizada de una forma indirecta.

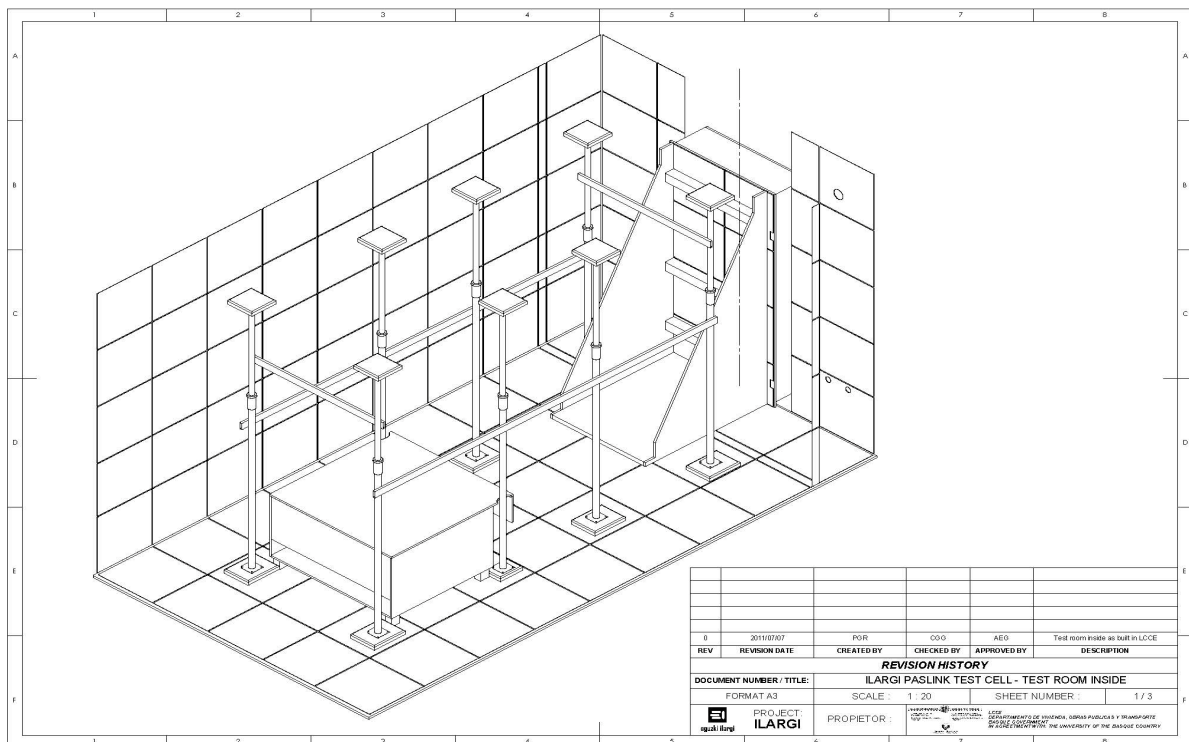
Los HFS Tiles proporcionan la medida del flujo total de calor a través de la envolvente de la sala de ensayo, excepto a través de la muestra de prueba, en este caso la pared sur. Las entradas de calor generadas dentro de la sala de ensayo se controlan y miden con precisión mediante un transductor de potencia. La forma de calcular de forma indirecta la señal del flujo de calor que atraviesa la muestra, es realizar la diferencia de las dos señales, es decir, la señal medida por el transductor de energía menos la señal del sumatorio de los flujos de calor a través de las HFS Tiles.

Las HFS Tiles deben ser calibradas in situ. Durante la calibración, los efectos de borde, puentes térmicos e infiltraciones de aire se introducirán como factor de calibración. Los datos de calibración se utilizarán para calibrar un modelo RC que represente los HFS Tiles y por lo tanto la capacitancia de la sala de ensayo. El flujo de calor a través de la

muestra no es directamente la señal del transductor de potencia medido menos el sumatorio de las señal de HFS Tiles, ya que las capacitancias de las baldosas de las HFS y la propia sala de ensayo, intervienen en la manera que fluye el calor de la resistencia del calentador que después se mide por las HFS Tiles.

4.5.1 Transductor de potencia

La señal del transductor de potencia (modelo SINEAX-M562) es también importante, ya que se utiliza para calibrar las HFS Tiles in situ. Este medidor de potencia se encuentra en la sala de servicio de la célula de prueba de la célula Paslink y mide todo el consumo de energía eléctrica en el interior de la sala de ensayo. Hay dos consumos de energía dentro de la sala de ensayo, por un lado el ventilador axial que evita la estratificación en el interior de la célula de ensayo (siempre en funcionamiento a potencia constante) y la resistencia eléctrica. Ambos se encuentran en la caja de madera ignífuga verde que se encuentra dentro de la sala de ensayo (ver Fig. 3.34 y 3.35).



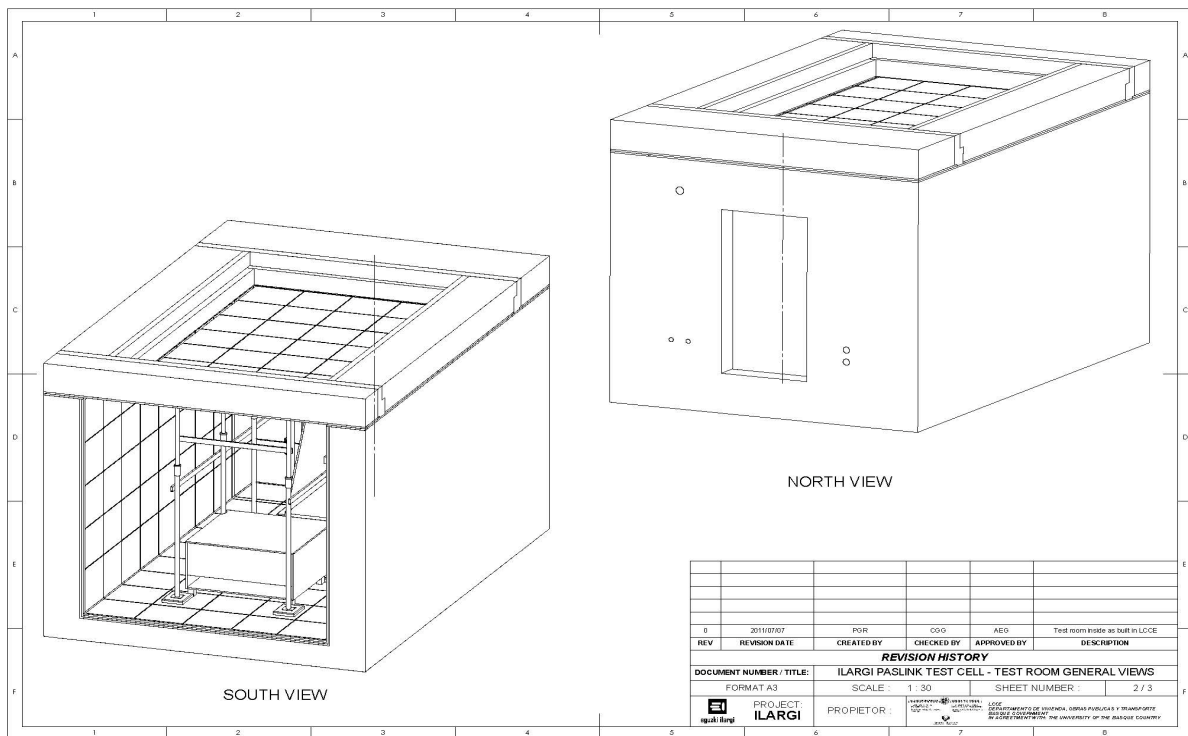


Fig. 3. 34. Arriba: vista isométrica de la sala de ensayo donde se puede ver la vista general de la caja de madera. Abajo: la ubicación de la caja de madera con el ventilador axial y la termorresistencia



Fig. 3. 35. Izquierda: Vista general de sala de ensayo sin la pared sur. Centro: Detalle del motor axial del ventilador. Derecha: el ventilador y la resistencia eléctrica en el interior caja de madera

Todo el consumo de energía eléctrica en el interior de la habitación de ensayo se supone que se convierte en calor. Este calor debe salir de la sala de ensayo a través de la envolvente de la sala de ensayo. Durante la calibración HFS Tiles toda la superficie de la sala de ensayos está cubierta por HFS Tiles y por lo tanto toda la entrada de calor debe salir de la sala de ensayo a través de la HFS Tiles. Esta es la razón por la que se ha optado por un transductor de potencia alta el cual se ha calibrado en un laboratorio independiente.

En la siguiente figura. 3.36 arriba se muestran la potencia eléctrica y la potencia de las HFS Tiles medidas y en la figura 3.36 abajo se observa la temperatura interior media del aire y de la superficie de la celda de ensayo y la temperatura exterior durante el ensayo registrado durante una secuencia de análisis entre el 8 y 19 de febrero de 2013.

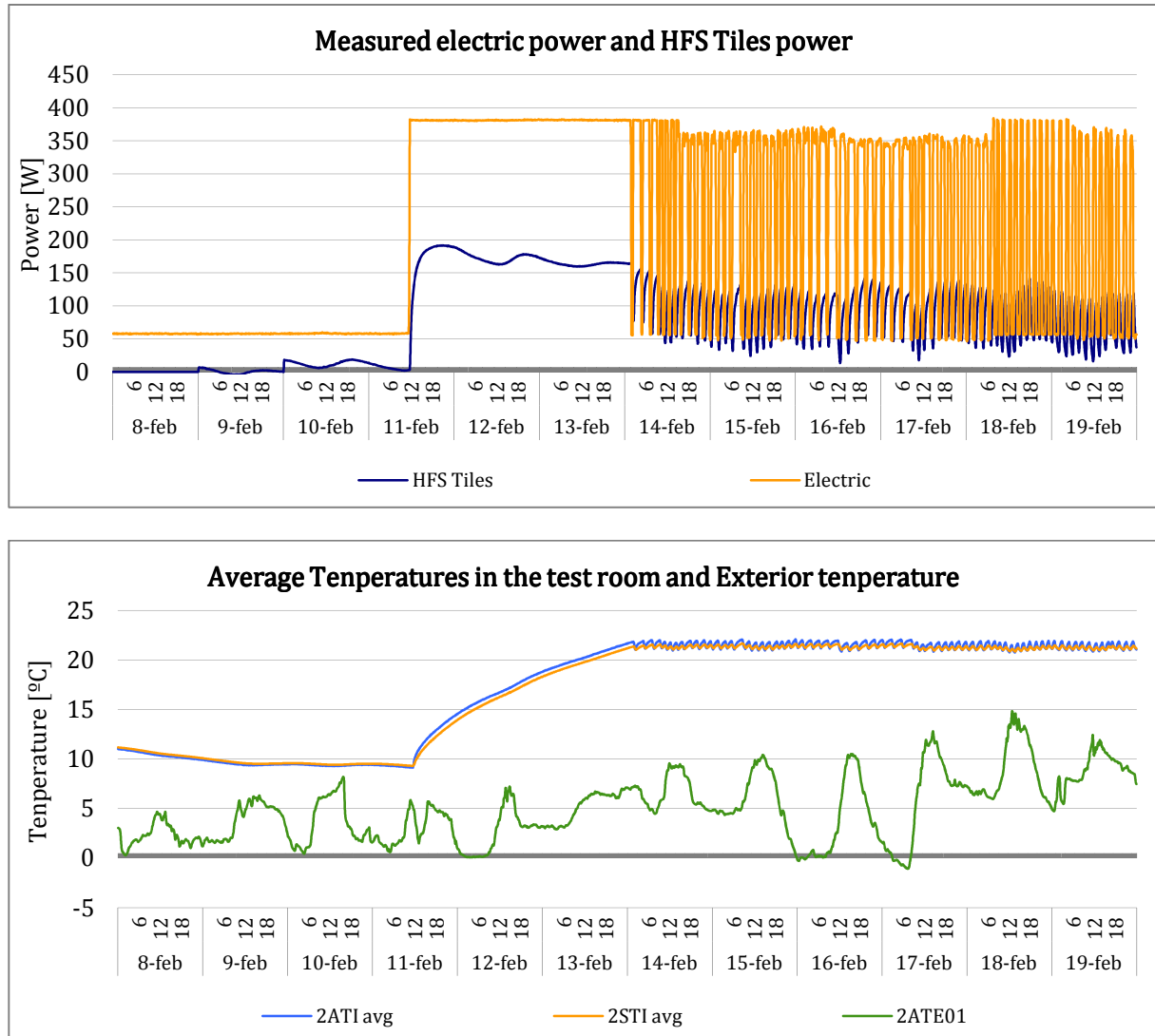


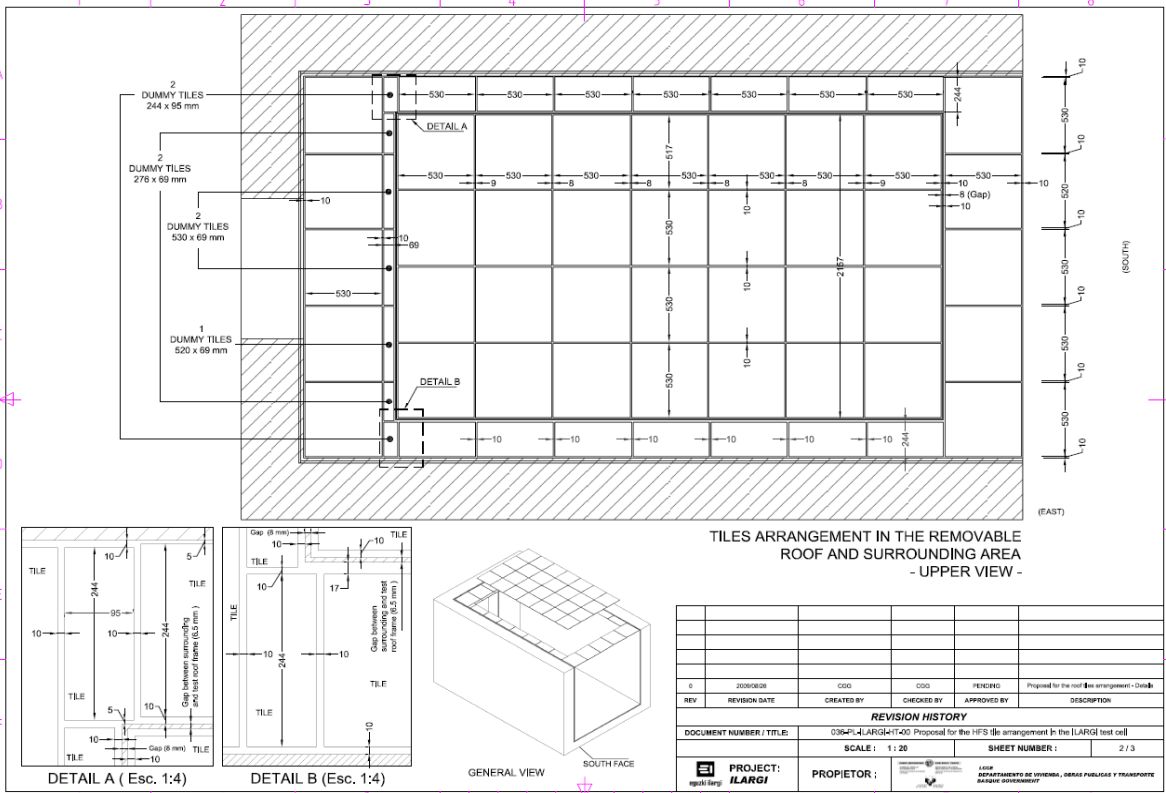
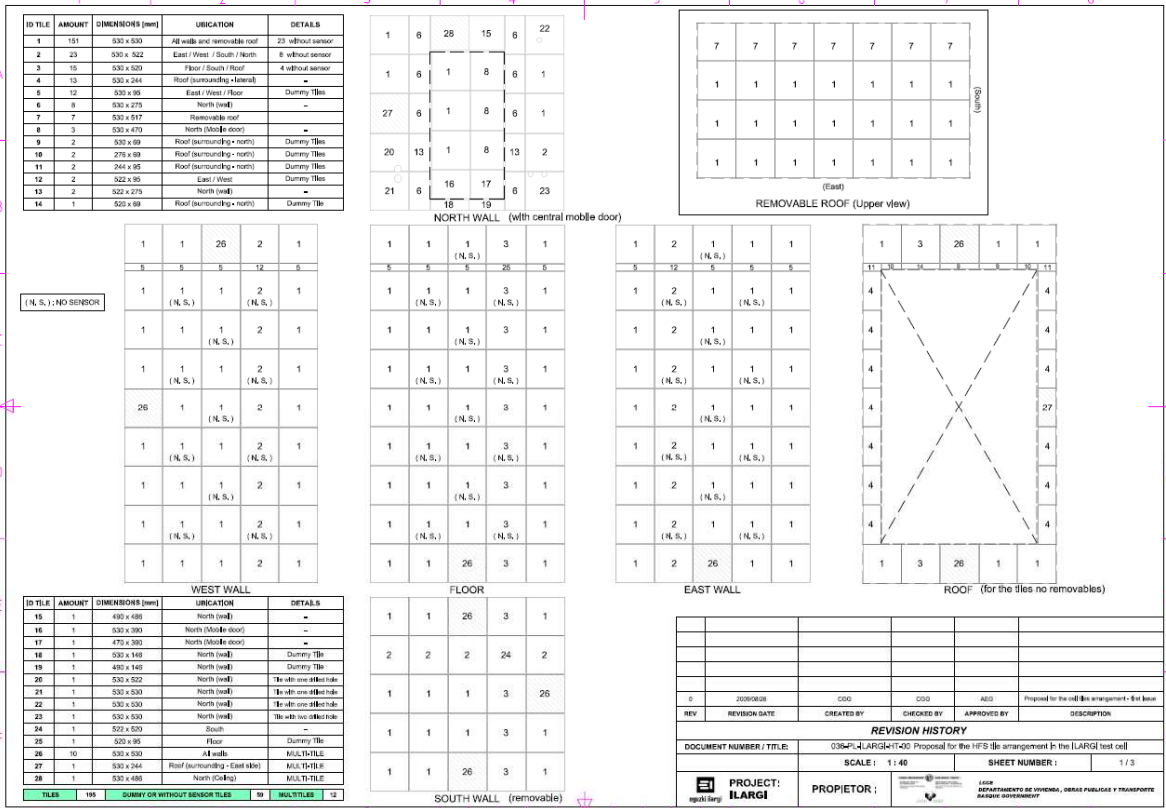
Fig. 3. 36. Arriba: señal del transductor de potencia y potencia de la HFS Tiles durante un ensayo llevado a cabo en la celda de ensayo EGUZKI. La potencia baja corresponde al momento en el que sólo el ventilador axial está en funcionamiento (para evitar la estratificación de la temperatura del aire interior de la celda). La potencia alta corresponde al momento del ensayo cuando ambos, el ventilador axial y resistencia eléctrica están en funcionamiento. Abajo: Representación de la temperatura interior media del aire y de la superficie de la celda de ensayo y la temperatura exterior durante el ensayo (Febrero 2013)

La medida de potencia eléctrica, como se ve en la Fig.3.36, es casi perfecta. La razón de obtener un consumo eléctrico estable, es gracias a un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), ubicado en el cuarto de servicio. El objetivo de esta SAI es doble, en primer lugar la SAI es capaz de seguir suministrando electricidad durante alrededor de una hora en el caso de que hubiera un corte de luz. En segundo lugar, la SAI tiene un rectificador-inversor de tiempo continuo. El rectificador convierte la entrada de electricidad de corriente alterna bruta ruidosa de 230 ± 15 V en corriente continua. Posteriormente convierte la electricidad de corriente continua de nuevo a electricidad corriente alterna de 230 ± 2.3 V pero lo importante, es que esta electricidad de salida no tiene prácticamente nada de ruido.

4.5.2 Diseño de las HFS Tiles

El sistema HFS Tiles fue desarrollado dentro del proyecto COMPASS, la descripción detallada junto con las especificaciones de construcción e instalación de la HFS Tiles se da en la guía de instalación de HFS Tiles para células Paslink (1995) [140]. Este documento describe la disposición de las baldosas de HFS en las células de ensayo.

En la fig. 3.37 se muestran los tres dibujos que describen en detalle la disposición de las baldosas HFS en las celdas de ensayo Paslink. El tamaño y la posición de cada uno de los HFS se dan en los dibujos. Algunos de las baldosas de los grupos centrales se han quedado sin sensor, que están marcados con ("NS"- "No Sensor"). La decisión fue motivada por un ahorro económico, siempre que no tuviera pérdidas de precisión. En la celda de ensayo Eguzki se comprobó que las baldosas de los grupos centrales tenían la misma señal que las monitorizadas individualmente. Por esta razón los grupos de Tiles centrales sólo tienen la mitad de sensores.



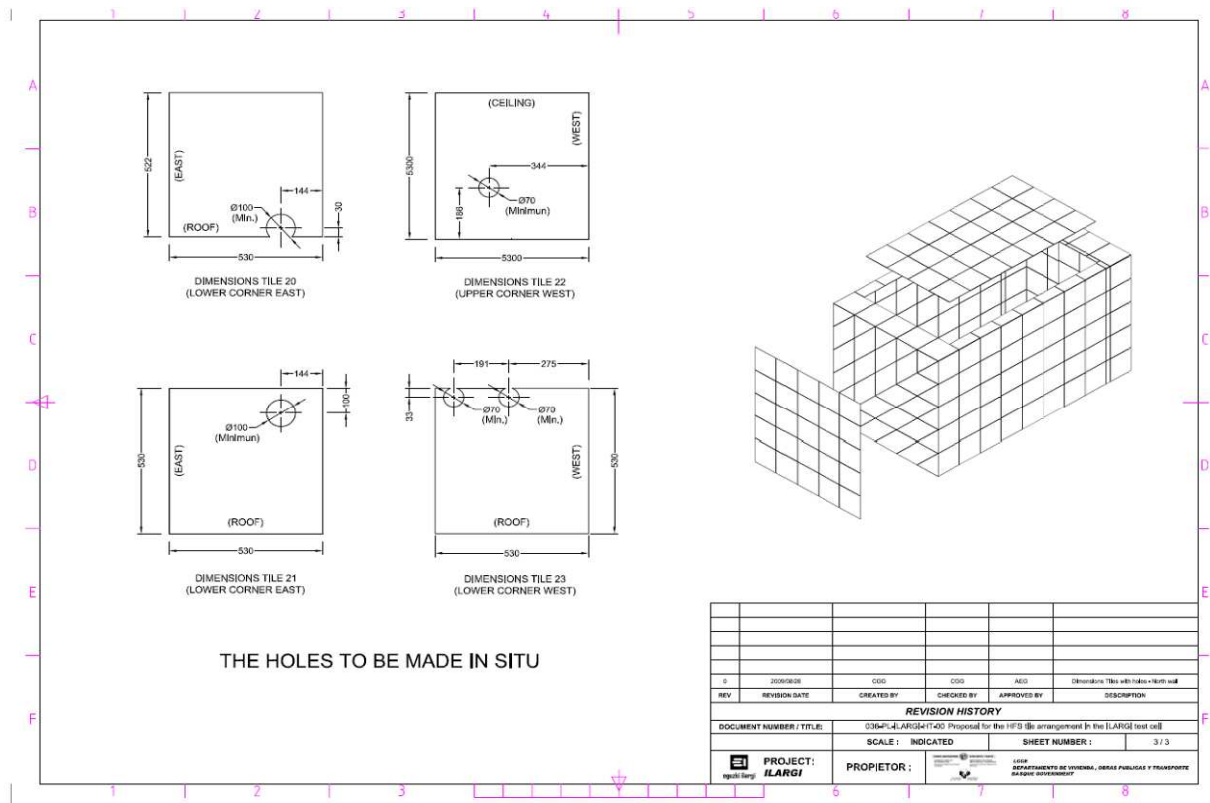


Fig. 3. 37. Diseño de la disposición de las HFS Tiles de la celda de ensayo ILARGI

La envolvente de sala de ensayos consiste en 40 cm de poliestireno expandido (EPS) embebidos con un revestimiento de madera y toda la superficie interior de la sala de ensayo está cubierta por HFS Tiles, en la fig. 3.38 se presenta un resumen gráfico de ello.



Fig. 3. 38. Izda.) Conexión de las Tiles en serie mediante cables planos .Dcha.) Vista de los paneles de espuma instalada para garantizar la homogeneidad del flujo de calor



Fig. 3. 39. Izda.) Se pueden observar completamente alineadas e instaladas las HFS Tiles sobre la capa de espuma Dcha.) las paredes y techo recubiertos por las Tiles

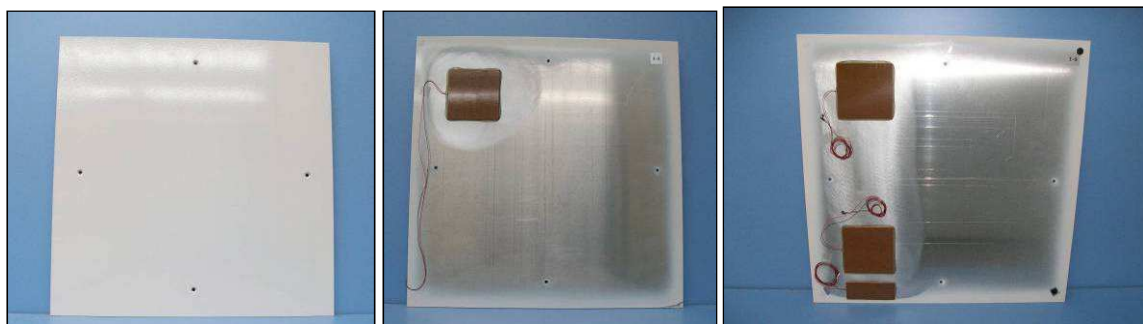


Fig. 3. 40. Arriba: Se pudo ver los tubos que atraviesan de la célula de ensaya la célula de servicio. Las dos primeras fotos muestran los dos tubos empleados para pasar los cables entre ambas salas. La foto 3 muestra el tubo para el drenaje de la muestra. La Foto 4 muestra los tubos que se emplearan para la refrigeración de la célula de ensayo. Abajo: en la izquierda se muestra la cara pintada de la HFT Tile, en el centro una Tile normal con un sensor y a la derecha una multitile con 3 sensores para poder medir los efectos de borde

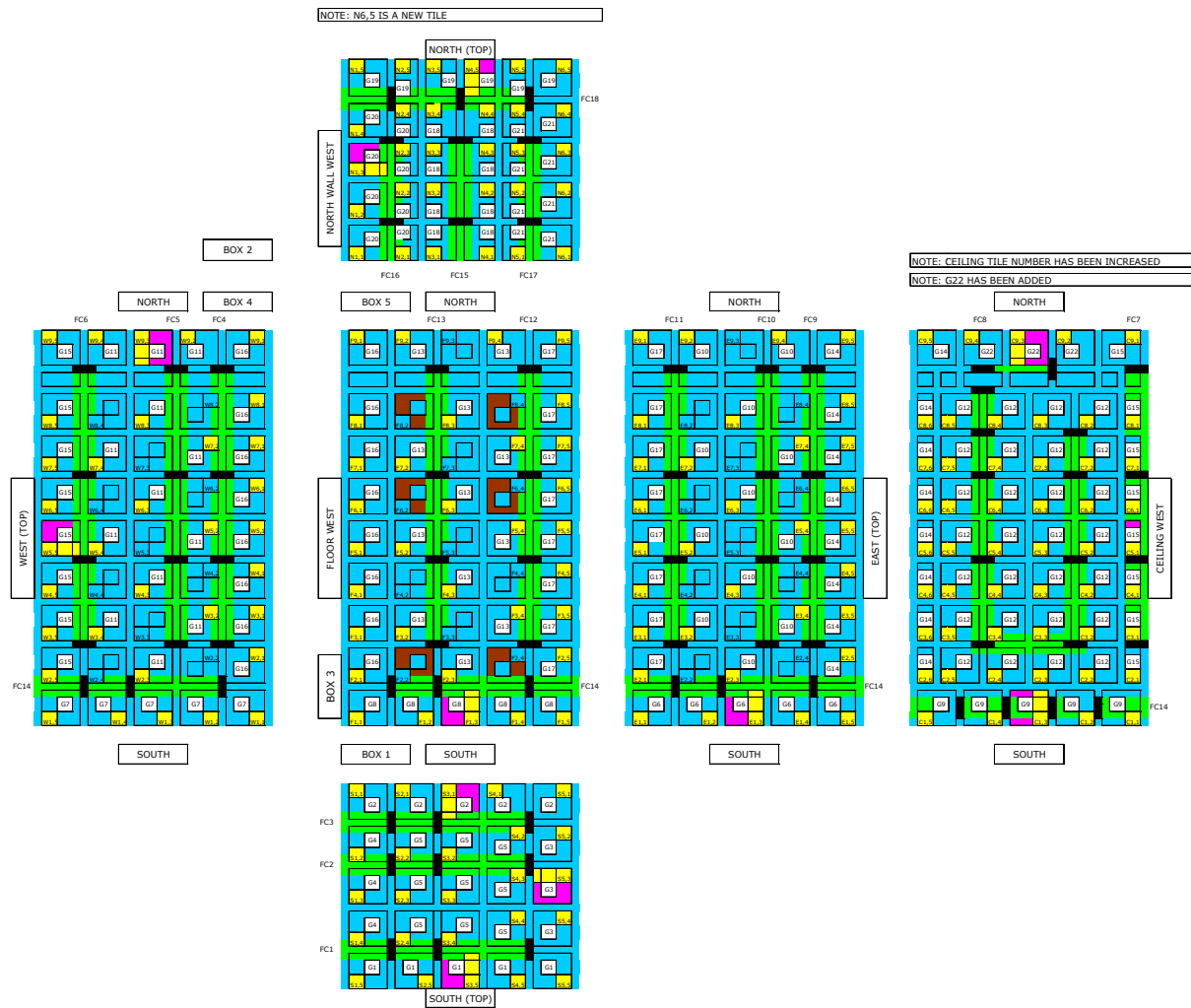


Fig. 3. 41. Se puede observar la disposición esquemática de los grupos de las HFS Tiles de la célula de ensayo ILARGI. Pared Este, Oeste, Suelo y Techo, Sur y Norte. Las baldosas normales están identificadas en azul con el número de grupo y el número de sensores. En azul, pero sin número de grupo, se muestran las baldosas, sin sensor. La Multitiles aparecen identificadas en rosa, estas baldosas especiales tienen tres sensores. Hay seis marcados en color marrón, son baldosas especiales para apoyar la estructura de soporte del techo. Por último los cables planos aparecen en verde y en el conector del cable plano en negro

Después de la presentación de la posición y composición de todas las HFS Tiles utilizadas en las células de ensayo. Se presentan los datos de los flujos de calor obtenidos tanto de los grupos de señales, como los de las señales individuales consiguiendo de esta forma información clara y precisa de lo que está ocurriendo en el interior de la celular de ensayo.

4.5.2.1 Señales registradas por los ocho grupos HFS Tiles de las paredes este y oeste.

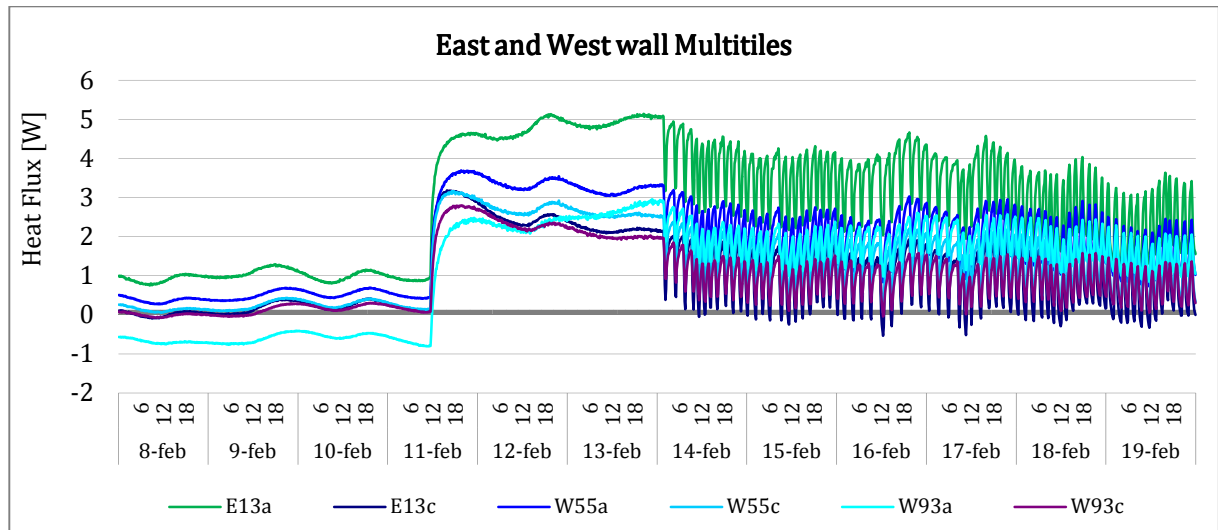
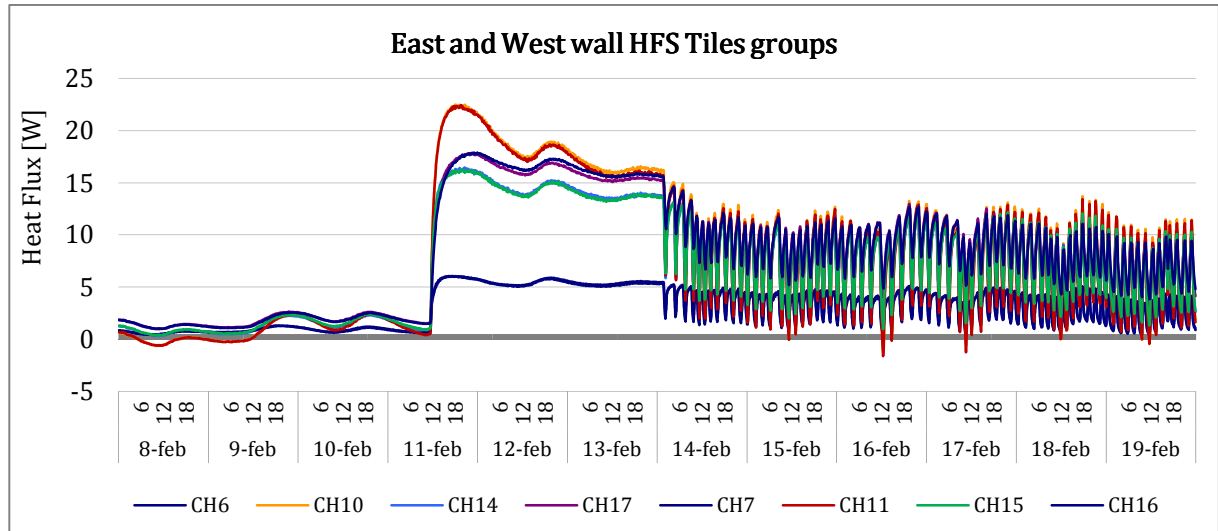
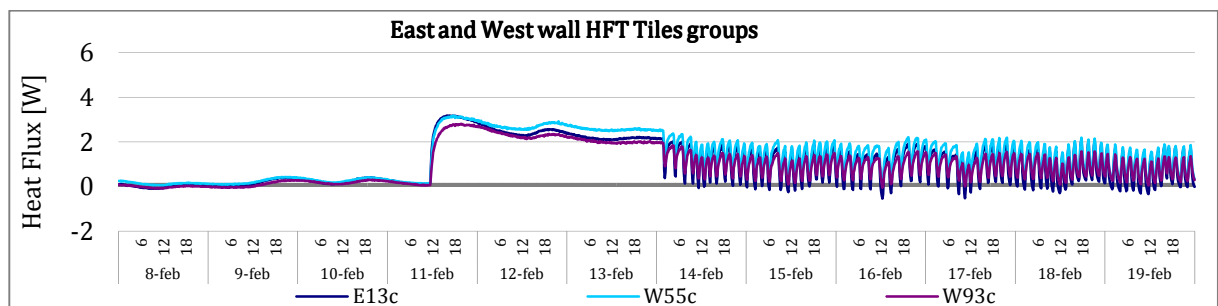


Fig. 3. 42. Arriba: las señales registradas por los ocho grupos HFS Tiles de las paredes este y oeste.

Se puede observar como los grupos simétricos dan casi mismas señales. Abajo: Las señales de sensores de las tres Multitiles



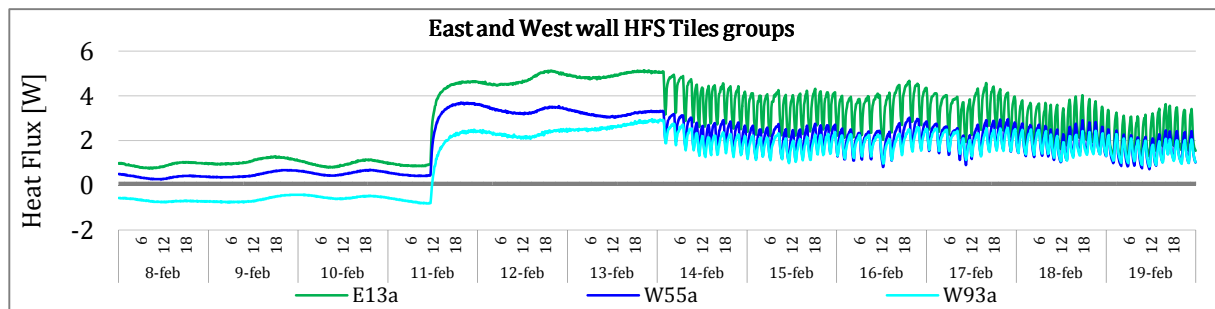
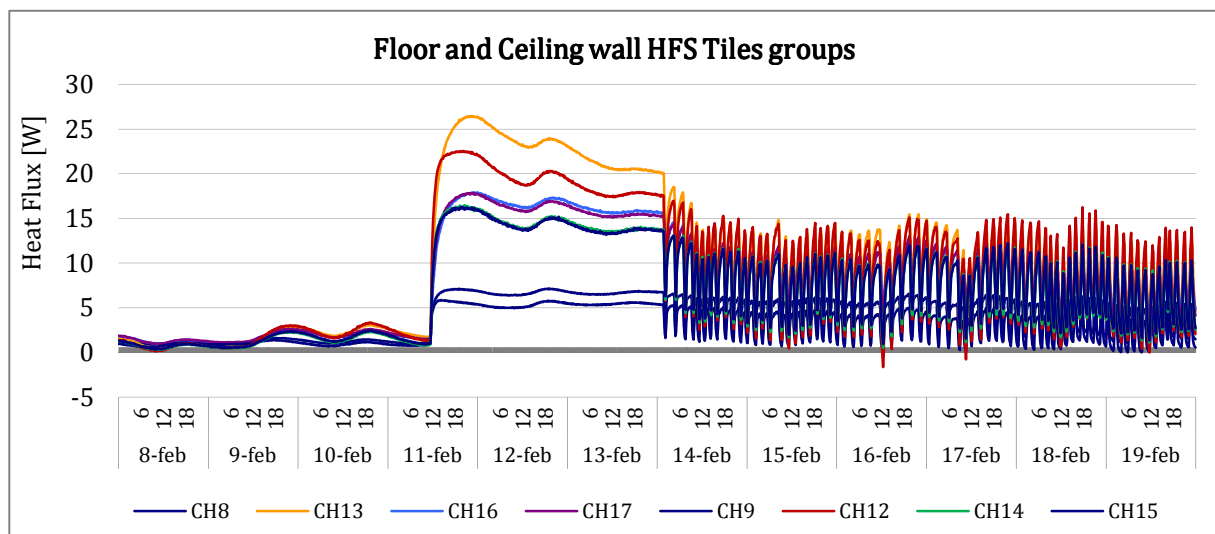


Fig. 3. 43. Las señales de las Tiles registradas de forma independiente

Las tres señales “c” son casi iguales, si estas señales se multiplican por el área de grupo de las señales CH10 o CH11 se obtienen de forma muy precisa el flujo de calor total. Esto asegura que el CH10 y CH11 están midiendo perfectamente un flujo de calor unidimensional. Las señales “a” muestran que los efectos de borde están ocurriendo, pero se observa que estos son más pequeños en los bordes laterales.

4.5.2.2 Señales registradas por los ocho grupos HFS Tiles del suelo y techo.



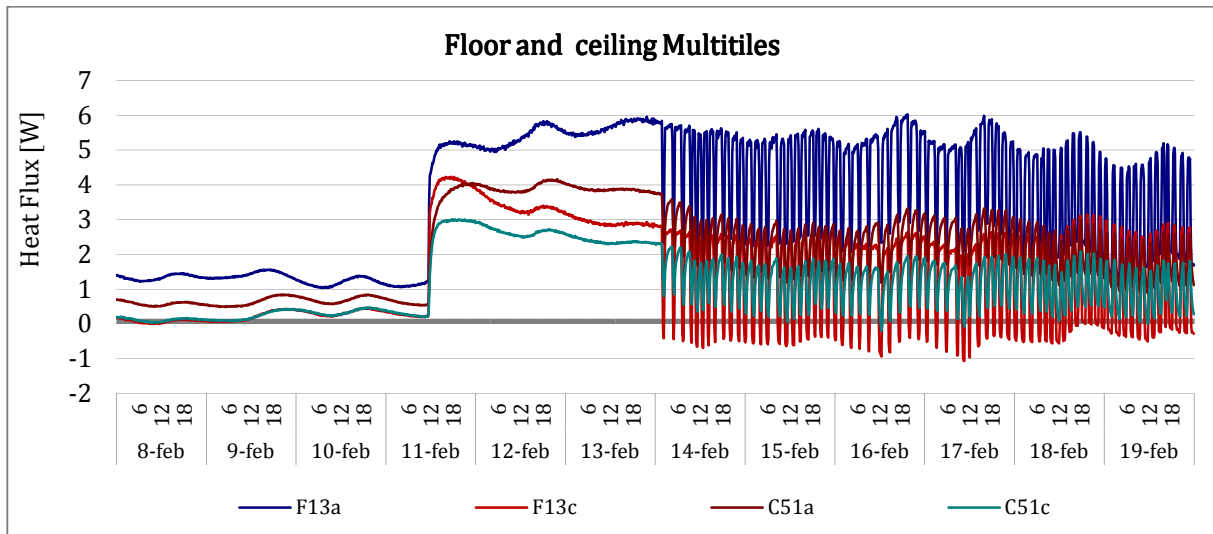
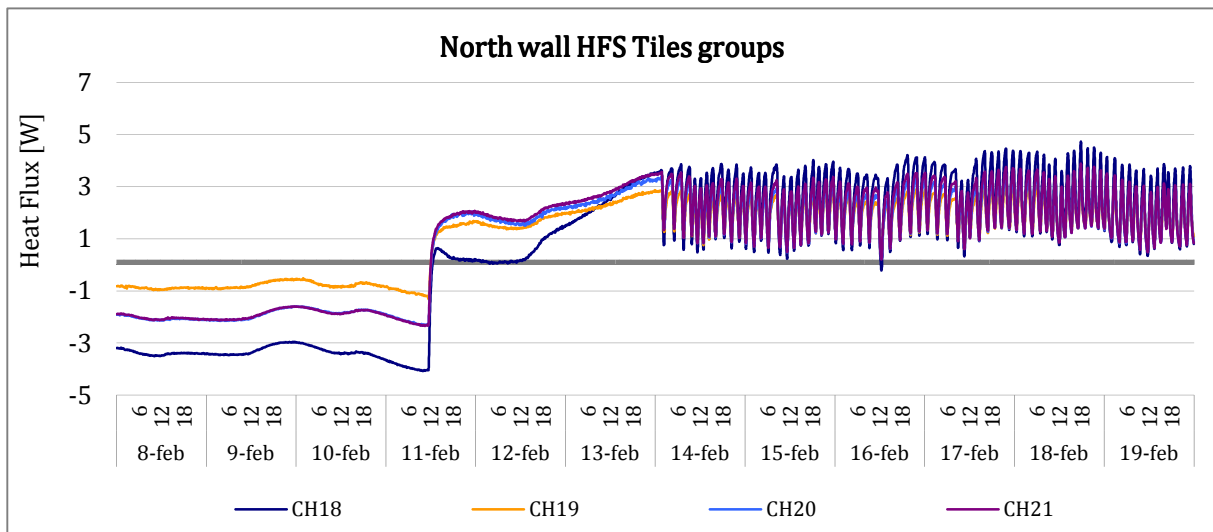


Fig. 3. 44. Arriba: Se puede señales registradas en los ocho grupos HFS Tiles del suelo y el techo. Los grupos simétricos dan casi las mismas señales. Abajo: las señales de “a” y “c” de los Multitiles

Las datos obtenidos en estas secuencias junto a los datos de la calibración de la celda de ensayo se podrían utilizar para la medición de elementos semitransparentes.

4.5.2.3 Señales registradas por los cuatro grupos HFS Tiles de la pared norte.



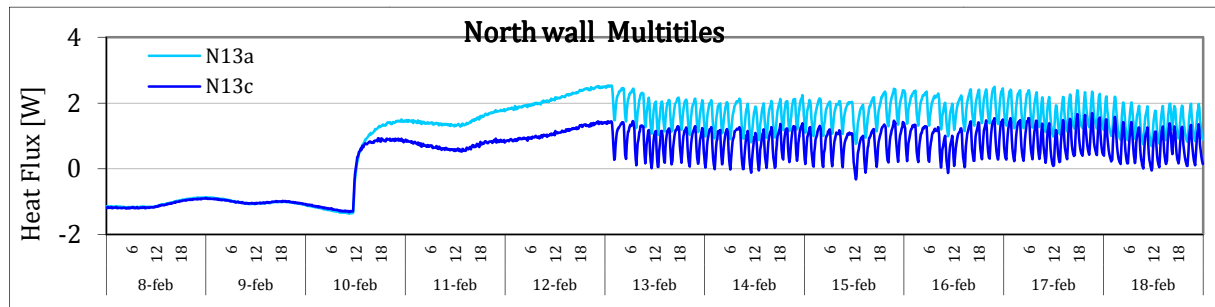


Fig. 3. 45. Arriba: señales registradas por los cuatro grupos HFS Tiles de la pared norte. Los grupos simétricos dan casi las mismas señales. Esto garantiza que la de puerta de partición entre la celda de ensayo y la de servicio, funciona de manera muy similar al resto de paredes. Abajo: Las señales de sensores “a” y “c” de las Multitiles

5 Instrumentación de los componentes de las soluciones constructivas

La instrumentación utilizada en ambos ensayos, fachada ventilada y fachada vegetal, se han dispuesto de la misma forma y con los mismos sensores. En la realización de los cálculos se ha tomado la muestra bajo el supuesto de un flujo unidireccional.

5.1 Instrumentación de la fachada ventilada

En el estudio del comportamiento térmico de la fachada ventilada se ha utilizado un conjunto de sensores de temperatura de superficie, de temperatura de aire, de flujo de calor y de humedad relativa en las diferentes capas de la muestra instalada. El diseño experimental se ha realizado con el fin de conseguir, la caracterización del comportamiento térmico de la muestra (transmitancia térmica y capacidad térmica) y validación del modelo numérico desarrollado.

El esquema de la fachada ventilada así como la descripción de sus capas se muestra en la Fig. 3.46. Los códigos de los sensores utilizados se observan en la Tabla 3.8. y la distribución y detalle de su colocación se puede ver en la Fig. 3.47.

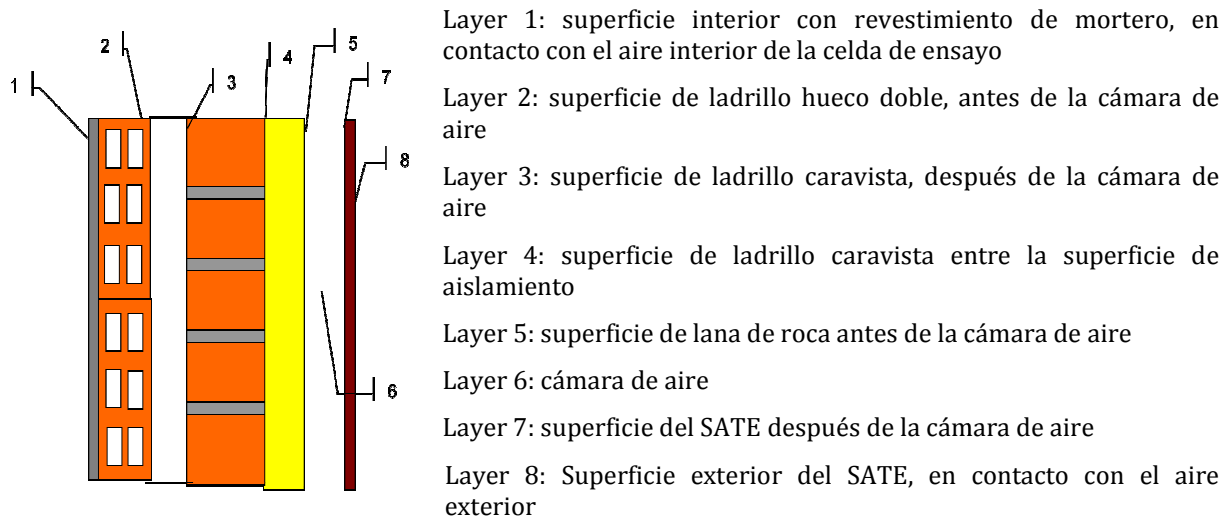




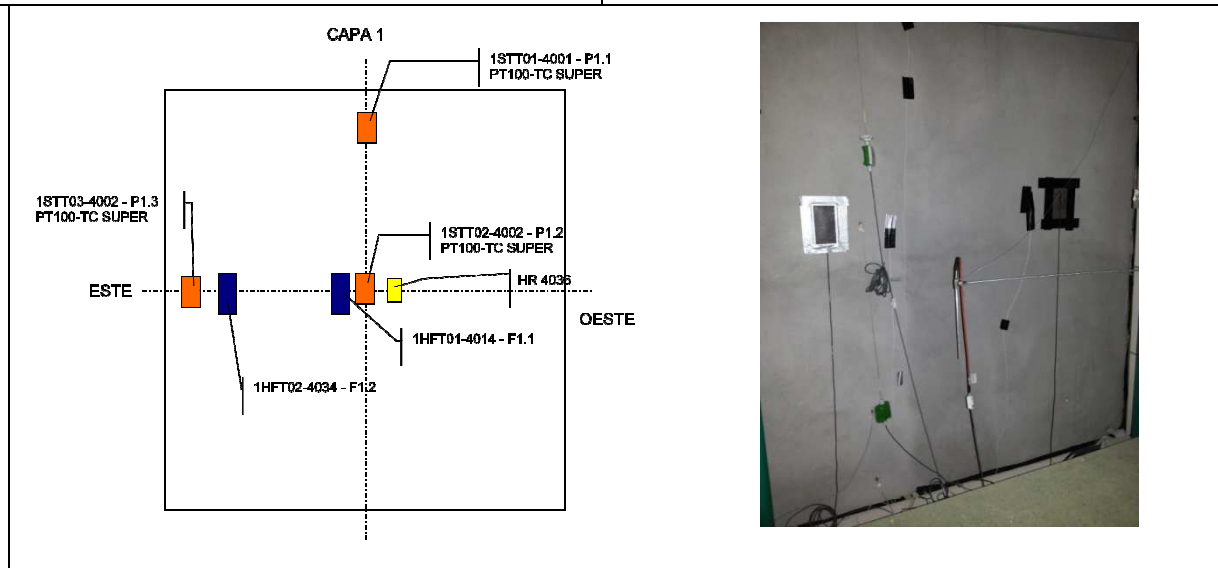
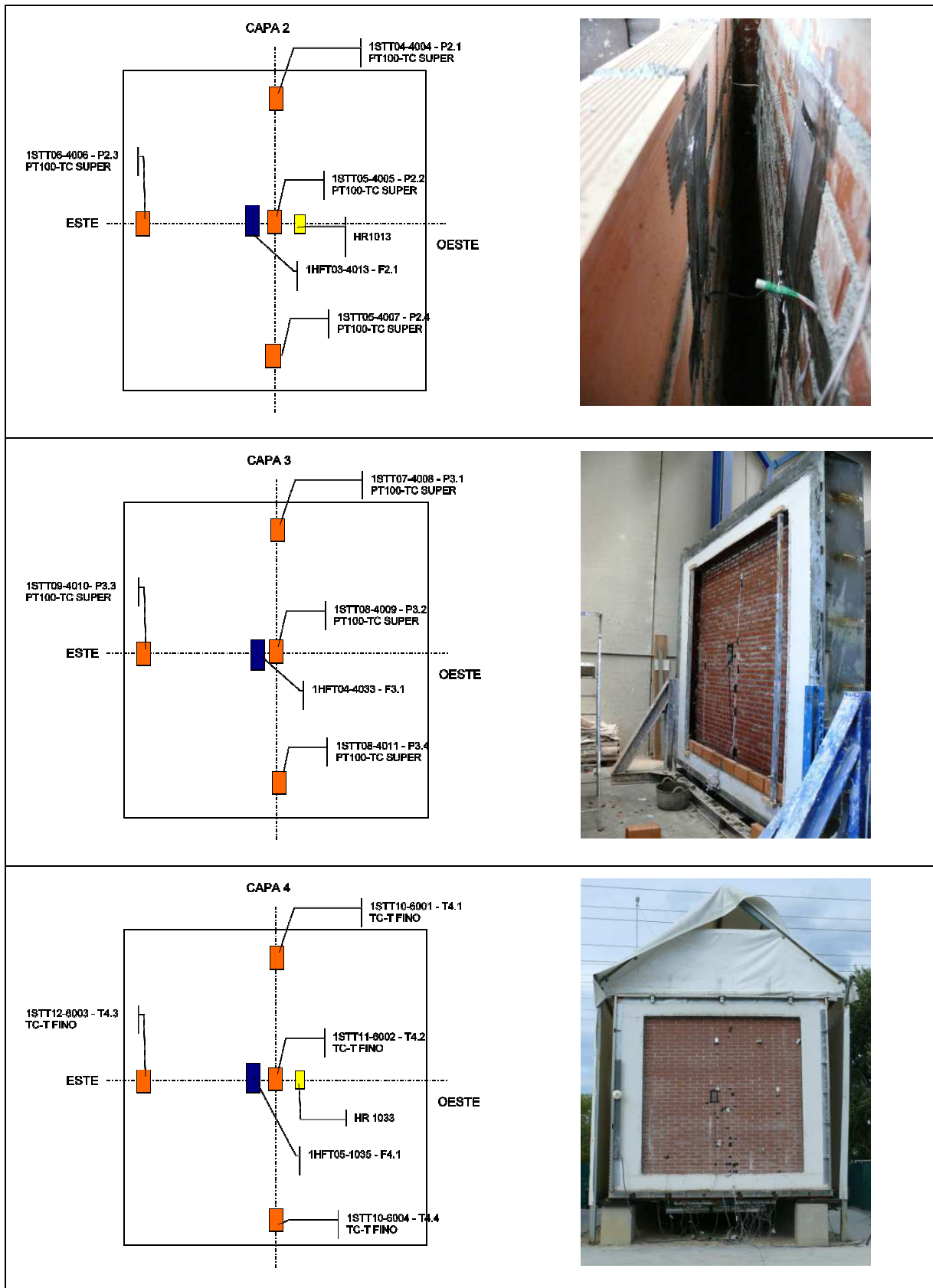


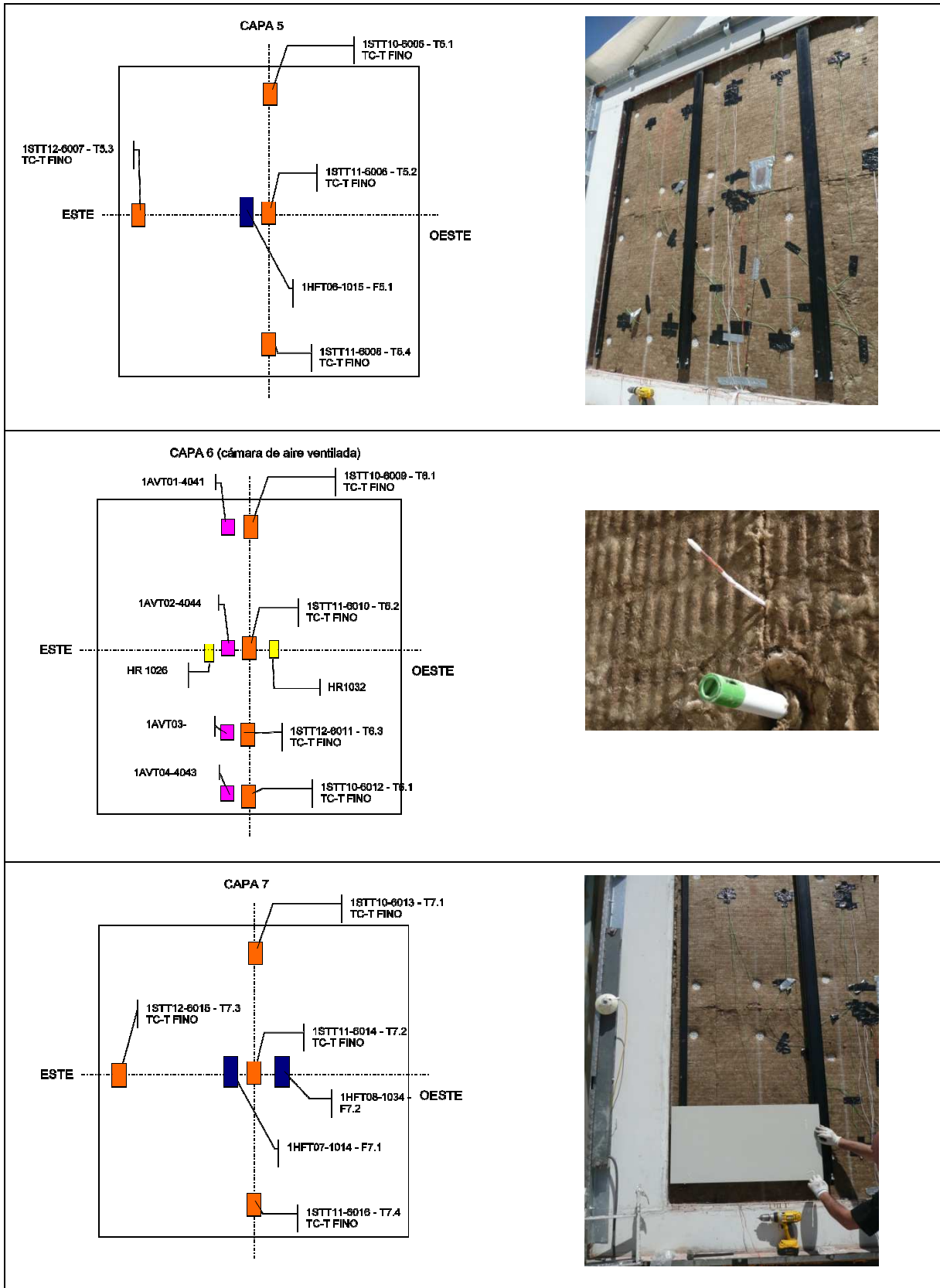
Fig. 3. 46. Esquema de la composición de la fachada ventilada estudiada. Cada una de las capas esta numerada e identificada

Tabla 3. 8. Código de los sensores utilizados

Sensor de temperatura PT100(Platinum thermoresistance)		Sensor de humedad relativa	
Sensor de flujo		Sensor velocidad de aire	







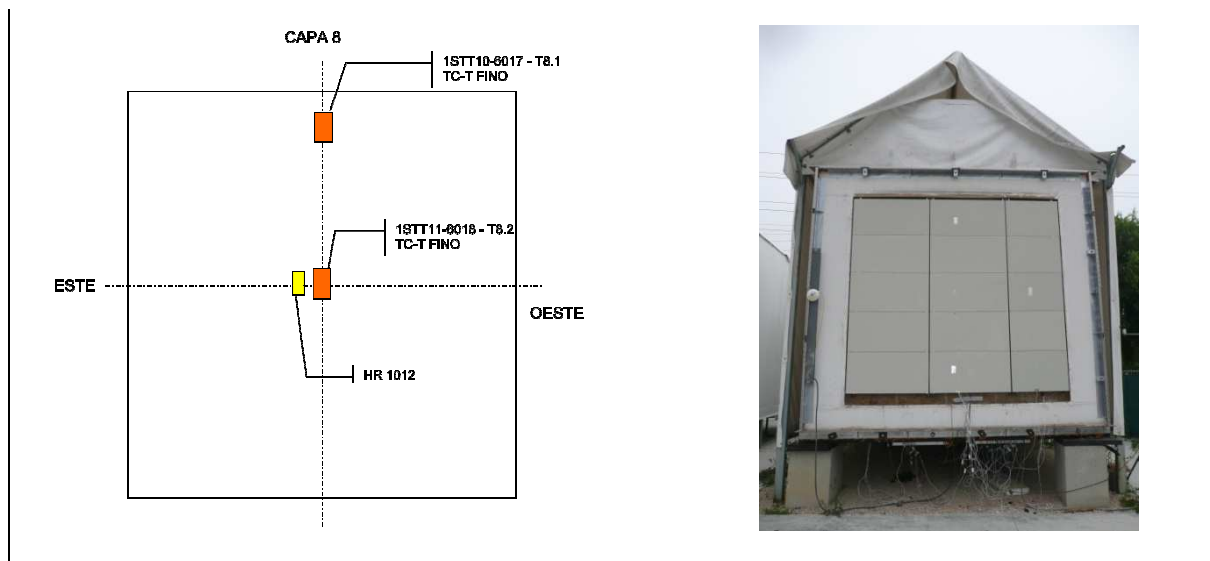


Fig. 3. 47. Descripción de la instrumentación utilizada en las diferentes capas que componen la fachada ventilada

5.1.1 Medida de temperatura superficial en las diferentes capas

La medida de la temperatura superficial de las diferentes capas se realizó mediante cuatro sensores de temperatura por capa en la muestra de ensayo. El objetivo de esta medida de temperatura superficial es registrar el perfil central, a pesar de ello se instalaron tres sensores adicionales por capa con el fin de estudiar si había efectos de borde significativos, con estas medidas se ha podido comprobar la unidimensionalidad del flujo.

En la Tabla 3.9 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 9. Código, descripción y precisión de los sensores de temperatura superficial

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 1	1STT01	PT100 superficie, en zona de interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT02	PT100 superficie, en zona de interior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT03	PT100 superficie, en zona de interior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 2	1STT04	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT05	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT06	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central	± 0.1 °C

		horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	
	1STT07	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 3	1STT08	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT09	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT10	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT11	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT12	PT100 superficie, caravista exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 4	1STT13	PT100 superficie, caravista exterior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT14	PT100 superficie, caravista exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT15	PT100 superficie, caravista exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT16	PT100 superficie, lana de roca exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 5	1STT17	PT100 superficie, lana de roca exterior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT18	PT100 superficie, lana de roca exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT19	PT100 superficie, lana de roca exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT22	PT100 superficie, placas cerámicas interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 7	1STT23	PT100 superficie, placas cerámicas interior centro, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT24	PT100 superficie, placas cerámicas interior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT25	PT100 superficie, placas cerámicas interior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
	1STT26	PT100 superficie, fachada exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1 °C
Layer 8	1STT27	PT100 superficie, fachada exterior centro, TC puntual.	± 0.1 °C

En las siguientes imágenes se muestran las medidas de temperatura superficial de la diferentes capas que conforman la fachada ventilada, desde la capa nº 1 a la capa nº 8 durante una secuencia PRBS realizada en agosto de 2012 en la célula de ensayo EGUZKI así como, la temperatura media de superficie dentro de la célula y la temperatura ventilada exterior.

5.1.1.1 Señales de Temperatura media superficial interior de la célula de ensayo y de temperatura exterior ventilada registradas.

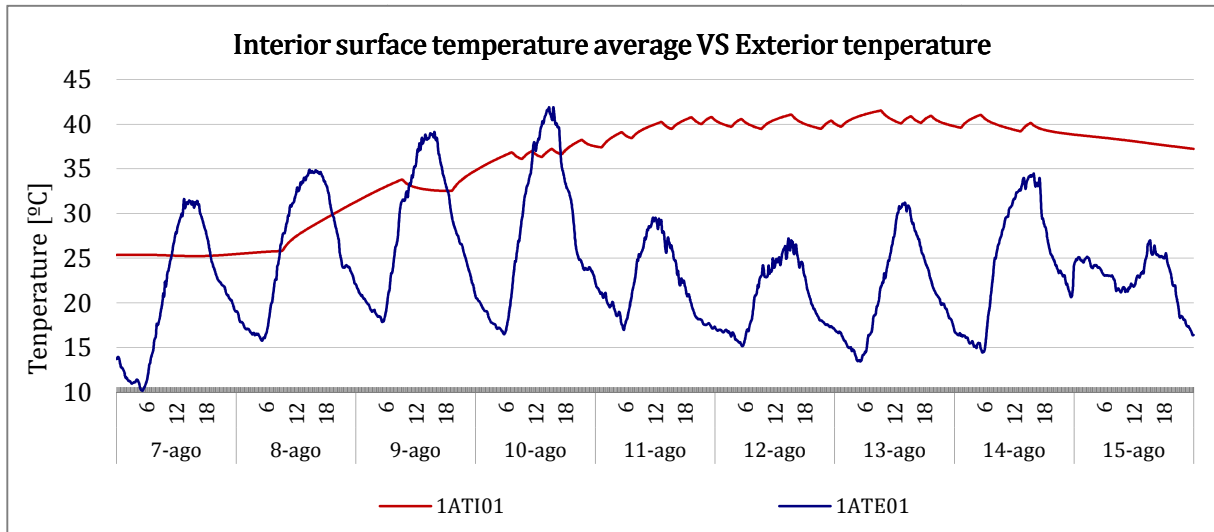
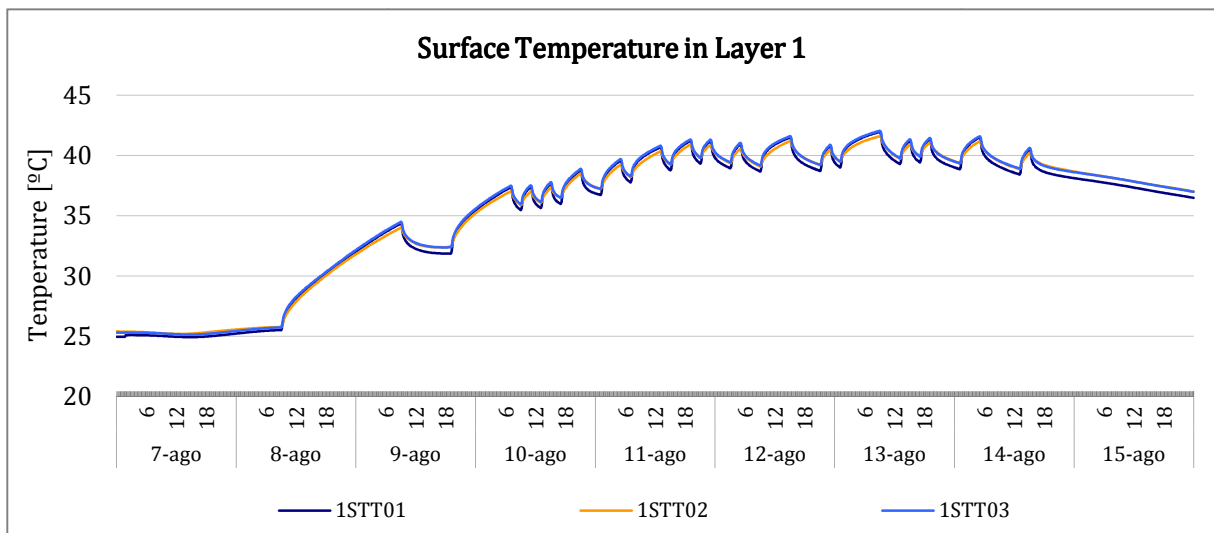


Fig. 3.48. Temperatura media superficial interior de la célula de ensayo y la temperatura exterior ventilada durante la serie PRBS

5.1.1.2 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 1 (superficie interior con revestimiento de mortero) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.



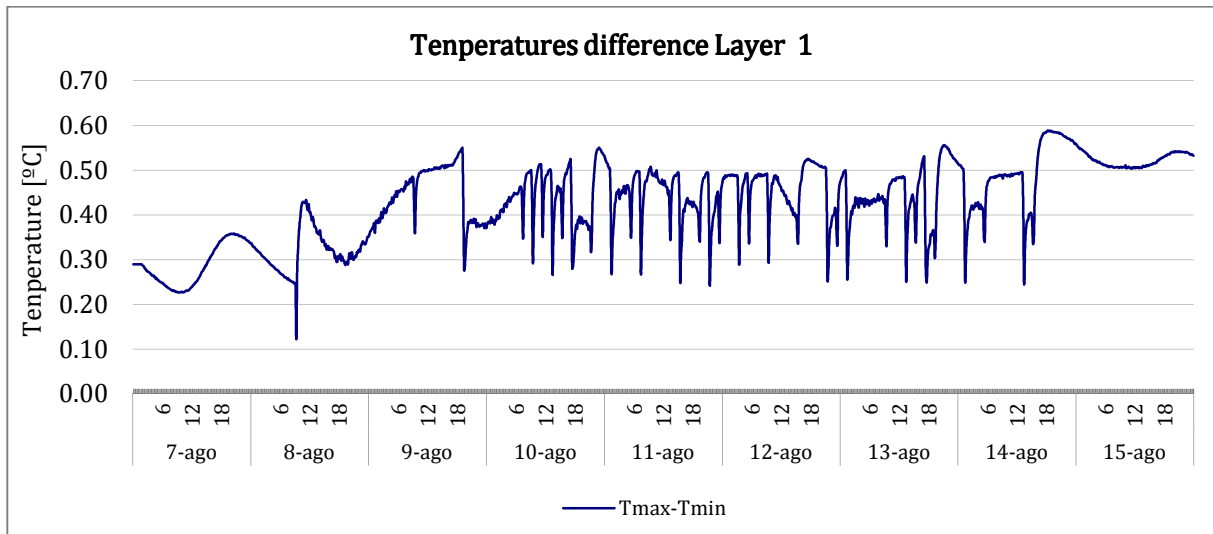


Fig. 3. 49. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº1 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 1 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 49. Usando el promedio de los tres sensores se obtiene un error inferior a la media ± 0.5 °C para toda la prueba. A lo largo de los próximos capítulos, cuando se utilice este valor en los modelos matemáticos se debe tener en cuenta que se va a utilizar el valor de la temperatura media de los diferentes sensores por lo que el error que se estará cometiendo será la mitad, en este caso del orden de ± 0.25 °C. Lo mismo ocurrirá con el resto de capas y sensores.

5.1.1.3 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 2 (superficie ladrillo hueco doble, antes de la CA) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

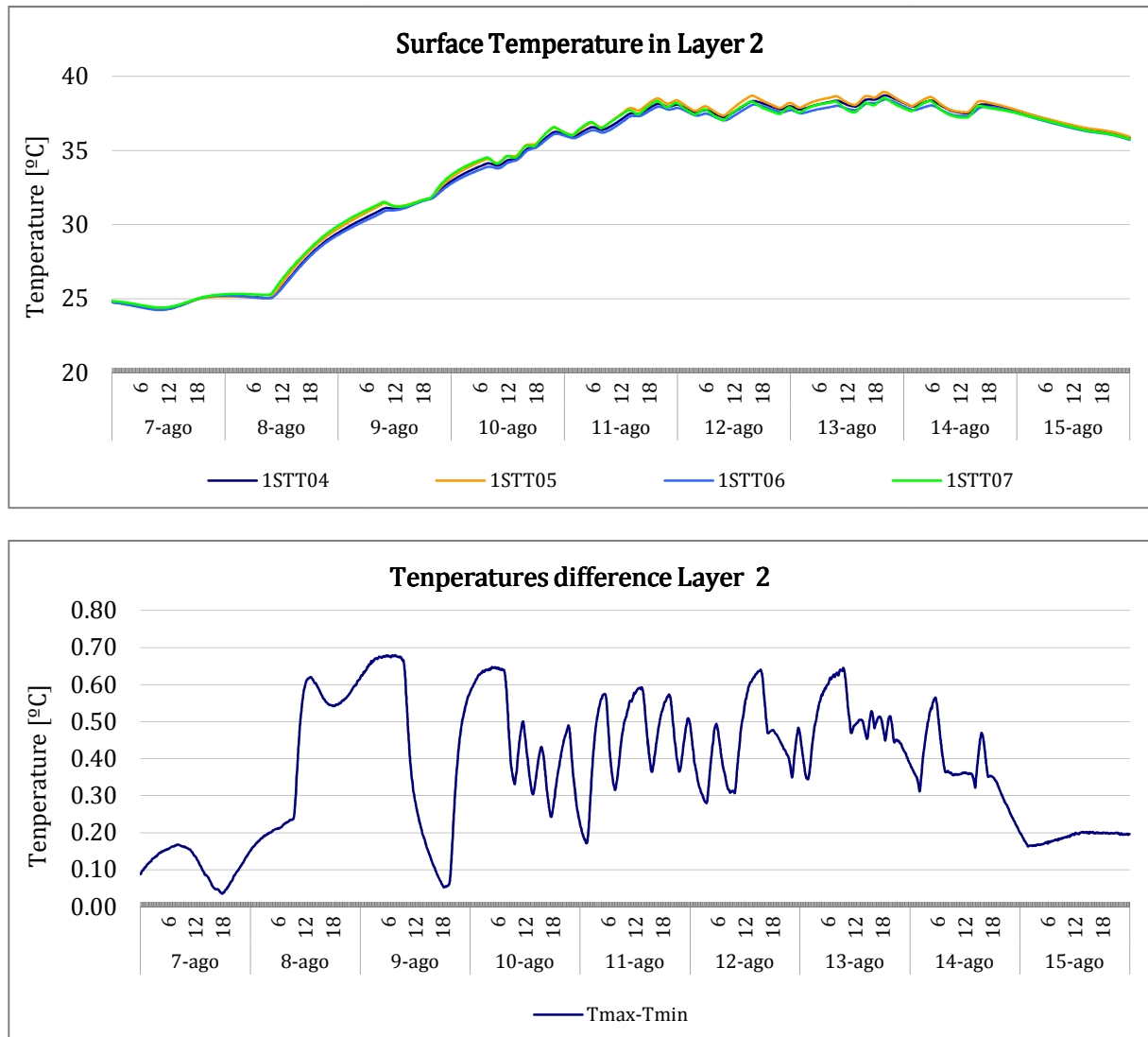


Fig. 3. 50. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº2 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 2 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.50. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error inferior a la media ± 0.6 °C para toda la prueba. La diferencia de medida de temperatura entre los sensores aumenta durante los periodos de calentamiento de la célula.

5.1.1.4 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 3 (superficie ladrillo caravista, después de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

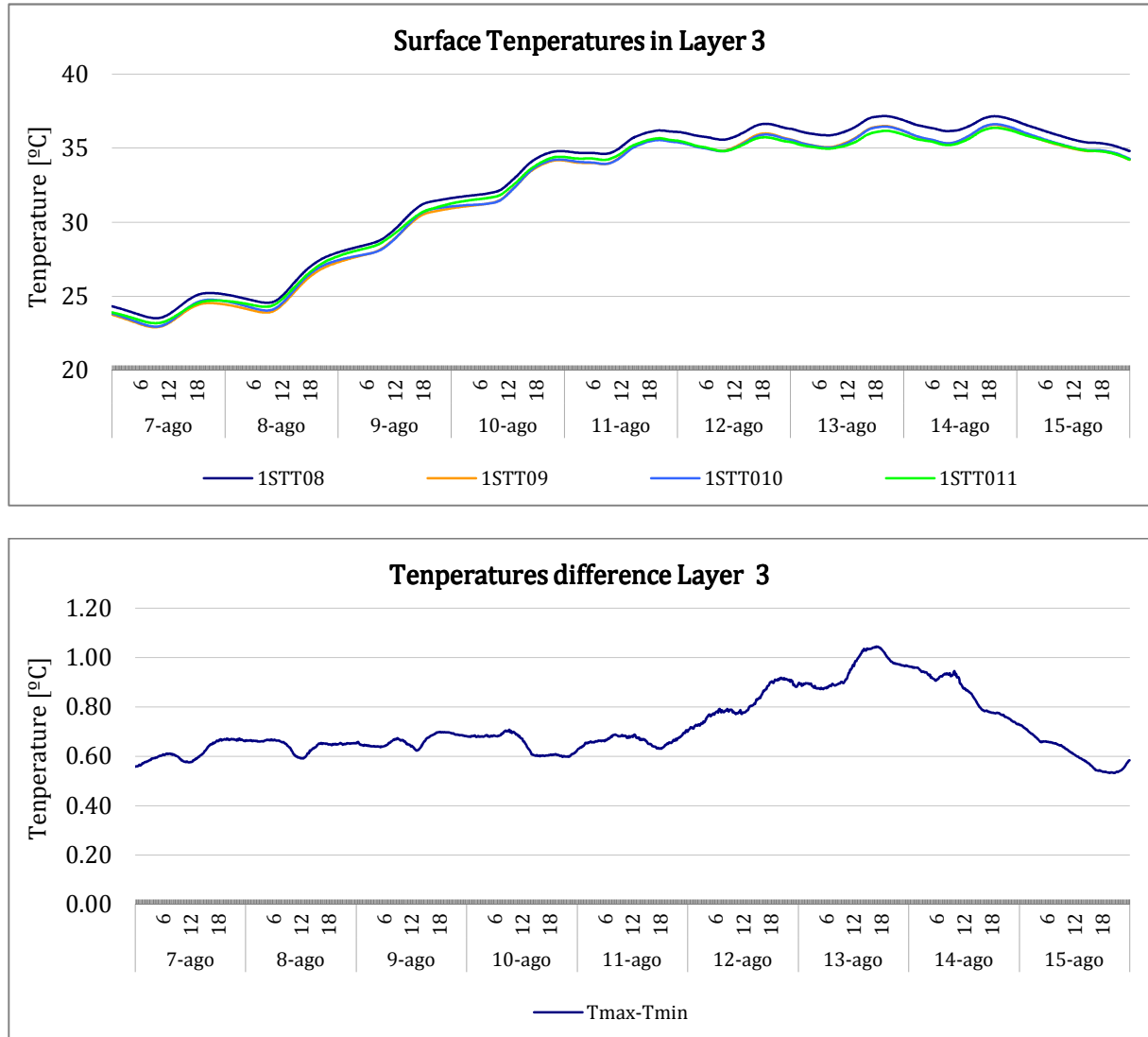


Fig. 3. 51. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº3 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 3 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.51. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error de ± 0.6 °C. Aumentando en el último tercio de la prueba hasta ± 1 °C.

5.1.1.5 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 4 (superficie de ladrillo caravista entre la superficie de aislamiento) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

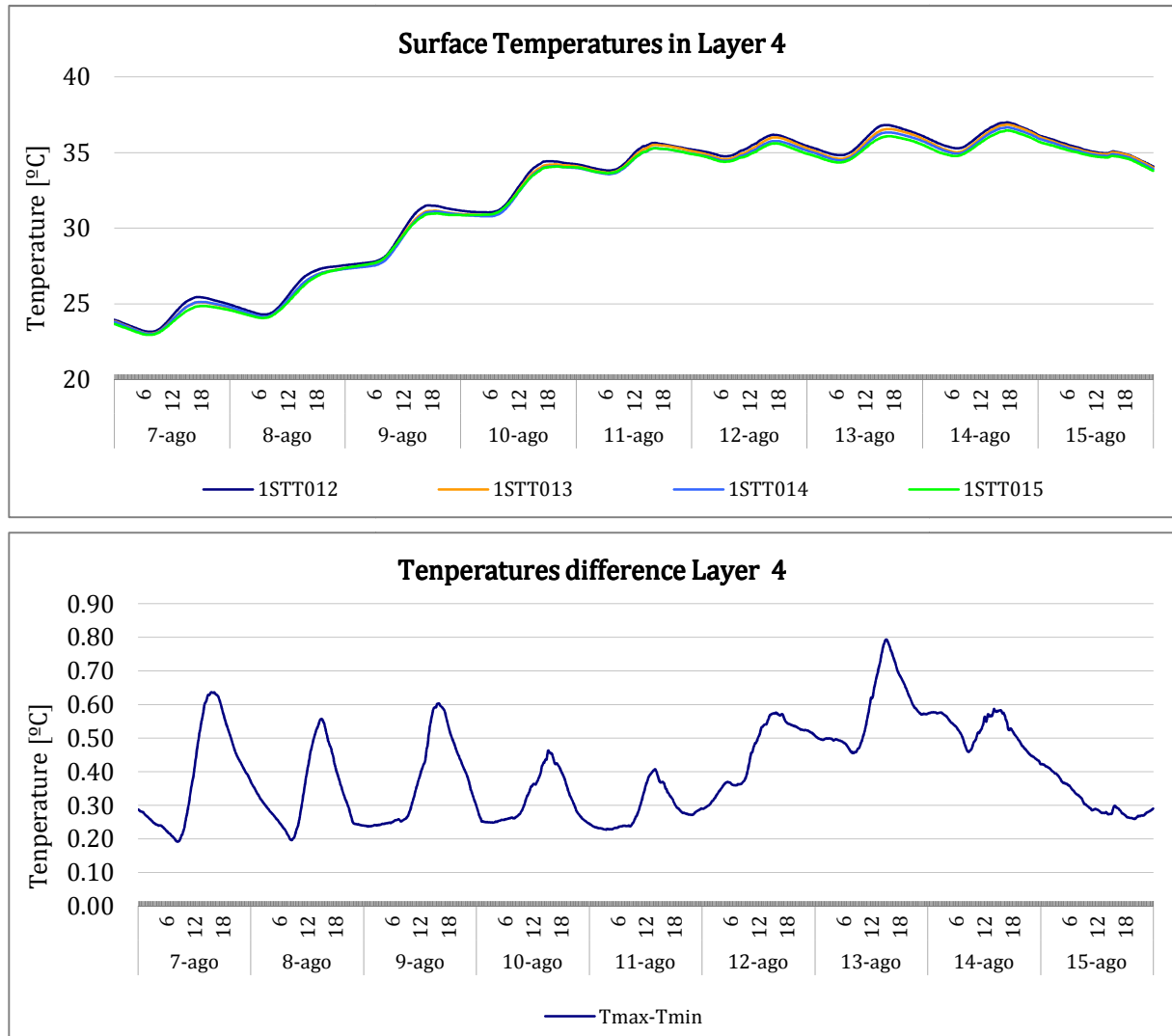


Fig. 3. 52. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº4 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 4 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.52. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error medio de ± 0.4 °C. Reduciéndose al final de la prueba hasta 0.3 °C, con picos máximos de 0.8 °C coincidentes con la radiación máxima incidente (12h).

5.1.1.6 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 5 (superficie de lana de roca antes de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

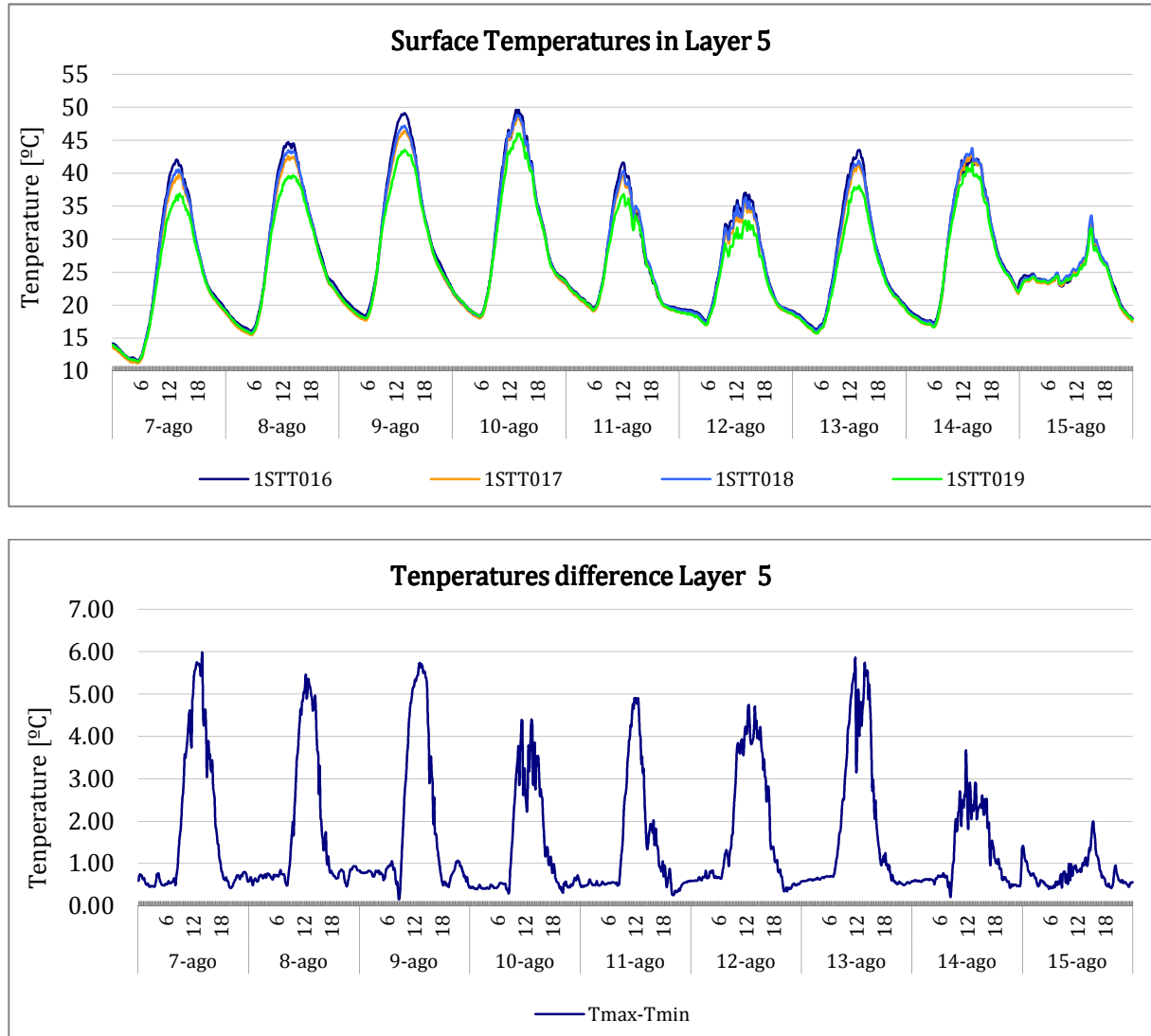


Fig. 3.53. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº5 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 5 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.53. En la gráfica se puede observar la correlación de la temperatura exterior con la variación de las temperaturas en función del ciclo diario (día-noche) Alcanzando temperaturas máximas de 50 °C al mediodía y mínimas nocturnas de 10 °C. Debido al efecto chimenea que crea la cámara de aire la temperatura de los sensores más cercanos al extremo superior son mayores que los da la parte

inferior, alcanzando diferencias máximas durante los periodos diarios de hasta 6 °C, pero estas diferencias se reducen por debajo del grado durante las horas sin radiación solar incidente.

5.1.1.7 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 7 (superficie interior del SATE después de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

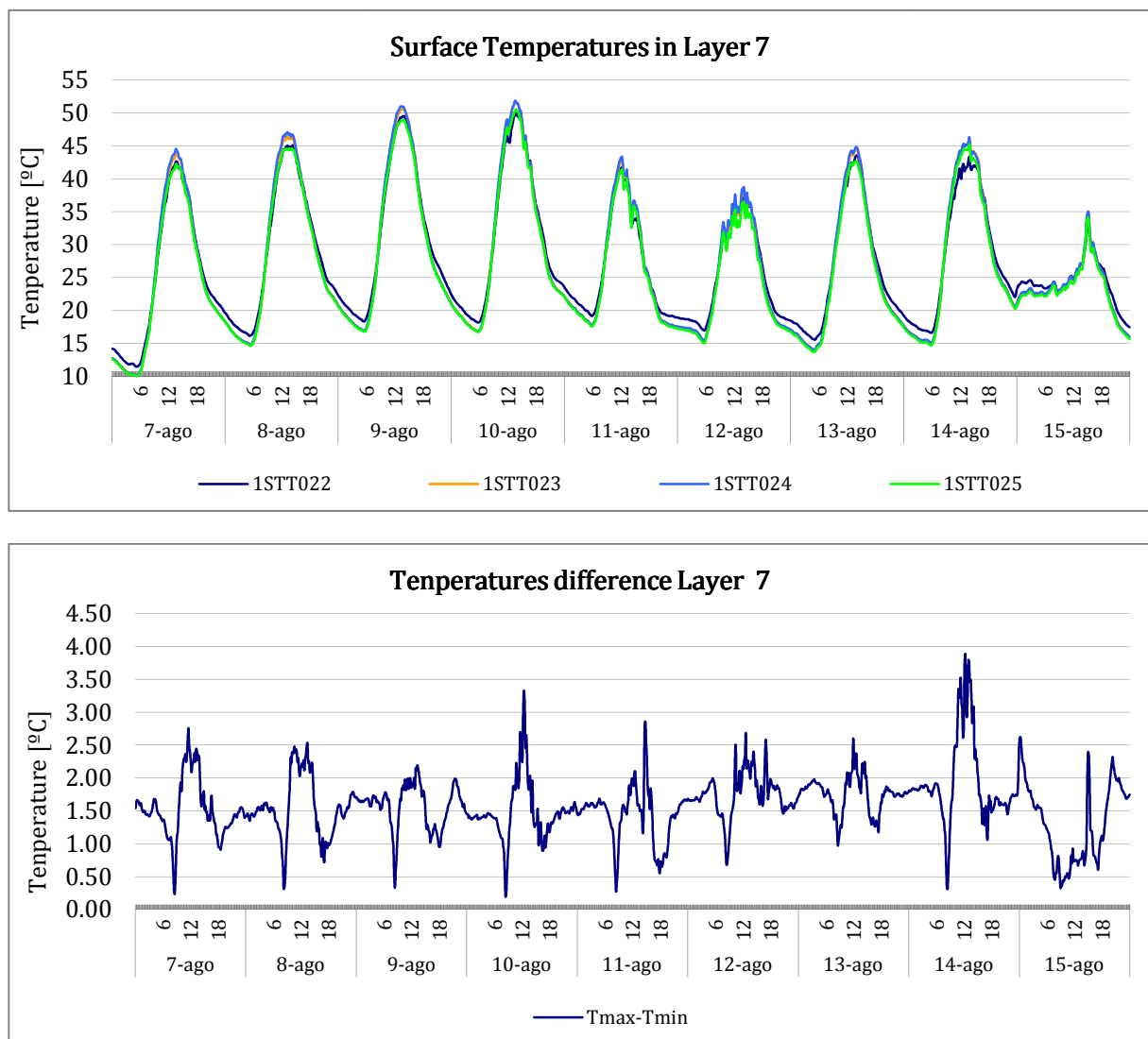


Fig. 3.54. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº7 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 7 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.54. En la gráfica se puede observar la correlación de la temperatura exterior con la variación de las temperaturas en función del ciclo diario

(día-noche) Alcanzando temperaturas máximas mayores de 50 °C al mediodía y mínimas nocturnas de 15 °C.

5.1.1.8 *Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 8 (Superficie exterior del SATE, en contacto con el aire exterior) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.*

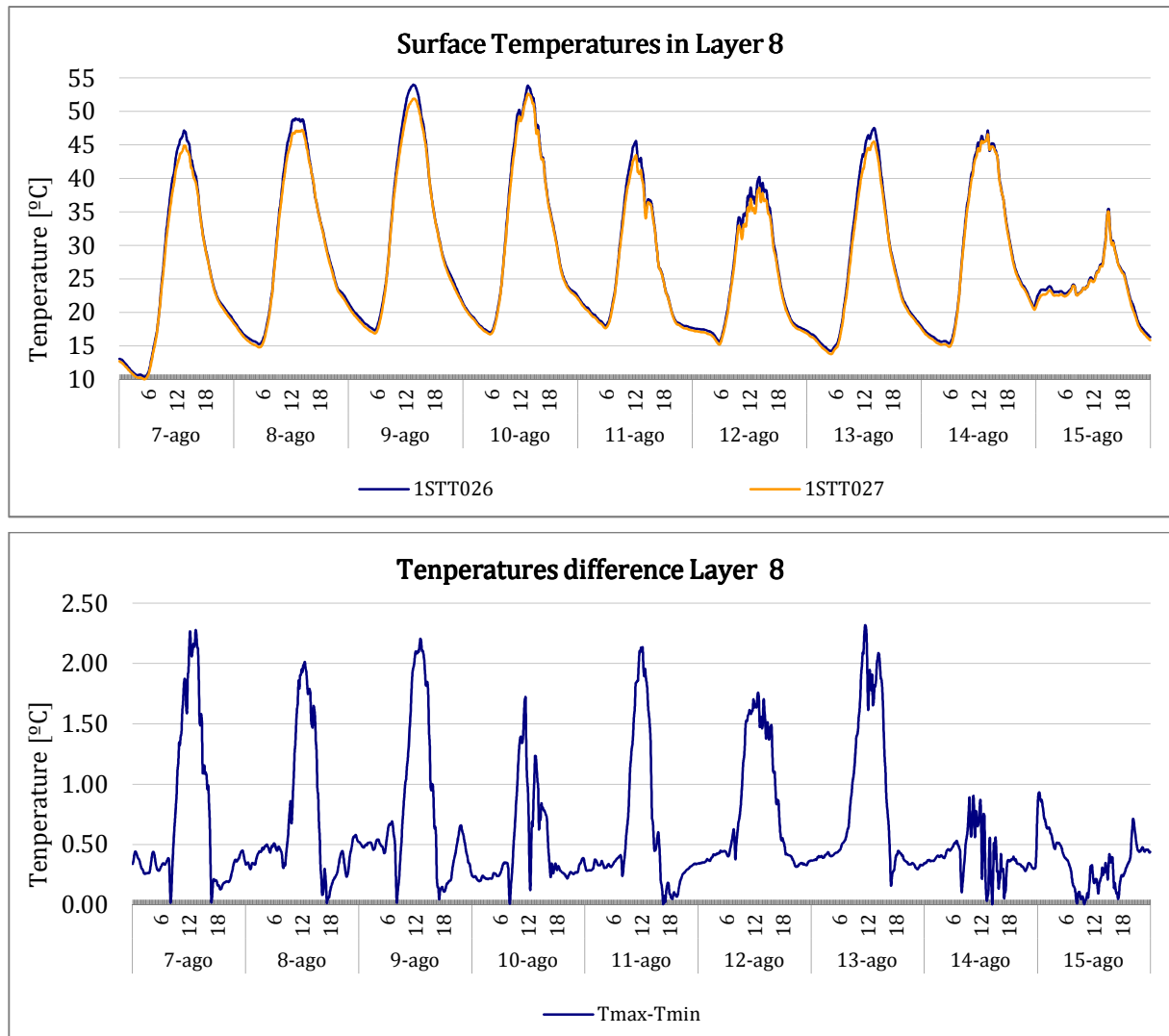


Fig. 3.55. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº8 durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 8 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.55. En la gráfica se puede observar la correlación de la temperatura exterior con la variación de las temperaturas en función del ciclo diario (día-noche) Alcanzando temperaturas máximas de casi 55 °C al mediodía y mínimas nocturnas de 15 °C. La diferencia entre ambos sensores se reduce a $\pm 0,5$ °C durante el

periodo nocturno, pero alcanza diferencias de hasta 2 °C durante el periodo de incidencia directa solar.

5.1.2 Medida de temperatura y velocidad en la cámara de aire

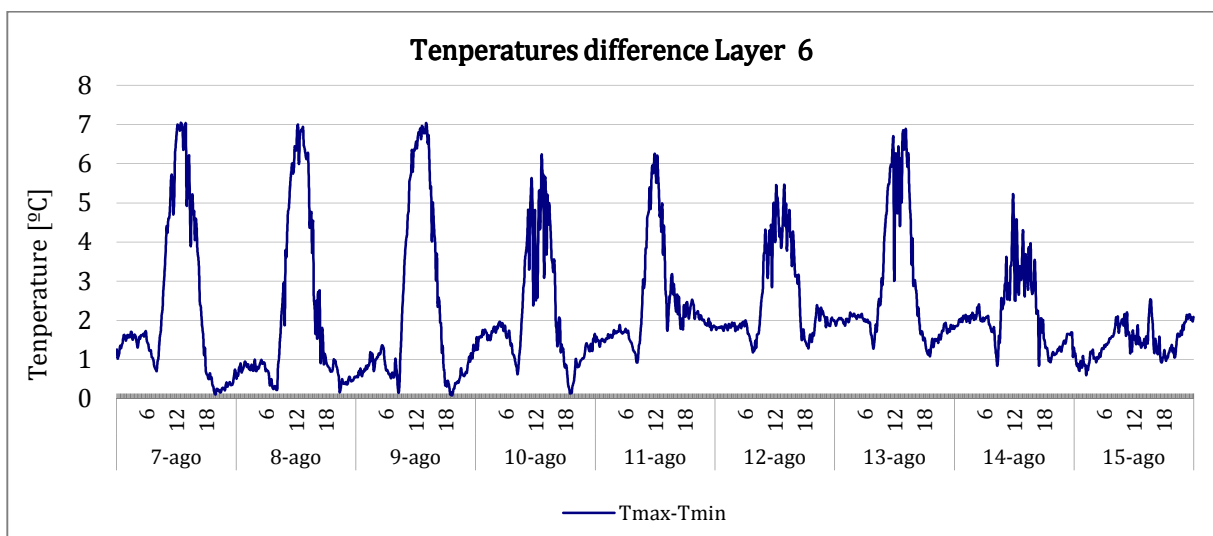
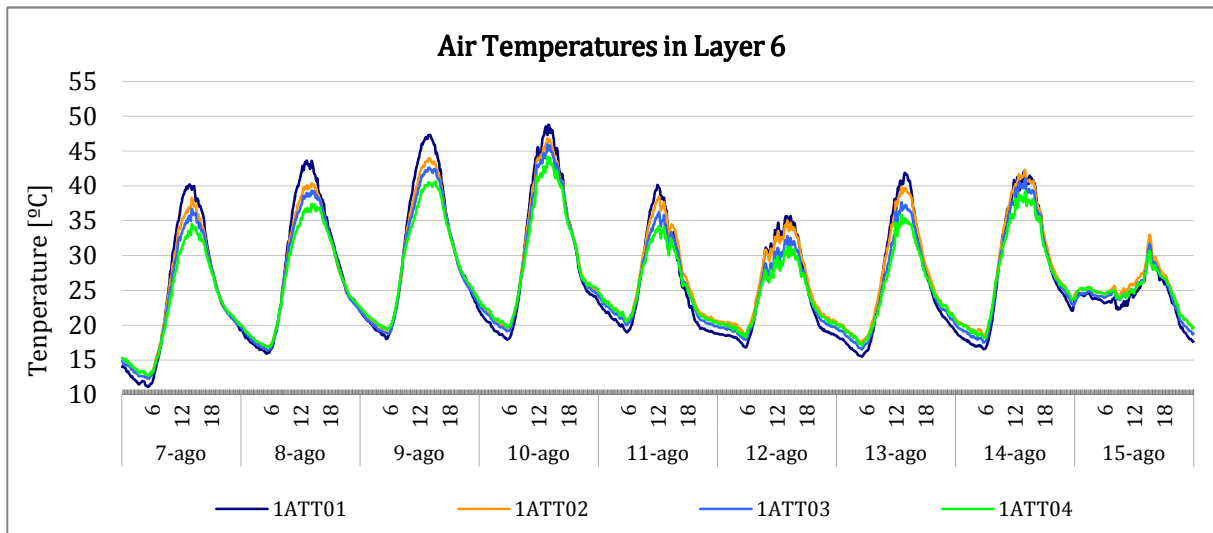
La medida de la temperatura y velocidad en la cámara de aire se realizó mediante cuatro sensores de temperatura de aire y cuatro sensores de temperatura de velocidad. El objetivo de estas medidas es registrar el perfil de la cámara de aire con el fin de estudiar su calentamiento, movimiento y consiguiente funcionamiento.

En la Tabla 3.10 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura y velocidad, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 10. Código, descripción y precisión de los de los sensores de temperatura y velocidad del aire en la cámara de aire

	Nombre	Descripción	Precisión
Layer 6	1ATT01	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (5 cm de rejilla superior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1 °C
	1ATT02	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (135 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1 °C
	1ATT03	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (30 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1 °C
	1ATT04	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (5 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1 °C
	1AVT01	Velocidad de aire en el interior de la cámara de aire. Eje central vertical (5 cm de rejilla superior).	± 0.1 m/s
	1AVT02	Velocidad de aire en el interior de la cámara de aire. Eje central vertical (135 cm de rejilla inferior)	± 0.1 m/s
	1AVT03	Velocidad de aire en el interior de la cámara de aire. Eje central vertical (30 cm de rejilla inferior)	± 0.1 m/s
	1AVT04	Velocidad de aire en el interior de la cámara de aire. Eje central vertical (5 cm de rejilla inferior)	± 0.1 m/s

5.1.2.1 *Señales de la evolución de la Temperatura media y velocidad del aire de la capa 6 (cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.*



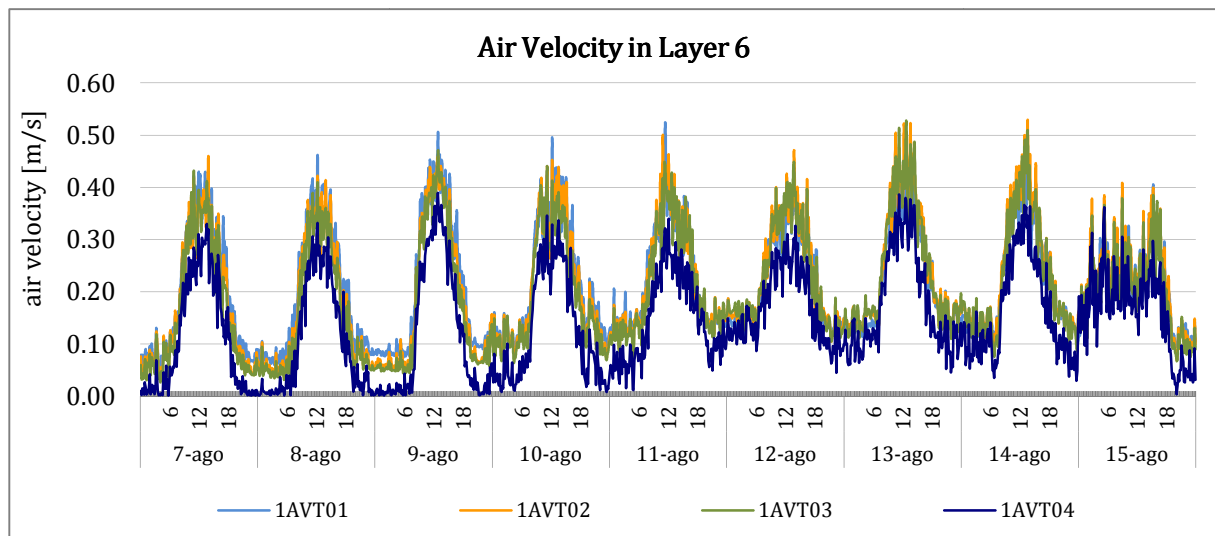


Fig. 3. 56. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de aire situados en la cámara ventilada nº6 durante una secuencia PRBS. Medio: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas Abajo: velocidad del aire en la cámara ventilada (Agosto de 2012)

Los resultados de las mediciones de la temperatura y velocidad del aire de la capa 6 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.56. En la gráfica se puede observar la correlación de la temperatura exterior con la variación de las temperaturas en función del ciclo diario (día-noche). Alcanzando temperaturas máximas de 50 °C al mediodía y mínimas nocturnas de 10 °C. Debido al efecto chimenea, es decir, el aire que entra en la cámara es calentado por la radiación solar, y por lo tanto, se crea un movimiento de aire de flujo ascendente dentro de la cámara que crea la temperatura de los sensores más cercanos al extremo superior sean mayores a los de la parte inferior. Alcanzando diferencias máximas durante los periodos diarios de hasta 7 °C, estas diferencias se reducen por debajo del grado durante las horas sin radiación solar incidente.

Lo mismo ocurre con las velocidades del aire, la velocidad en la parte inferior de la fachada es menor al resto de velocidades, aumentando a lo alto de la fachada ventilada.

5.1.3 Resumen de las temperatura de las diferentes capas

A continuación se recoge la medida de la temperatura de las diferentes capas de la muestra de ensayo. El objetivo es representar de forma conjunta todos los perfiles de temperatura a lo largo del periodo de ensayo para poder obtener analizarlos de forma conjunta.

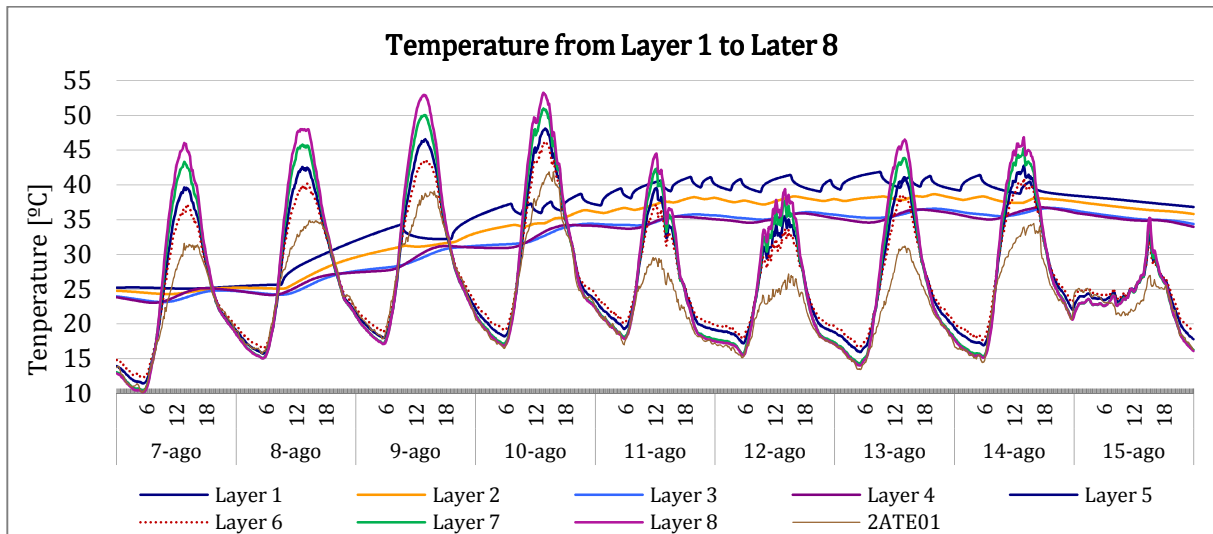


Fig. 3.57. Temperatura media de las diferentes capas de la fachada ventilada

En la gráfica 3.57 se puede observar de forma conjunta la evolución de la temperatura durante un PRBS en las diferentes capas que componen la fachada ventilada. Se observan dos tendencias completamente diferenciadas, por un lado se encuentran las capas interiores de la 1 a la 4, en las que es patente la señal PRBS del calefactor. A partir de la capa 5, aislante lana de roca, únicamente se percibe la inercia térmica producida por el gradiente día noche, de forma más notoria en las capas exteriores.

5.1.4 Medida de radiación solar y velocidad en la cámara de aire

La medida de ambas se realizó mediante los sensores señalados. El objetivo de esta comparativa es ver el funcionamiento de la cámara ventilada y estudiar sus efectos.

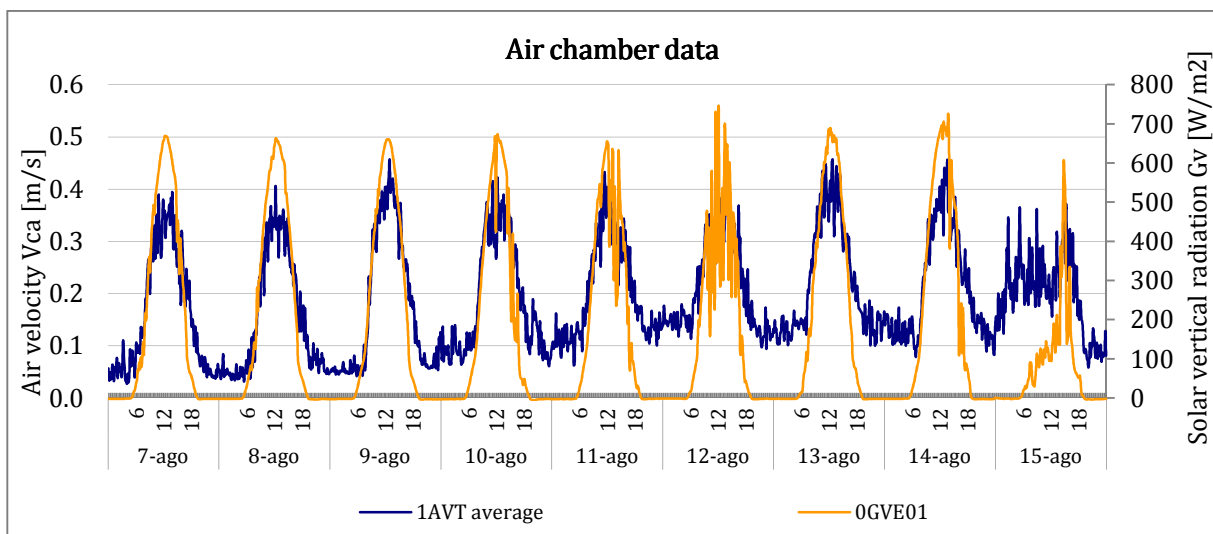


Fig. 3.58. Evolución de la radiación solar en la velocidad de aire de la cámara ventilada

Los resultados de la figura 3.58 relacionan la radiación solar con la velocidad del aire dentro de la cámara ventilada. Se observa como a lo largo de toda la serie temporal el aumento de la velocidad en la cámara de aire es instantáneo en el momento en el que incide la radiación solar sobre la fachada, es más notable los días 7 y 8 de agosto cuando la velocidad del viento es mínima.

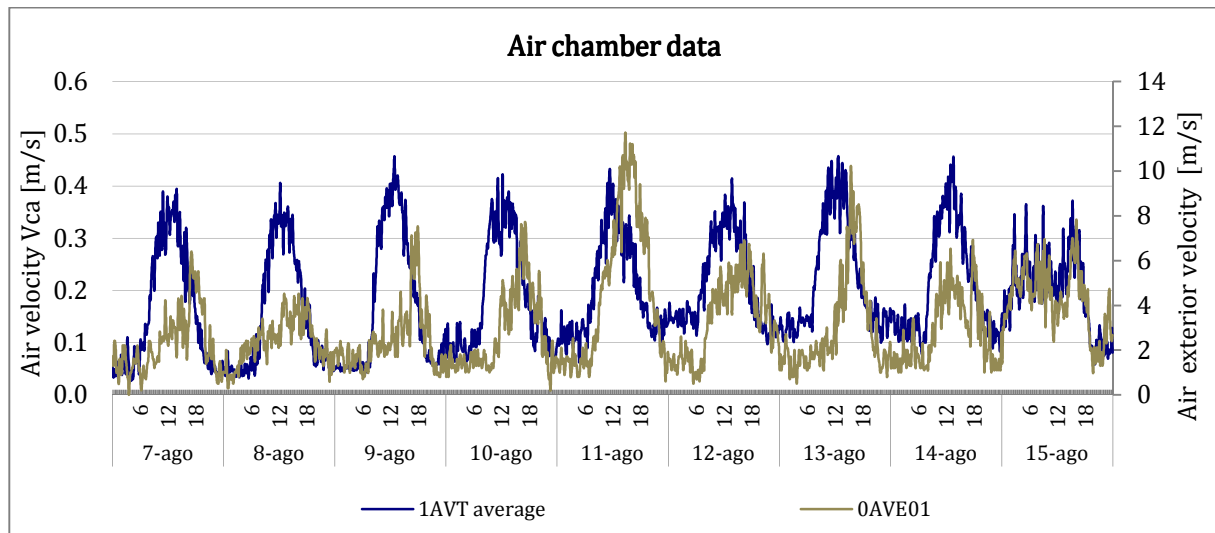


Fig. 3. 59. Evolución de la velocidad del aire exterior en la velocidad de la cámara ventilada

En la gráfica anterior (Fig. 3.59) se puede observar como cuando la radiación solar desaparece sigue habiendo velocidad de aire significativa dentro de la cámara, provocada por la entrada de aire a través de las juntas del aplacado cerámico. Un pico de viento exterior importante, es capaz de aumenta la velocidad del aire en la cámara, las noches del 12 y 15 de agosto. Por otro lado, en días donde la velocidad del viento exterior es reducida provoca la reducción de velocidad en la cámara.

5.1.5 Medida del flujo de calor en las diferentes capas

La medida del flujo de calor de las diferentes capas se realizó mediante siete fluxómetros, dos en la capa interior y uno en el resto de las capas que componen la muestra de ensayo, con el objetivo de medir el flujo térmico que atraviesa la muestra. Los valores de flujo positivos representan el flujo entrante y los valores de flujo negativos, el flujo que se dirige hacia el exterior del módulo.

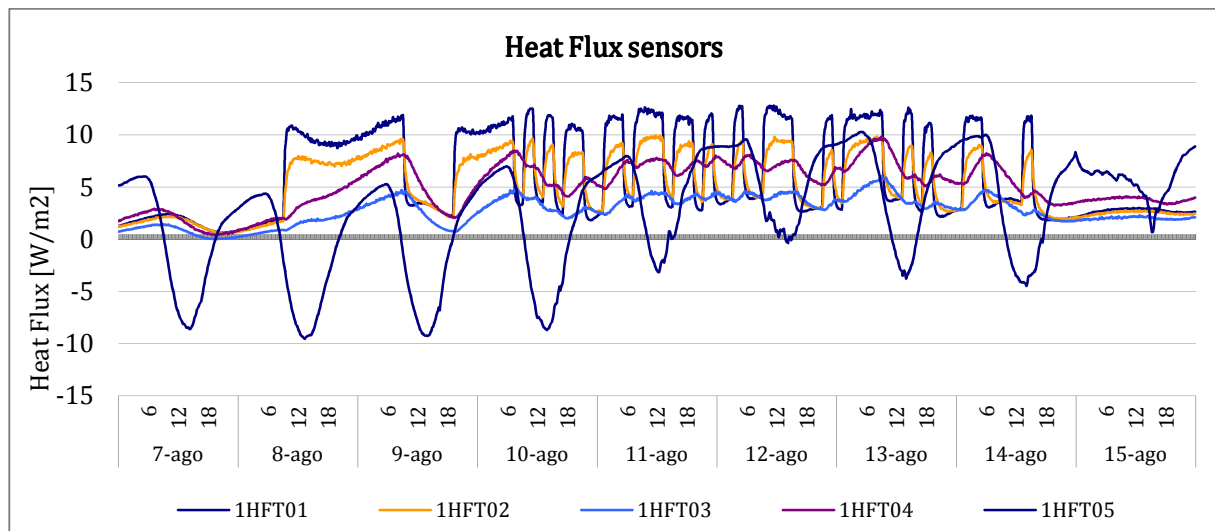
En la Tabla 3.11 se muestra la nomenclatura utilizada en los fluxómetros, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 11. Código, descripción y precisión de los fluxómetros

Nombre	Descripción	Precisión	
Layer 1	1HFT01	Fluxómetro, en zona interior eje central. Ref.: 11575	$\pm 0.5 \%$
Layer 2	1HFT02	Fluxómetro, en zona cámara de aire hoja interior central. Ref.: 7509	$\pm 0.5 \%$
Layer 3	1HFT03	Fluxómetro, en zona cámara de aire hoja exterior central. Ref.: 11569	$\pm 0.5 \%$
Layer 4	1HFT05	Fluxómetro, caravista exterior centro Ref.: 11570	$\pm 0.5 \%$
Layer 5	1HFT06	Fluxómetro, lana de roca exterior centro Ref.: 11571	$\pm 0.5 \%$
Layer 8	1HFT07	Fluxómetro, cerámica interior centro Ref.: 11579	$\pm 0.5 \%$
Layer 8	1HFT08	Fluxómetro, cerámica interior centro Ref.: 11576	$\pm 0.5 \%$

5.1.5.1 Señales de la evolución de los sensores de flujo de calor situados en las diferentes capas de la fachada ventilada.

A continuación se recoge la medida de los flujos de calos de las diferentes capas de la muestra de ensayo. El objetivo es representar de forma conjunta todos los perfiles de a lo largo del periodo de ensayo para poder obtener analizarlos de forma conjunta.



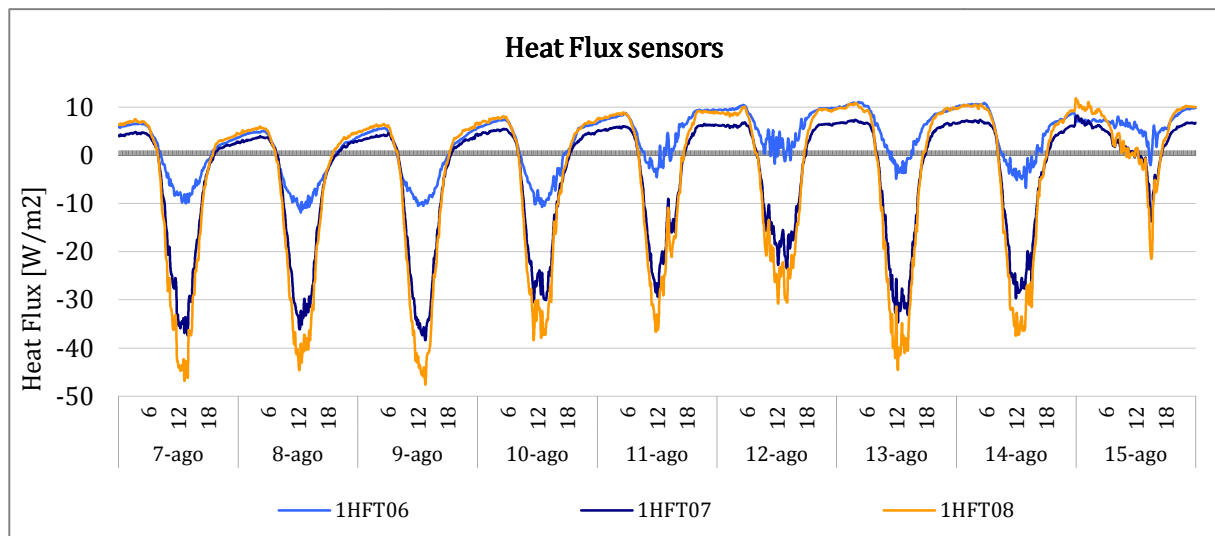


Fig. 3. 60. Arriba: evolución de los sensores de flujo de calor situados en las capas de la uno a la cinco durante una secuencia PRBS. Abajo: Flujo de calor de los sensores situado en las capas de la seis a la ocho (Agosto de 2012)

En la figura 3.60 se observa el efecto de la temperatura ambiente exterior sobre en las primeras capas y como este efecto llega hasta solo hasta la capa aislante de lana de roca. A partir de este punto (Layer 4-3-2-1) la temperatura es dependiente de la temperatura interior de la celda y desde ese punto (Layer 5-6-7-8) la temperatura depende de la temperatura ambiental por lo que la temperatura de la cámara de aire depende exclusivamente de las condiciones ambientales.

5.1.6 Medida de la humedad relativa en las diferentes capas

La medida de la humedad relativa de las diferentes capas se realizó mediante seis sensores, uno por capa en la muestra de ensayo, y dos en la cámara de aire ventilada. El objetivo es comprobar que no existen condensaciones en el interior de la muestra.

En la Tabla 3.12 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de humedad relativa, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 12. Código, descripción y precisión de la humedad relativa

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 1	1RHT01	Humedad interior celda. Ref. 4036	$\pm 3 \%$
Layer 3	1RHT02	Humedad interior cámara de aire Ref.1013	$\pm 3 \%$
Layer 4	1RHT03	Humedad caravista exterior centro. Ref. 1033	$\pm 3 \%$
Layer 6	1RHT04	Humedad cámara de aire ventilada centro 1 Ref. 1026	$\pm 3 \%$
	1RHT05	Humedad cámara de aire ventilada centro 2. Ref. 1032	$\pm 3 \%$
Layer 8	1RHT06	Humedad fachada exterior. Ref. 1012	$\pm 3 \%$
EM	0RHE01	Humedad estación meteorológica VAISALA	$\pm 3 \%$

El interés de la monitorización de la humedad relativa, en diferentes capas internas de la muestra, es el verificar que no existen condensaciones en el interior de esta. La condensación puede cambiar significativamente las propiedades de transferencia de calor de los materiales en la fachada. Por otro lado, la presencia de humedad aumenta el riesgo de crecimiento de moho en el interior de la fachada, lo que es uno de los aspectos que afectan negativamente a la salud, por lo que es conveniente que puedan ser identificados durante las mediciones.

En la Fig. 3.61 se observa la evolución de la humedad relativa durante uno de los periodos de prueba PRBS realizado.

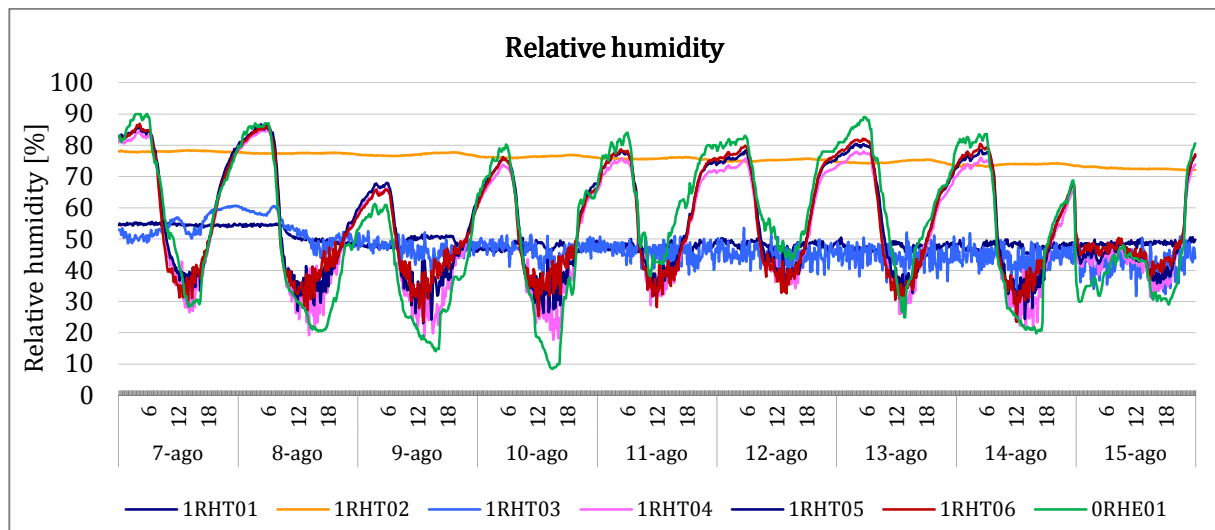


Fig. 3. 61. Evolución de la humedad relativa en las diferentes capas de la muestra

En la anterior gráfica se observa que el valor de la humedad relativa (48% HR) dentro de la habitación de ensayo tiene una variación muy pequeña ($\pm 3 \%$) debido a los materiales higroscópicos que componen la superficie interna de la sala de ensayo.

El porcentaje de humedad de la cámara de aire no ventilada en el muro base se ha reducido del 80 % has el 70 % a lo largo del periodo muestreado.

Por otro lado, se observa como la reducción del porcentaje de humedad en las capas exteriores es instantánea en el momento en el que la radiación solar incide la sobre la fachada, alcanzando mínimos del 30 % en las horas centrales del día (12 h GMT). Las lecturas correspondientes a la humedad relativa exterior están dentro del rango de las variaciones normales de Vitoria-Gasteiz.

5.2 Instrumentación de la fachada vegetal

La utilización del siguiente conjunto de sensores de temperatura de superficie, de temperatura de aire, de flujo de calor y de humedad relativa en las diferentes capas de la muestra instalada, se ha instalado para estudiar el comportamiento térmico de la fachada vegetal. Es decir, con el fin de conseguir, la caracterización del comportamiento térmico de la muestra (trasmitancia térmica y capacidad térmica) y posterior validación del modelo numérico desarrollado.

El esquema de la fachada vegetada así como la descripción de sus capas se muestra en la Fig. 3.62. Los códigos de los sensores utilizados se observan en la Tabla 3.13. y la distribución y detalle de su colocación se puede ver en la Fig. 3.62.

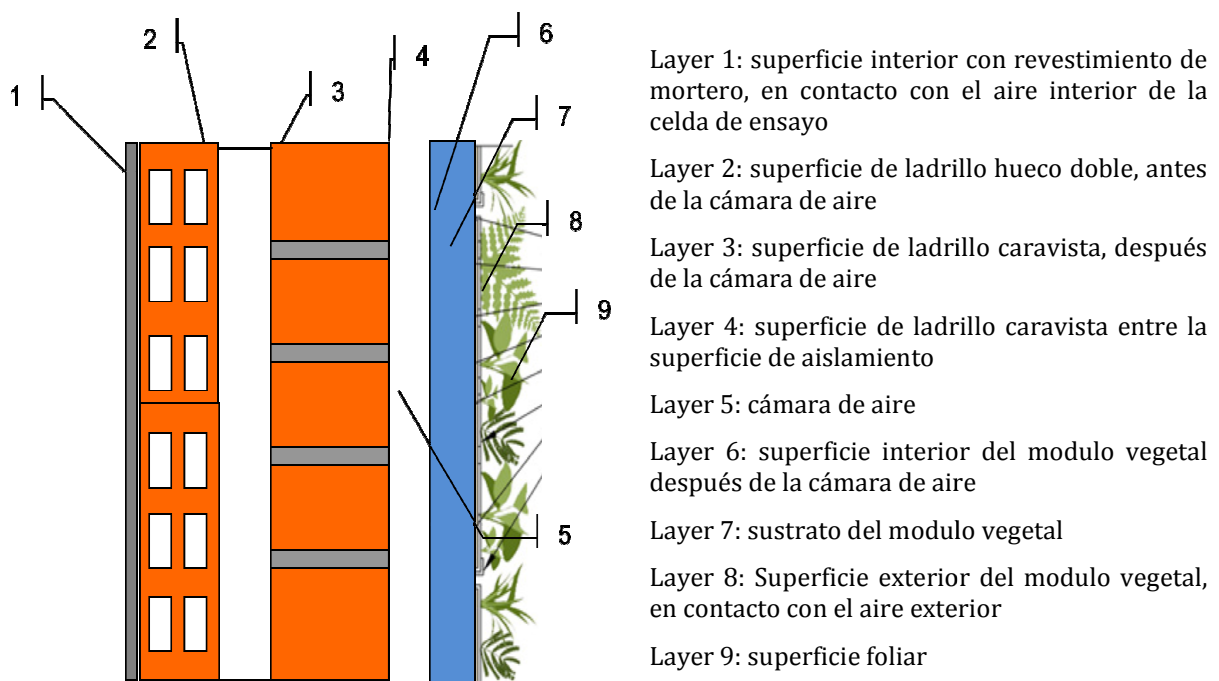






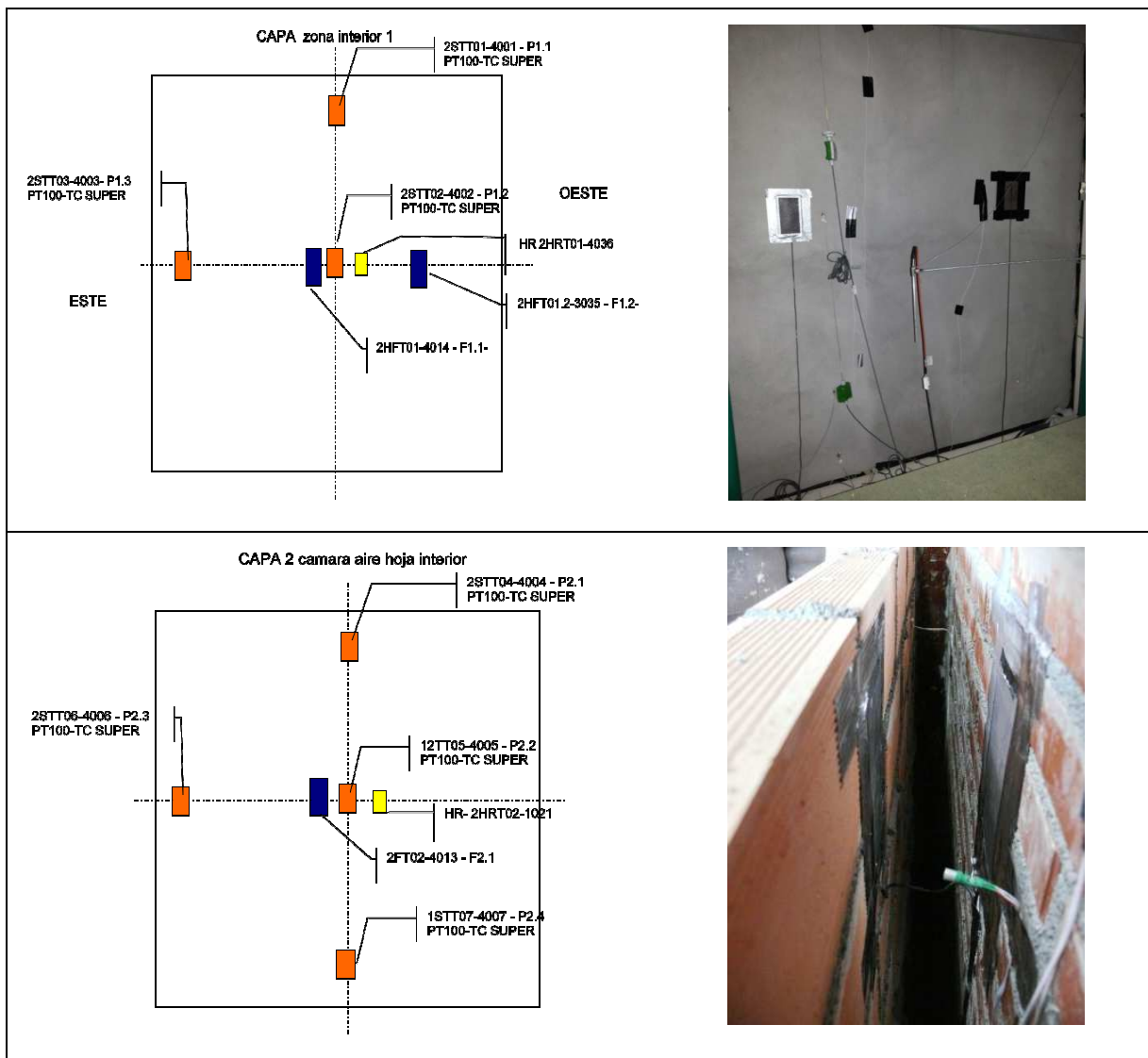
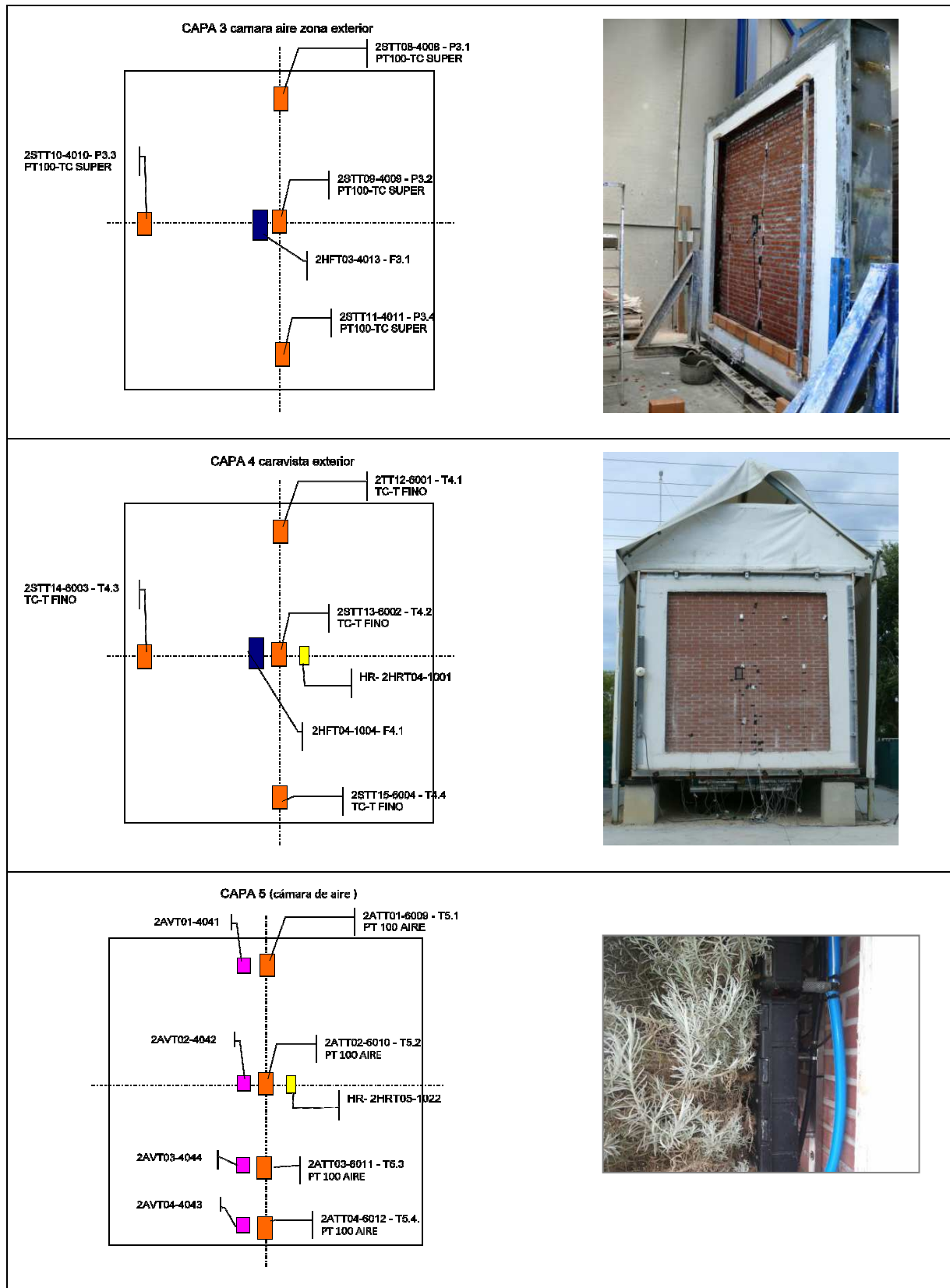


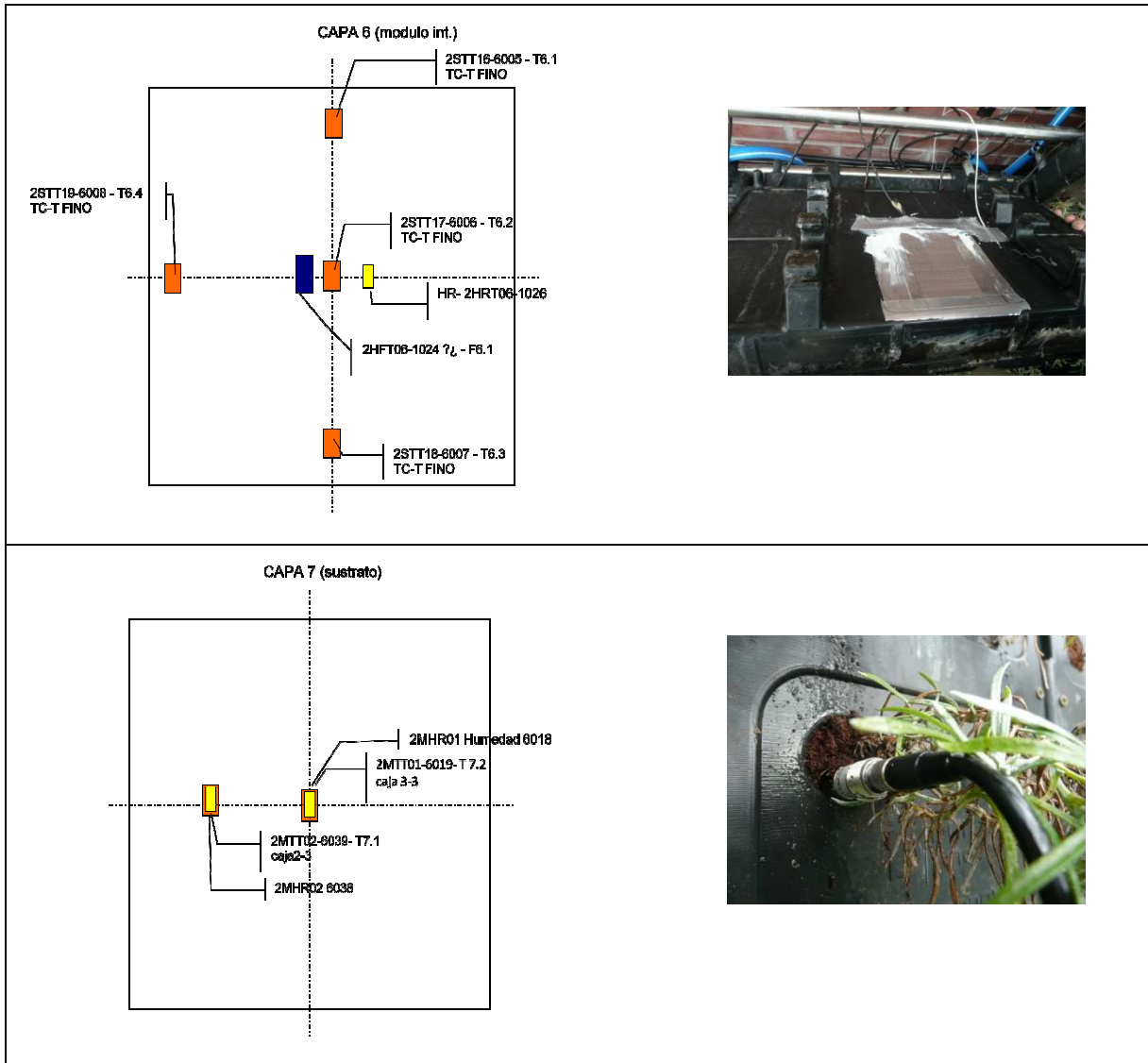
Fig. 3. 62. Esquema de la composición de la fachada vegetal estudiada. Cada una de las capas esta numerada e identificada

Tabla 3. 13. Código de los sensores utilizados

Sensor de temperatura PT100 (Platinum thermoresistance)		Sensor de humedad relativa	
Sensor de flujo		Sensor velocidad de aire	
Sensor de temperatura y humedad		Sensor de CO ₂	







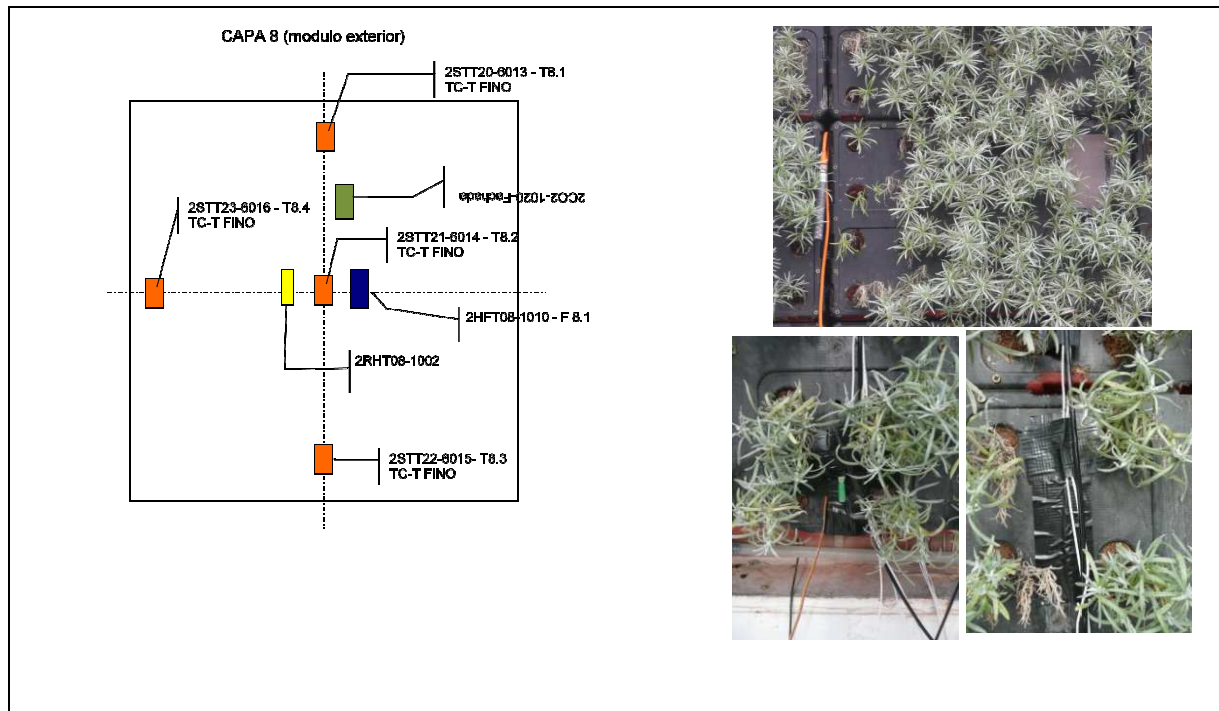


Fig. 3. 63. Descripción de la instrumentación utilizada en las diferentes capas de la fachada vegetal

5.2.1 Medida de temperatura superficial en las diferentes capas

La medida de la temperatura superficial de las diferentes capas se realizó mediante cuatro sensores de temperatura por cada una de las capas de la muestra de ensayo. El objetivo de esta medida de temperatura es registrar el perfil central, a pesar de ello se instalaron tres sensores adicionales por capa con el fin de estudiar si había efectos de borde significativos.

En la Tabla 3.14 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 14. Código, descripción y precisión de los sensores temperatura

	Nombre	Descripción	Precisión
Layer 1	1STT01	PT100 superficie, en zona de interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT02	PT100 superficie, en zona de interior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT03	PT100 superficie, en zona de interior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
Layer 2	1STT04	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT05	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT06	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central	± 0.1

		horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	
	1STT07	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja interior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
Layer 3	1STT08	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT09	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT10	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT11	PT100 superficie, en zona de cámara de aire hoja exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
Layer 4	1STT12	PT100 superficie, caravista exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT13	PT100 superficie, caravista exterior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT14	PT100 superficie, caravista exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT15	PT100 superficie, caravista exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
Layer 6	1STT16	PT100 superficie, modulo interior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT17	PT100 superficie, modulo interior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT18	PT100 superficie, modulo interior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT19	PT100 superficie, modulo interior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
Layer 8	1STT20	PT100 superficie, modulo exterior eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT21	PT100 superficie, modulo exterior centro, TC puntual.	± 0.1
	1STT22	PT100 superficie, modulo exterior eje central vertical inferior a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1
	1STT23	PT100 superficie, modulo exterior eje central horizontal este a 30cm extremo, TC puntual.	± 0.1

En la siguiente imágenes se muestran las medidas de temperatura superficial de la diferentes capas que conforman la fachada vegetal desde la capa nº 1 hasta la capa nº 8 durante una secuencia PRBS realizada en enero de 2014 en la célula de ensayo ILARGI, así como la temperatura media de superficie dentro de la célula y la temperatura ventilada exterior.

5.2.1.1 Señales de la evolución de la Temperatura media superficial interior y exterior de la fachada vegetal.

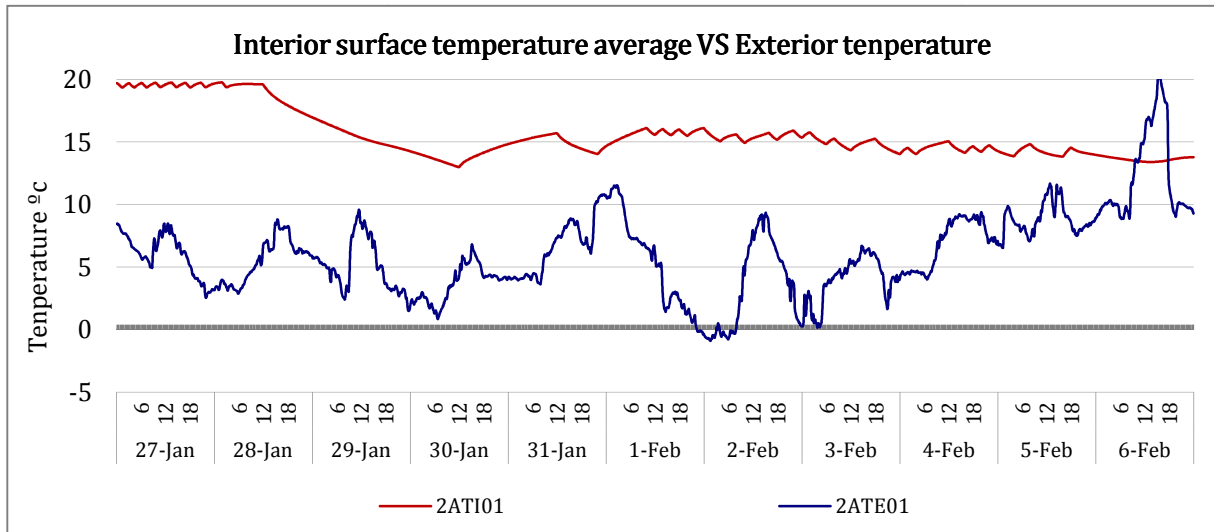
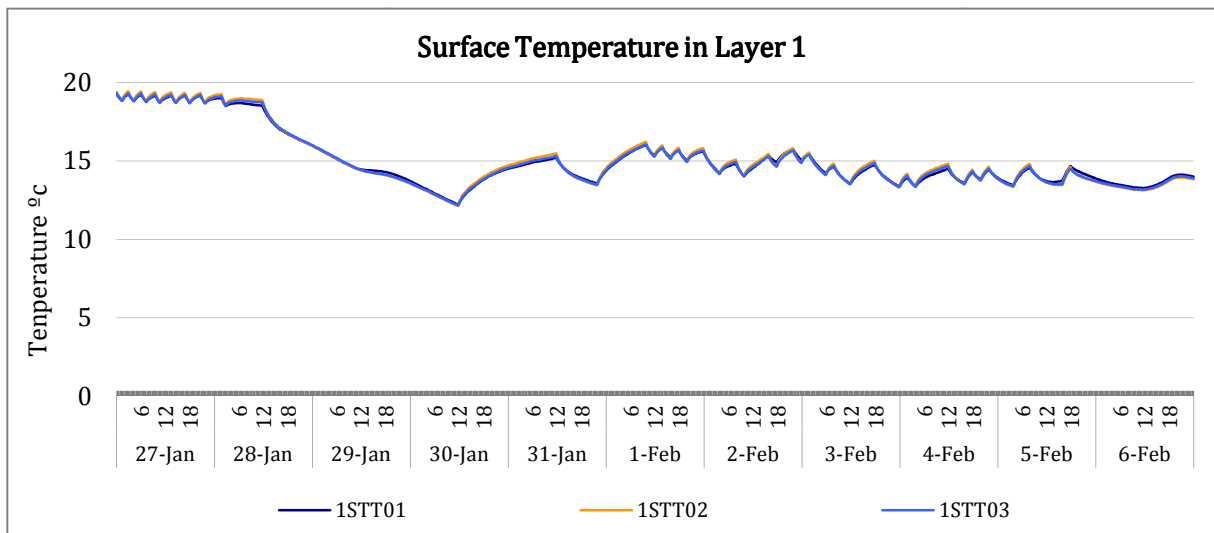


Fig. 3. 64. Temperatura media superficial interior de la célula de ensayo y la temperatura exterior ventilada durante la serie temporal de PRBS

5.2.1.2 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 1 (superficie interior con revestimiento de mortero) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.



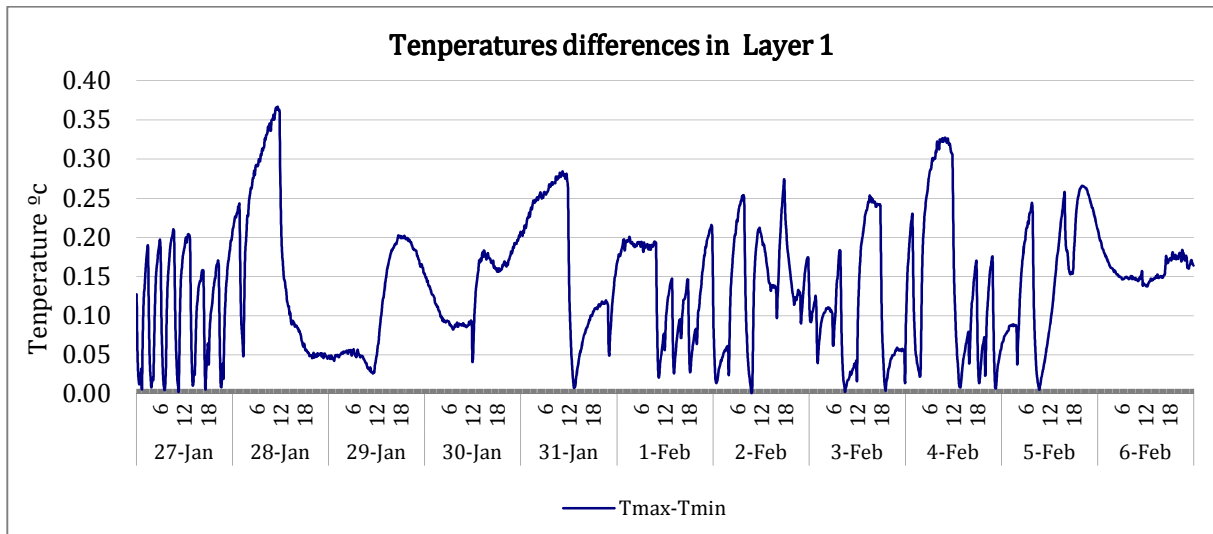


Fig. 3. 65. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o1 (interior) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 1 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig.3.65 Usando el promedio de los tres sensores se obtiene un error inferior a ± 0.5 °C a lo largo de toda la serie. En los próximos capítulos, cuando se utilice este valor en los modelos matemáticos se debe tener en cuenta que se va a utilizar el valor de la temperatura media de los diferentes sensores por lo que el error que se estará cometiendo será la mitad, en este caso del orden de ± 0.25 °C. Lo mismo ocurrirá con el resto de capas y de sensores.

5.2.1.3 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 2 (superficie de ladrillo hueco doble, antes de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

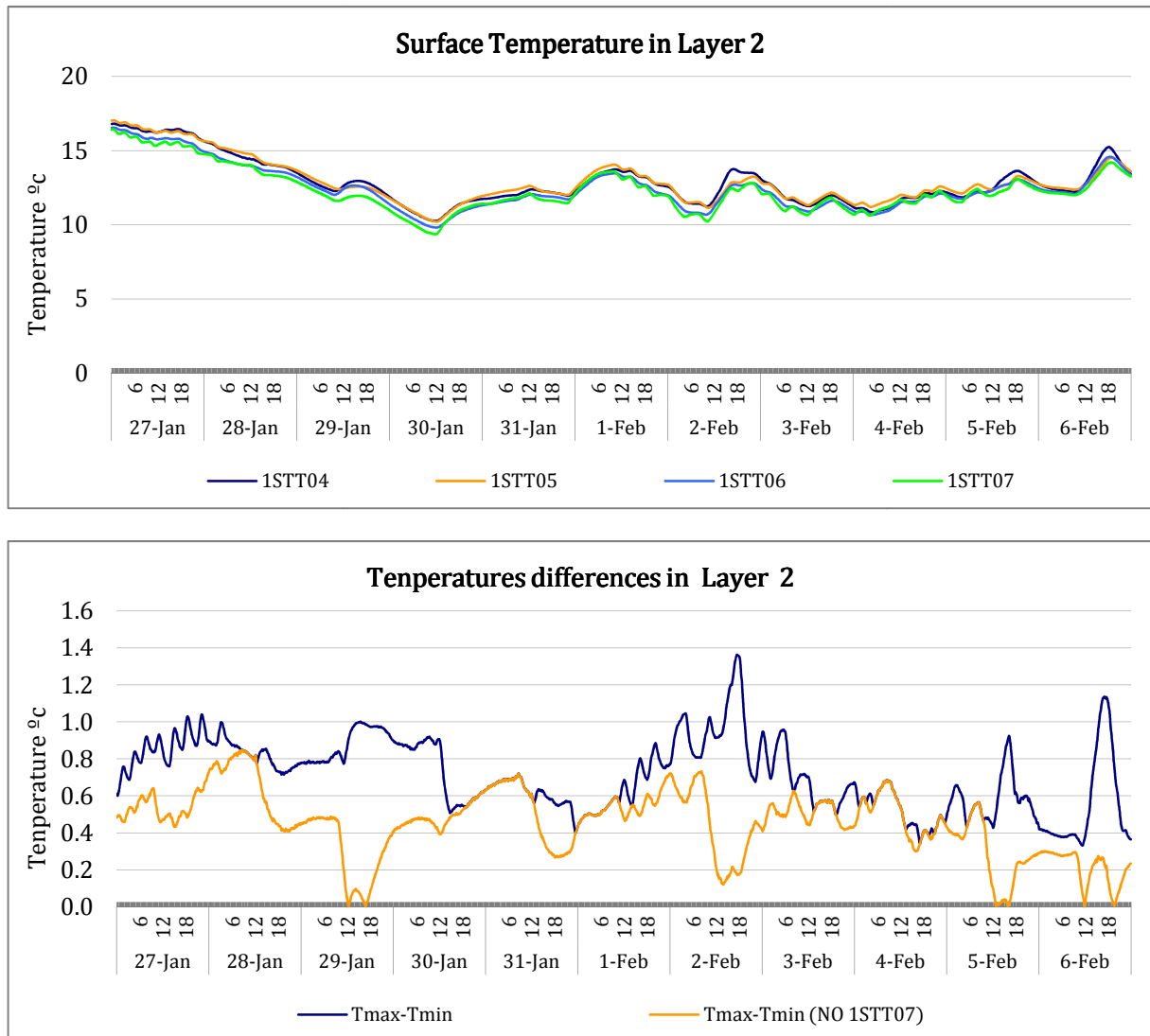


Fig. 3. 66. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o2 (CA interior) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 2 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.66. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error superior ± 0.7 °C para toda la prueba. Retirando la medida del sensor 1STT7 se consigue reducir el error de la temperatura por debajo de ± 0.5 °C.

5.2.1.4 *Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 3 (superficie de ladrillo caravista, después de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.*

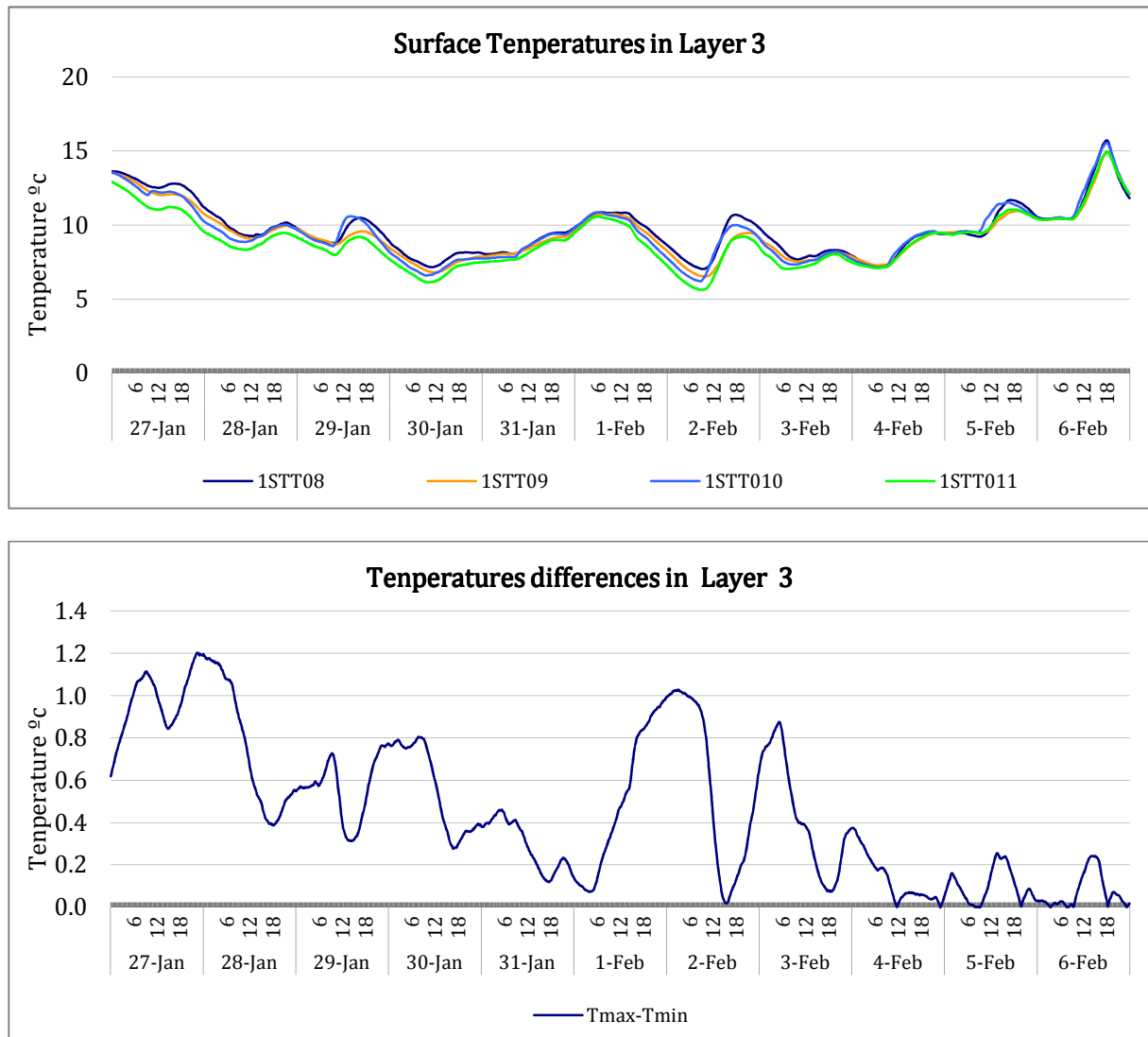


Fig. 3. 67. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o3 (CA exterior) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 3 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.67. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error de ± 0.5 °C.

5.2.1.5 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 4 (superficie de ladrillo caravista entre la superficie de aislamiento) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

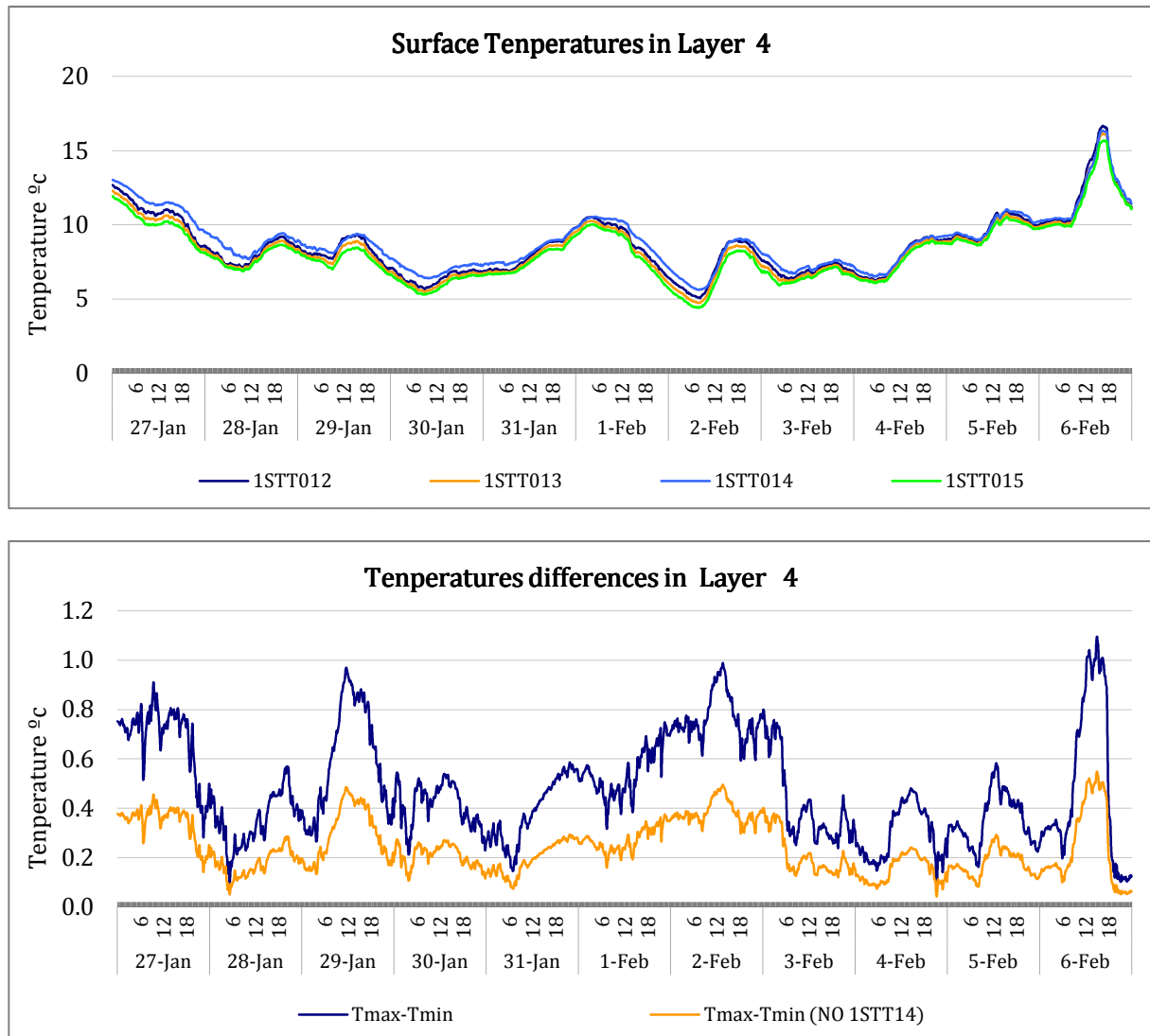


Fig. 3. 68. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n⁴ (caravista) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 4 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.68. Usando el promedio de los cuatro sensores se obtiene un error medio superior a ± 0.5 °C. Eliminando uno de los sensores el 1STT14 se consigue reducir el error por debajo de ± 0.4 °C.

5.2.1.6 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 6 (superficie interior del modulo vegetal después de la cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

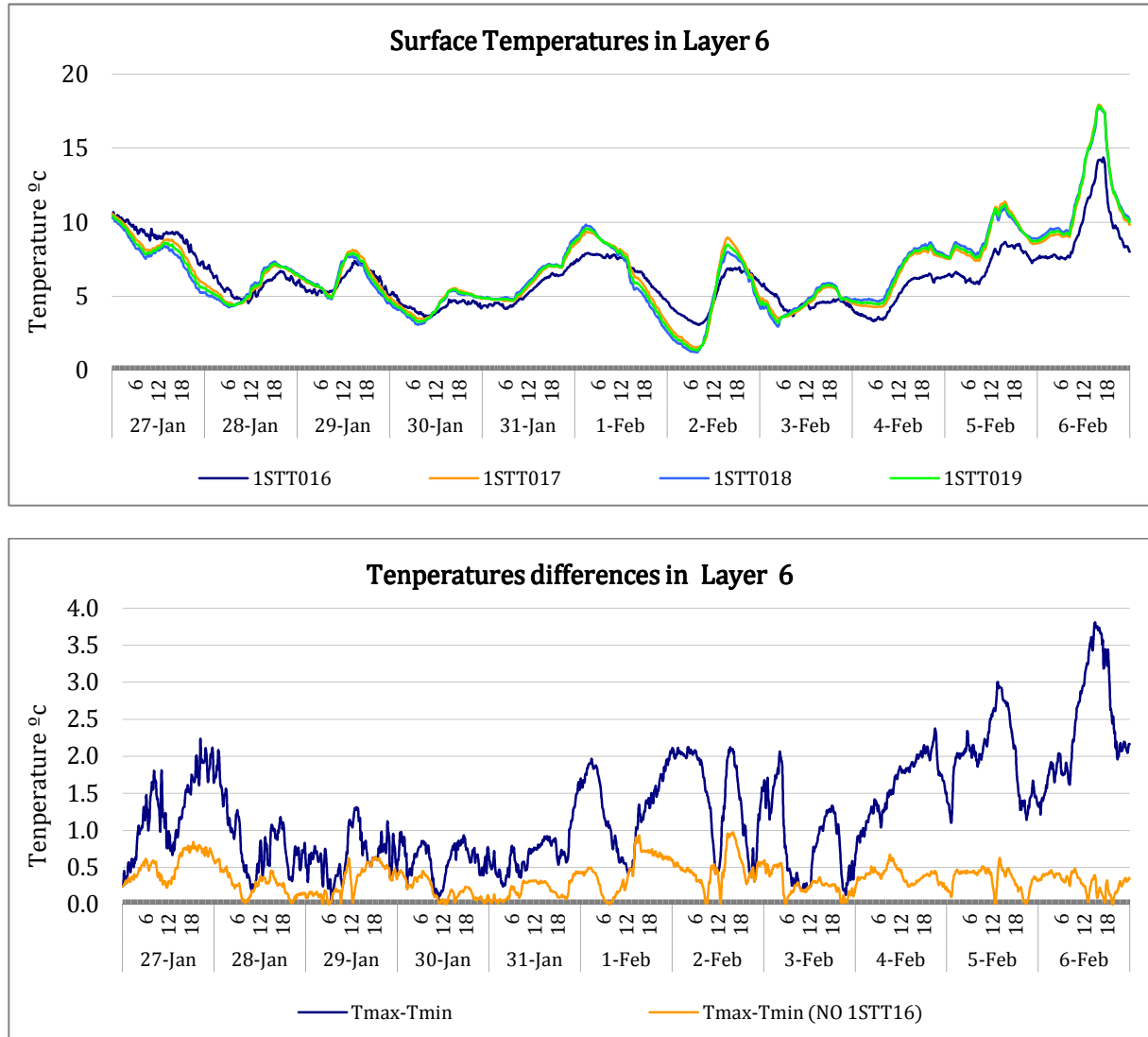


Fig. 3. 69. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº6 (modulo interior) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 6 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.69. En la gráfica se puede observar la correlación de la temperatura exterior con la variación de las temperaturas en función del ciclo diario (día-noche).

5.2.1.7 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 8 (Superficie exterior del modulo vegetal, en contacto con el aire exterior) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

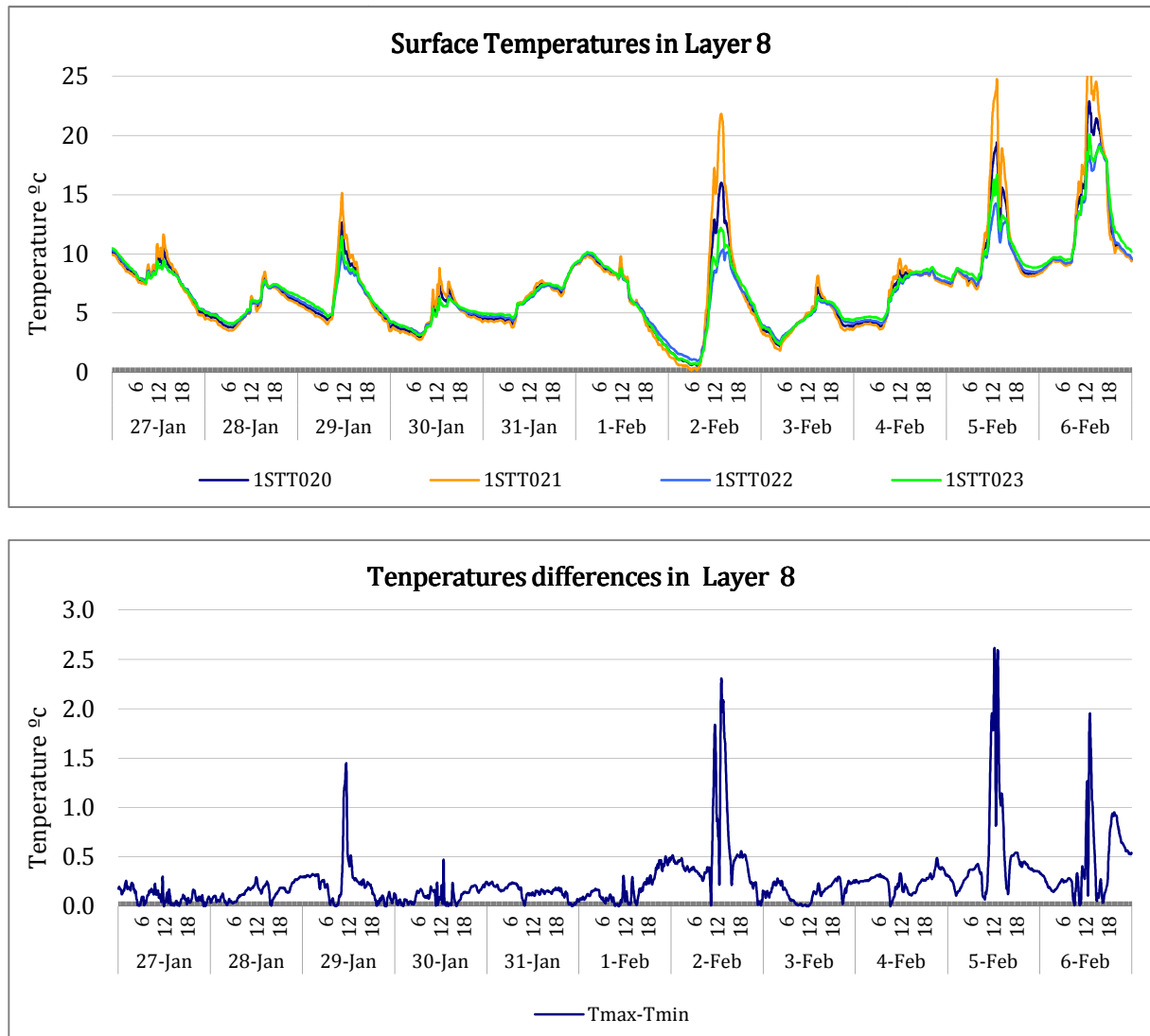


Fig. 3. 70. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o8 (modulo exterior) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas. (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 8 durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.70. En la gráfica se puede observar la incidencia de la radiación directa sobre la cara exterior de los módulos. En concreto se observa como el sensor 1STT21 que no están tan protegido por la vegetación aumentan su temperatura hasta 2.5 °C más que los sensores que se encuentra totalmente protegidos.

5.2.2 Medida de temperatura y velocidad en la cámara de aire

La medida de la temperatura y velocidad en la cámara de aire se realizó mediante cuatro sensores de temperatura de aire. El objetivo de estas medidas es registrar el perfil de la cámara de aire con el fin de estudiar su calentamiento, movimiento y consiguiente funcionamiento.

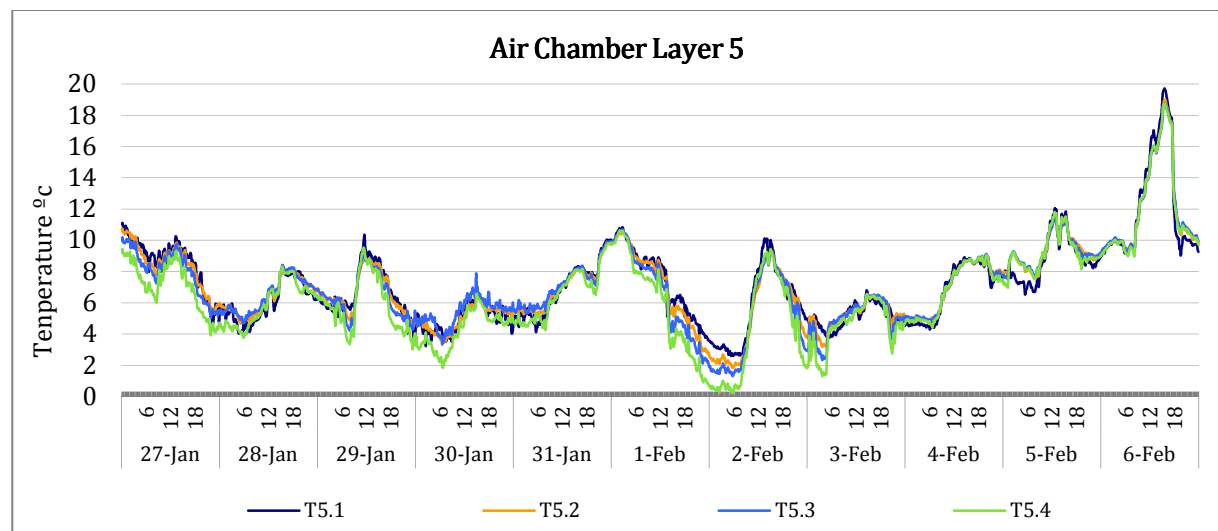
En la Tabla 3.15 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura y velocidad, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 15. Código, descripción y precisión de los sensores de temperatura en la cámara de aire

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 5	1ATT01	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (5 cm de rejilla superior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1
	1ATT02	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (135 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1
	1ATT03	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (30 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1
	1ATT04	Pt100 Temperatura aire cámara. Eje central vertical (5 cm de rejilla inferior). Profundidad medio 2 cm.	± 0.1

5.2.2.1 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa (cámara de aire) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

Los resultados de las mediciones de la temperatura del aire de la cámara de aire, entre la pared caravista y los módulos vegetales, durante una secuencia PRBS se muestran en la Fig. 3.71.



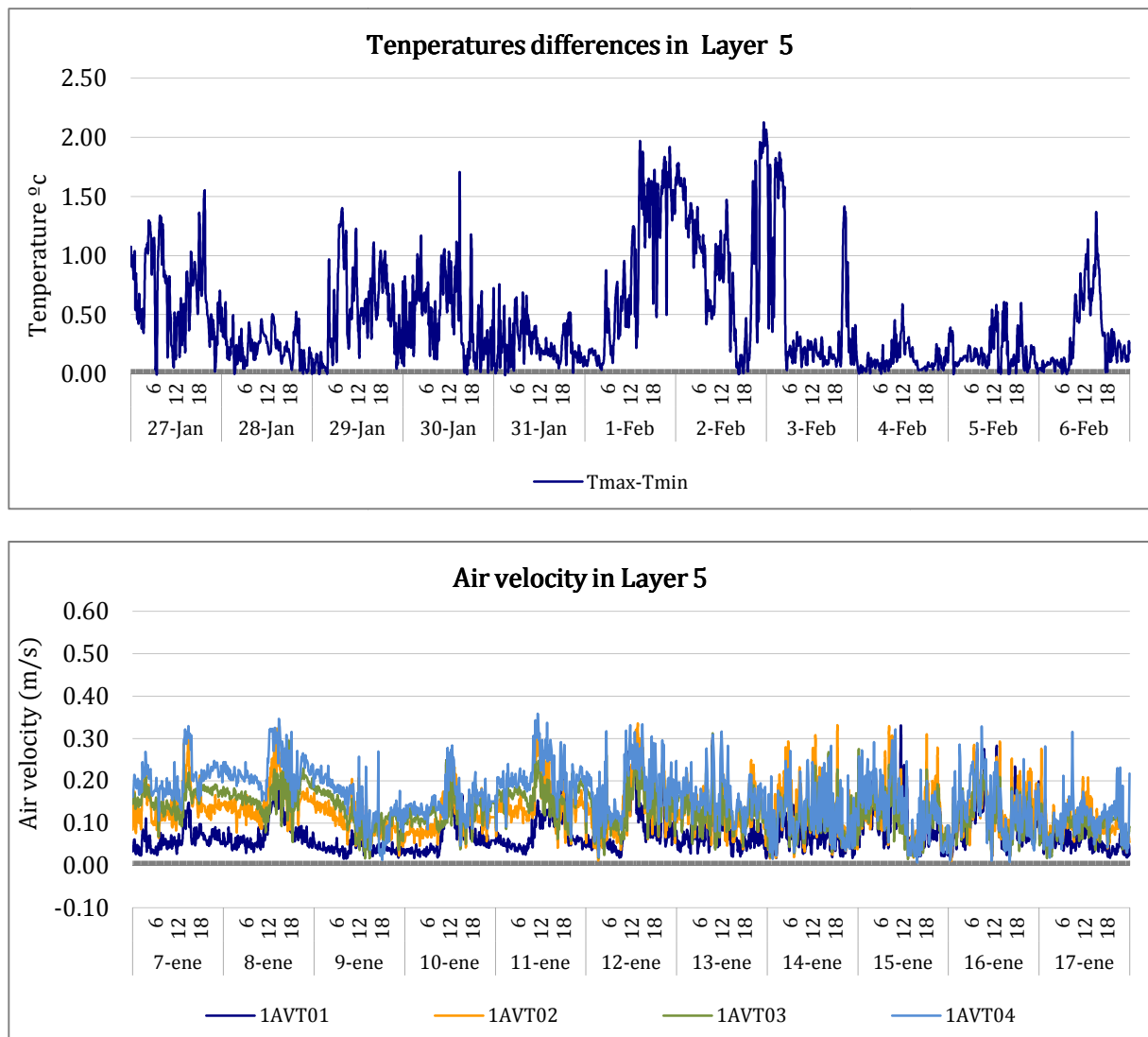


Fig. 3. 71. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o5 (cámara de aire) durante una secuencia PRBS. Medio: diferencias entre las temperatura máxima y mínima. Abajo: velocidad del aire en la cámara (Enero de 2014)

En la gráfica anterior se puede observar la correlación de la temperatura interior de la cámara con la variación de las temperaturas diarias (día-noche) Alcanzando temperaturas máximas de 20 °C al mediodía y mínimas nocturnas de 0 °C.

En la primera gráfica se puede ver de la evolución de las temperaturas dentro de la cámara de aire a diferentes alturas, cabe señalar que no se observa gradiente ni estratificación de las temperaturas por lo que entre el modulo vegetal y la fachada no se produce el efecto chimenea. En la segunda gráfica queda demostrado que solo hay una diferencia de 2 °C entre la temperatura máxima y mínima entre los diferentes sensores. Al comparar este valor con una fachada ventilada clásica, como es el caso de la fachada

ventilada previamente caracterizada (Fig. 3. 55) se observa que existe estratificación dentro de la cámara de aire con un gradiente de temperaturas de de 7 °C.

En la gráfica de velocidades de aire de la cámara se puede apreciar que la velocidad es muy baja (0.1-0.2 m/s), por lo que queda caracterizado que la velocidad del aire exterior no afecta a la cámara de aire debido a que el laberinto que forma el follaje de las plantas no lo deja pasar.

5.2.3 Medida de la temperatura del sustrato

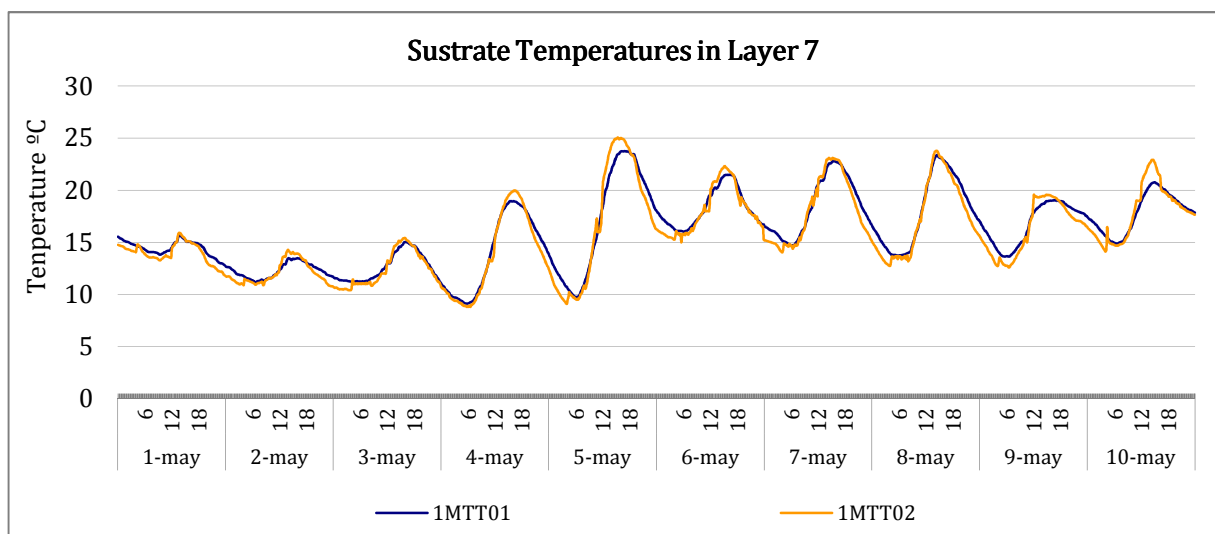
La medida de la temperatura y humedad del sustrato se realizó mediante dos sensores de temperatura. El objetivo de estas medidas es registrar el comportamiento térmico del sustrato.

En la Tabla 3.16 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura, la posición dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 16. Código, descripción y precisión de los sensores de temperatura del sustrato

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 7	1MTT01	HMP60 Temperatura sustrato. Eje central vertical centro Profundidad 2 cm.	± 0.6°C
	1MTT02	HMP60 Temperatura sustrato. eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual .Profundidad 2 cm.	± 0.6°C

5.2.3.1 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa 7 (sustrato del modulo vegetal) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.



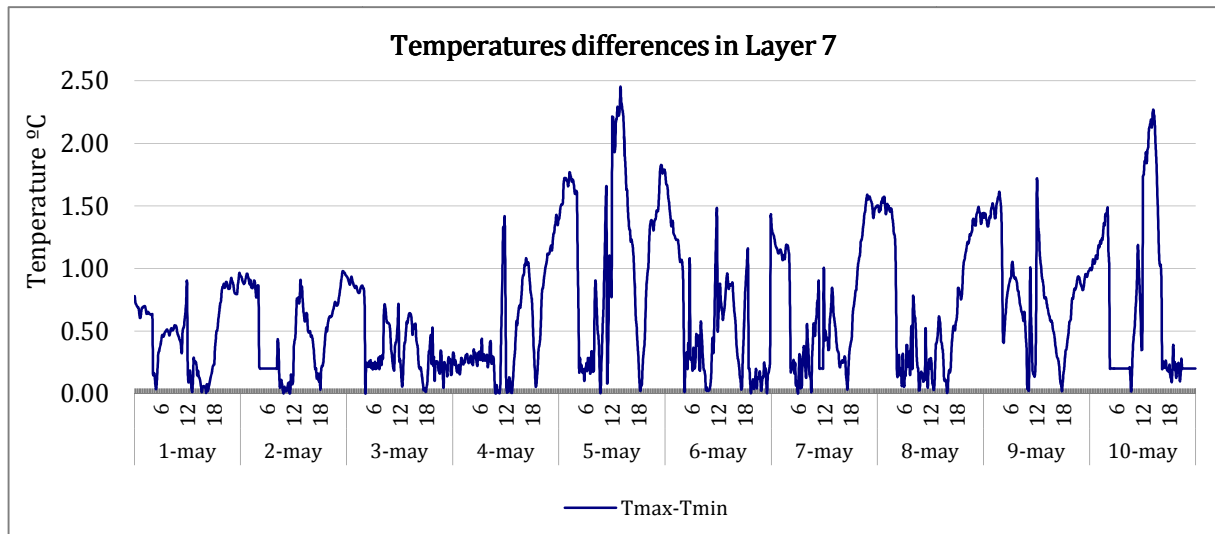


Fig. 3. 72. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa nº7 (sustrato) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Mayo de 2014)

Los resultados de las mediciones de la temperatura de la capa 7 durante una secuencia PRBS se muestran en la anterior Fig. 3.72. En la gráfica se puede observar la incidencia de la radiación directa sobre la temperatura del sustrato los módulos vegetales. En concreto se observa como el sensor 1STT21 que no están tan protegido por la vegetación aumentan su temperatura hasta 2,5 °C más que los sensores que se encuentra totalmente protegidos.

Los sensores de temperatura y humedad de sustrato estuvieron fuera de uso durante el mes de enero por lo que se han graficado los resultados de mayo.

5.2.4 Medida de la temperatura en la superficie foliar

La medida de la temperatura de la superficie foliar se realizó mediante dos sensores de temperatura. El objetivo de estas medidas es registrar la temperatura en el interior de la parte vegetal de la muestra con el fin de estudiar su calentamiento y diferencias con el exterior e interior del modulo vegetal, y así registrar el comportamiento térmico de la vegetación.

En la Tabla 3.17 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de temperatura, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 17. Código, descripción y precisión de la temperatura foliar

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 9	1FT01	Pt100 Temperatura foliar. Eje central vertical centro, TC puntual.	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
	1FT02	Pt100 Temperatura foliar. Eje central vertical a 30cm extremo, TC puntual.	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$

5.2.4.1 Señales de la evolución de la Temperatura media de la capa (superficie foliar) y diferencia de temperatura entre la máxima y mínima registradas.

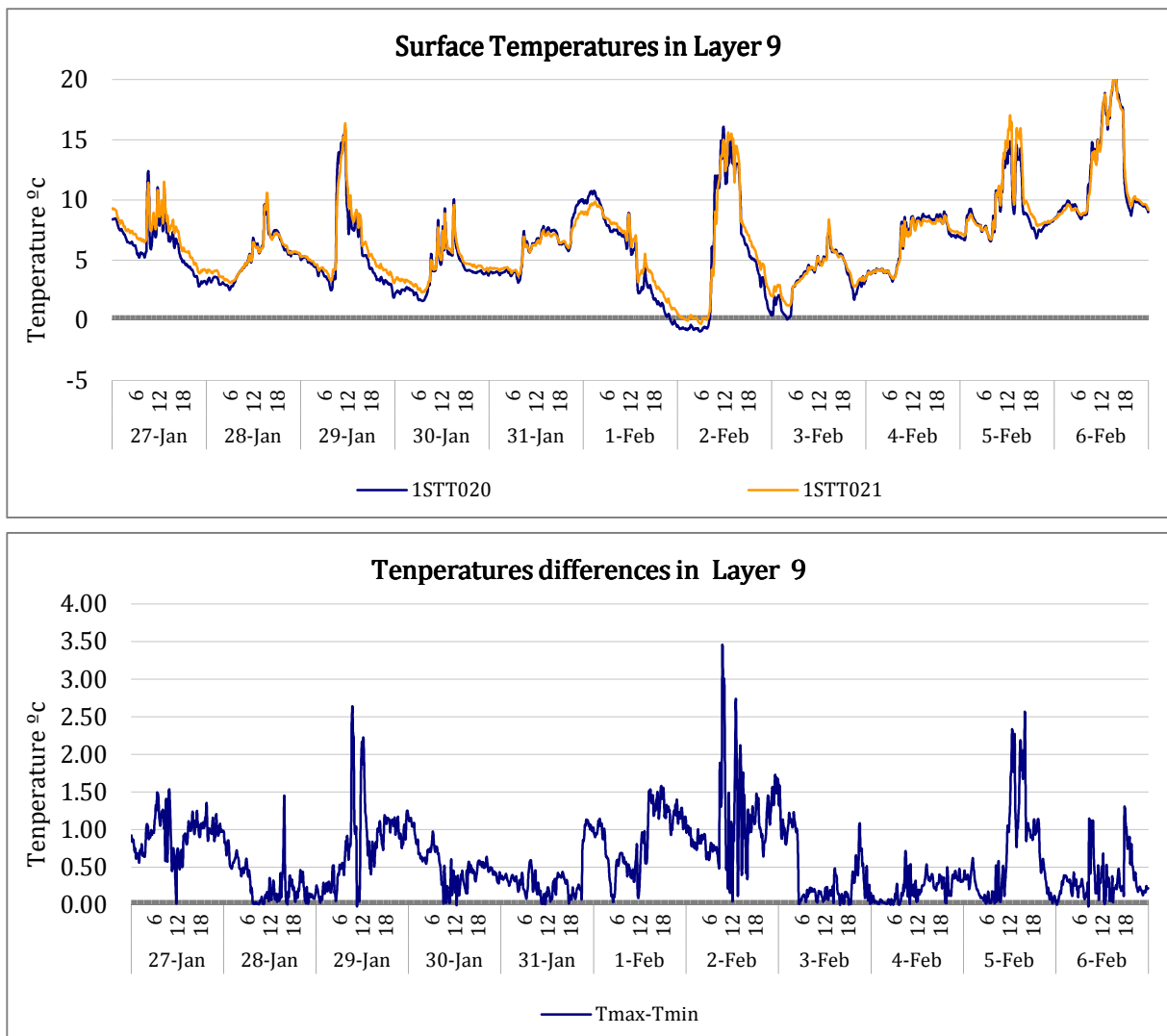


Fig. 3. 73. Arriba: evolución de los sensores de temperatura de superficie situados en la capa n^o9 (foliar) durante una secuencia PRBS. Abajo: diferencias entre las de temperatura máxima y mínimas (Enero de 2014)

5.2.5 Resumen de las temperatura de las diferentes capas

A continuación se recoge la medida de la temperatura de las diferentes capas de la muestra de ensayo. El objetivo es representar de forma conjunta todos los perfiles de temperatura a lo largo del periodo de ensayo para poder obtener analizarlos de forma conjunta.

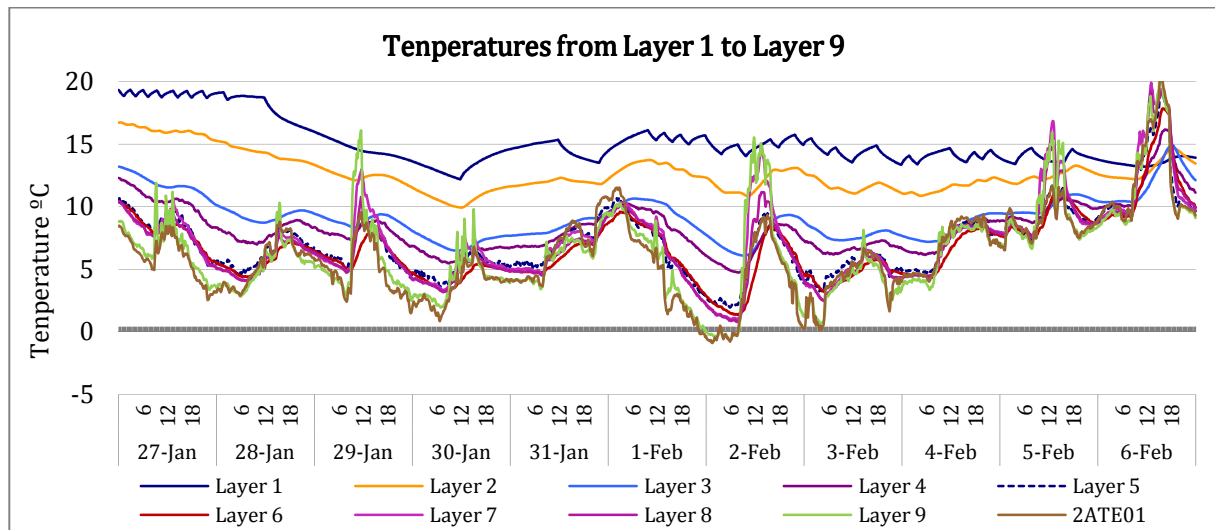


Fig. 3. 74. Temperatura media de las diferentes capas de la fachada vegetal (Enero de 2014)

En la gráfica 3.74 se puede observar de forma conjunta la evolución de la temperatura durante un PRBS en las diferentes capas que componen la fachada vegetal.

5.2.6 Medida del flujo de calor en las diferentes capas

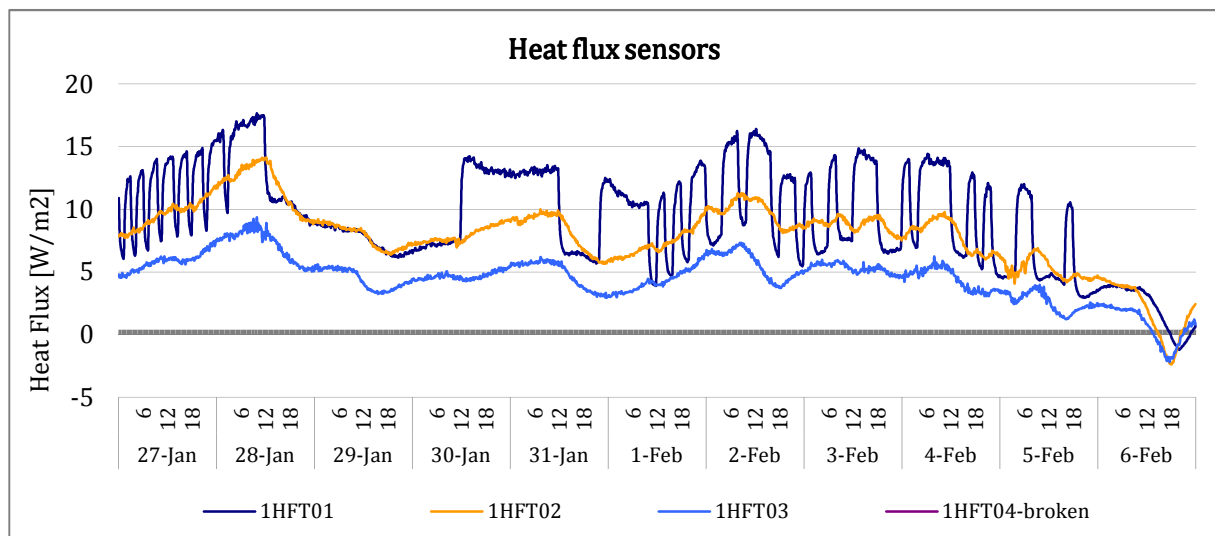
La medida del flujo de calor de las diferentes capas se realizó mediante seis fluxómetros, uno por cada capa que compone la muestra de ensayo, con el objetivo de medir el flujo térmico que atraviesa la muestra. Los valores de flujo positivos representan el flujo entrante y los valores de flujo negativos, el flujo que se dirige hacia el exterior del módulo.

En la Tabla 3.18 se muestra la nomenclatura utilizada en los fluxómetros, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 18. Código, descripción y precisión de los Fluxómetros

Nombre		Descripción	Precisión
Layer 1	1HFT01	Fluxómetro, en zona interior eje central. Ref.: 11574	$\pm 0.5 \%$
Layer 2	1HFT02	Fluxómetro, en zona cámara de aire hoja interior central. Ref.: 7509	$\pm 0.5 \%$
Layer 3	1HFT03	Fluxómetro, en zona cámara de aire hoja exterior central. Ref.: 11569	$\pm 0.5 \%$
Layer 4	1HFT04	Fluxómetro, caravista exterior centro Ref.: 11570	$\pm 0.5 \%$
Layer 6	1HFT06	Fluxómetro, modulo interior centro Ref.: 11571	$\pm 0.5 \%$
Layer 8	1HFT08	Fluxómetro, modulo exterior centro Ref.: 7525	$\pm 0.5 \%$

5.2.6.1 Señales de la evolución de los sensores de flujo de calor situados en las diferentes capas de la fachada vegetal.



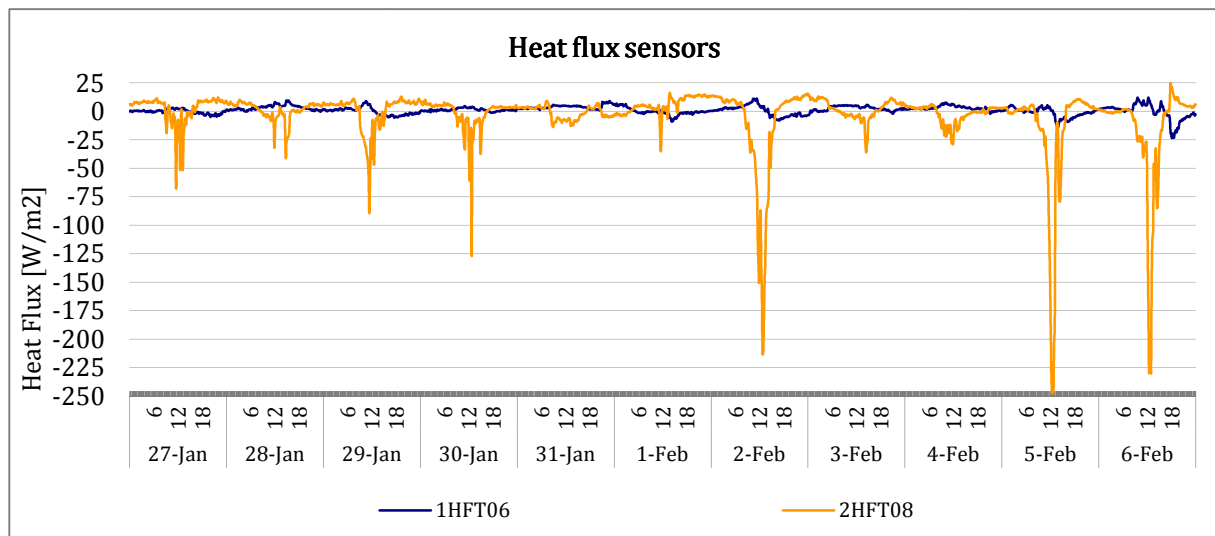


Fig. 3. 75. Arriba: evolución de los sensores de flujo de calor situados en las capas de la uno a la cuatro durante una secuencia PRBS. Abajo: Flujo de calor de los sensores situado en las capas de la seis a la ocho (Enero de 2014)

Los resultados de las mediciones de los flujos de calor en la fachada vegetal (ver Fig. 3. 75) muestran como la capa externa formada por vegetación es capaz de absorber el 75 % de la radiación solar incidente. El modulo vegetal formado relleno de sustrato y fertirrigado es capaz de retener el resto del flujo de calor incidente solar por lo que son capaces de estabilizar las temperaturas y los flujos de calor evitando que pasen al resto de capas.

5.2.7 Medida de la humedad relativa en las diferentes capas

La medida de la humedad relativa de las diferentes capas se realizó mediante seis sensores, uno por capa en la muestra de ensayo. El objetivo es identificar que no existen condensaciones en el interior de la muestra.

El interés de la monitorización de la humedad relativa, en diferentes capas internas de la muestra, es comprobar que no existen condensaciones en el interior de esta. La condensación puede cambiar significativamente las propiedades de transferencia de calor de los materiales en la fachada. Por otro lado, la presencia de humedad aumenta el riesgo de crecimiento de moho en el interior de la fachada, lo que es uno de los aspectos que afectan negativamente a la salud, por lo que es conveniente que puedan ser identificados durante las mediciones.

En la Tabla 3.19 se muestra la nomenclatura utilizada en los sensores de humedad relativa, la posición de ubicación dentro de la muestra y su precisión.

Tabla 3. 19. Código, descripción y precisión de la humedad relativa

Nombre	Descripción	Precisión	
EM	0RHT01	Humedad estación meteorológica VAISALA	± 3 %
Layer 1	1RHT01	Humedad interior celda	± 3 %
Layer 2	1RHT02	Humedad interior cámara de aire	± 3 %
Layer 4	1RHT04	Humedad caravista exterior centro	± 3 %
Layer 5	1RHT05	Humedad cámara de aire ventilada	± 3 %
Layer 7	1MHR01	HMP60 Humedad sustrato. Eje central vertical centro Profundidad 2 cm.	± 3 %
	1MHR02	HMP60 Humedad sustrato. eje central vertical superior a 30cm extremo, TC puntual .Profundidad 2 cm.	± 3 %
Layer 8	1RHT08	Humedad fachada exterior. Exterior modulo vegetal	± 3 %

5.2.7.1 Señales de la evolución de los sensores de humedad relativa situados en las diferentes capas de la fachada vegetal.

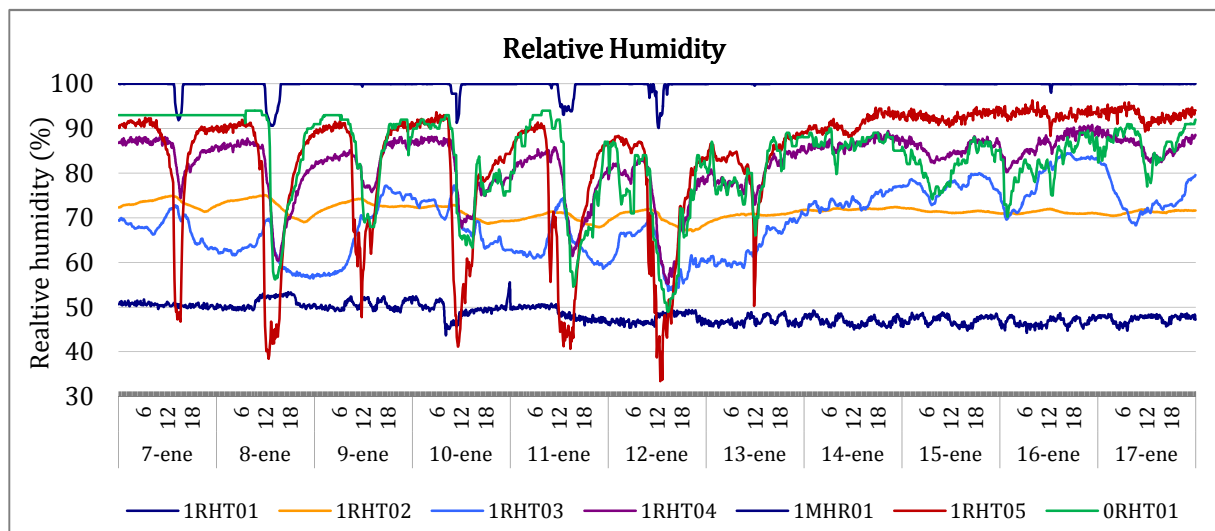


Fig. 3. 76. Evolución de la humedad relativa en las diferentes capas de la muestra vegetal

En la Fig. 3.76 se observa la evolución de la humedad relativa durante uno de los periodos de prueba PRBS realizados. La humedad relativa (50 % HR) dentro de la habitación de ensayo tiene variación muy pequeña (± 3 %) debido a los materiales higroscópicos que componen la superficie interna de la sala de ensayo. El porcentaje de la cámara interior del muro base se mantiene constante alrededor del 70 %.

En la gráfica anterior se observa como la reducción del porcentaje de humedad en las capas exteriores es instantánea en el momento en el que la radiación solar incide la sobre la fachada, alcanzando mínimos del 40 % en las horas centrales del día (12 h GMT), incluso en la zona foliar.

Las lecturas correspondientes a la humedad relativa exterior están dentro del rango de las variaciones normales de Vitoria-Gasteiz.

6 Conclusiones

Los componentes y la instrumentación, son la base para el planteamiento del problema, la metodología de la simulación y la metodología experimental. Por ello, a lo largo de este tercer capítulo se han detallado minuciosamente las soluciones constructivas empleadas, así como la sensórica de las celdas de ensayo y de las muestras ensayadas.

Las conclusiones de este capítulo hacen referencia a la validez de las muestras de ensayo de fachada utilizada para representar el comportamiento térmico de una fachada ventilada y de una fachada vegetal. Por todo ello, las muestras de ensayo deben estar provistas de sensores que sean capaces de validar la hipótesis de unidimensionalidad. En el cumplimiento de esta hipótesis tiene gran relevancia el diseño experimental y el número de sensores, ubicación y precisión de estos.

A lo largo de este capítulo se describe la calidad y la precisión de cada una de las señales que se utilizarán durante el análisis de los datos para lograr identificar y validar los modelos presentados en el capítulo 5. La precisión obtenida mediante los sensores se considera satisfactoria para el posterior estudio comparativo de fachada ventilada y fachada vegetal. Finalmente, hay que tener en cuenta que los sensores más importantes para esta investigación son los de temperatura y los de flujo de calor, así como los que describen las condiciones climatológicas ocurridas durante los ensayos.

*"La tecnología por sí sola no basta.
También tenemos que poner el corazón."*

Jane Goodall (1934-)



CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL: DESCRIPCIÓN DE LAS MONITORIZACIONES



RESUMEN

Este capítulo tiene por objetivo describir la metodología experimental y las secuencias de ensayos desarrolladas para el análisis posterior del comportamiento térmico de fachadas ventiladas y fachadas vegetales. Para ello, se presenta la descripción de la monitorización llevada a cabo durante 22 meses.

ABSTRACT

This chapter aims to describe an experimental methodology and test sequence for analyzing the thermal performance of ventilated façades and green walls under a holistic approach. An overview of the 22 month monitoring is described.

1 Introducción

A lo largo de este cuarto capítulo se presentan las secuencias de análisis de ensayo que se han aplicado a los componentes constructivos, tanto del muro de hoja doble, de fachada ventilada como de fachada vegetal. Las pruebas se han realizado en el exterior bajo condiciones reales de ensayo, debido a ello, sólo la sala de ensayo interior ha podido ser activada mediante pulsos de calor para generar diferentes secuencias de prueba y analizar así las características térmicas de las muestras.

Los ensayos sobre fachada ventilada y fachada vegetal se han realizado bajo diferentes condiciones de ensayo: de baja frecuencia, alta frecuencia, potencias constantes, temperatura constante y cero frecuencias. Por lo tanto, ha sido posible estudiar el comportamiento de ambas fachadas bajo diferentes escenarios de ensayo.

Las secuencias de prueba citadas anteriormente se describen en detalle en los documentos desarrollados durante los proyectos PASSYS y PASLINK [140-142]. Los valores de temperatura en el interior de la celda de ensayos han sido de 20 °C de media pero han variado en diferentes ensayos desde valores mínimos de 5 °C hasta valores máximos de 45 °C.

De igual forma, se han llevado a cabo secuencias de temperatura y potencia constante en la muestra de fachada vegetal. Estos exámenes permitirán validar los modelos identificados por medio de las secuencias de prueba dinámicas anteriores.

2 Objetivos

Durante el periodo de prueba se han tenido en cuenta y se han analizado diferentes aspectos de las fachadas ventiladas y fachadas vegetales. El objetivo ha sido el de conseguir la respuesta de las muestras a las diferentes secuencias de potencia ensayadas. Por un lado, frente a potencias y temperatura constante y por otro lado, se ha ensayado la respuesta a periodos de prueba con secuencias PRBS y ROLBS en fachada ventilada y fachada vegetal así como en el muro base. Por último, durante el período de verano, una secuencia de bajas temperaturas en el interior de la celda ha sido aplicada a la fachada vegetal. Todo ello, encaminado a conseguir condiciones óptimas para el estudio de las fachadas ventiladas y vegetales así como para comprobar la bondad de la instrumentación y la validez de los modelos.

A lo largo del capítulo, se detallan las diferentes secuencias llevadas a cabo, tanto en el muro base como en la fachada ventilada como en la vegetal. Los periodos no descritos en las siguientes secuencias, corresponden a momentos en el que las células de ensayo se encuentran libres es decir, sin pulsos de calor. La señal de entrada de calor en esos momentos corresponde únicamente al ventilador funcionando dentro de la sala de ensayo, para evitar la estratificación del aire en su interior. El ventilador se utiliza para estabilizar las condiciones de la sala de ensayo entre las diferentes secuencias de prueba. Durante estos periodos no hay diferencia de temperaturas entre el interior y exterior de la celda de ensayo, por lo que las señales presentan demasiado ruido y por lo tanto estos períodos de estabilización no son buenos para la identificación de los parámetros ni para su posterior validación.

3 Descripción de las monitorizaciones

3.1 Etapas de monitorización

La recolección de los datos se ha desarrollado en tres fases diferentes. La primera de ellas comprende la construcción y posterior monitorización del muro base, esta fase se realizó entre el 21 de junio al 15 de julio de 2012, durante este tiempo se realizó un ensayo de PRBS y otro ROLBS. Durante la segunda fase de ensayo se realizó el montaje de la fachada ventilada sobre el muro base y su posterior monitorización. Este periodo está comprendido entre el 01 al 31 de agosto de 2012, durante este tiempo se llevaron a cabo dos secuencias de PRBS y una de ROLBS.

Por último, la tercera fase consistente en el ensayo de la fachada vegetal, esta fase está dividida en tres etapas diferentes. El primer periodo corresponde al desmontaje de la fachada vegetal y posterior montaje de la fachada vegetal y posterior registro de datos en la célula de ensayo EGUZKI durante 4 meses (Diciembre 2012-Marzo 2013). Durante esta etapa se realizó un ensayo PRBS y un periodo de muestreo a temperatura constante de 20 °C. La segunda etapa, ya en la célula ILARGI corresponde a un periodo de ensayo de tres meses (Agosto 2013-Noviembre 2013) donde se llevaron a cabo tres secuencias de PRBS. Finalmente, la tercera etapa de doce meses (Enero 2014-Diciembre 2014) también en la célula ILARGI, consistió en el ensayo de cuatro secuencias de PRBS, dos secuencias a potencia constante, cuatro secuencias a temperatura constante y una a bajas temperaturas.

Entre la primera y segunda fase las células Paslink, tanto EGUZKI como ILARGI, fueron utilizadas para el análisis de otras soluciones constructivas por lo que la fachada vegetal se retiró y posicionó sobre el edificio del LCCE (Marzo-Junio 2013). Entre la segunda y tercera fase, se llevaron a cabo las pruebas acústicas de la fachada vegetal (Diciembre 2013), por lo que los módulos se desmontaron de la fachada de la célula Paslink para poder llevar a cabo las pruebas en la sala de reverberación y cámara de transmisión horizontal.

A continuación se presenta de forma gráfica (Fig.4.1-4.5) las fases de la monitorización:



Fig. 4. 1. Primera fase: montaje, traslado y monitorización del muro de hoja doble base del 21 junio al 15 julio de 2012, célula EGUZKI



Fig. 4. 2. Segunda fase: montaje de la fachada ventilada cerámica sobre el muro base y monitorización de esta del 01 al 31 de agosto de 2012. Célula EGUZKI



Fig. 4. 3. Tercera fase I: montaje de la fachada vegetal sobre el muro base y monitorización de esta del 01 de diciembre de 2012 al 03 de marzo de 2013. Célula EGUZKI



Fig . 4. 4. Tercera fase II: Retirada de la fachada vegetal de la célula Paslink y colocación sobre la pared del LCCE. 04 de marzo de 2013



Fig . 4. 5. Tercera fase III: 28 de junio de 2013 colocación de la fachada vegetal en la célula ILARGI y monitorización hasta diciembre 2014

3.2 Secuencias de Ensayo

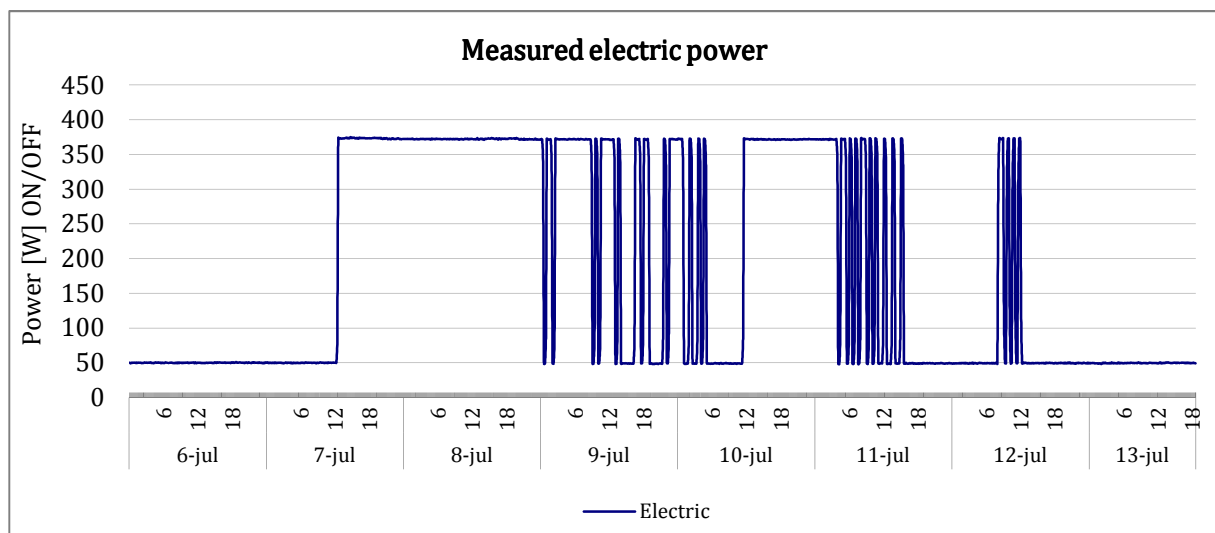
En las siguientes subsecciones del capítulo se sigue el mismo esquema gráfico con los datos registrados. A lo largo de ellos, se representan gráficamente en cuatro figuras las señales registradas durante los ensayos de cada una de las secuencias de ensayo llevadas a cabo. En primer lugar, se muestra la secuencia de potencia de entrada de alimentación (junto al ventilador) dentro de la sala de ensayo. La segunda figura, presenta la media de las señales de temperatura de los sensores situados en las diferentes capas de la muestra de fachada. La tercera figura, presenta la temperatura interna media del aire, temperatura exterior ventilada del aire y la radiación solar vertical global del solarímetro. Finalmente, la cuarta figura presenta las señales de flujo de calor de cada uno de los sensores de flujo de calor situado en las diferentes capas de la muestra de fachada.

3.3 Secuencia ROLBS (Randomly Ordered Logarithmically Binary Sequence)

La secuencia ROLBS es una secuencia de alta frecuencia. El objetivo de esta señal es doble. En primer lugar, permite obtener series de datos que contiene información acerca de la respuesta a altas frecuencias de los componentes ensayados. En segundo lugar, como la señal de entrada de calor está totalmente descorrelacionada con las condiciones ambientales exteriores, permite la identificación de los parámetros en óptimas condiciones.

3.3.1 SECUENCIA I: Muro base-Julio 2012

La secuencia de la señal ROLBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base se puede observar a continuación:



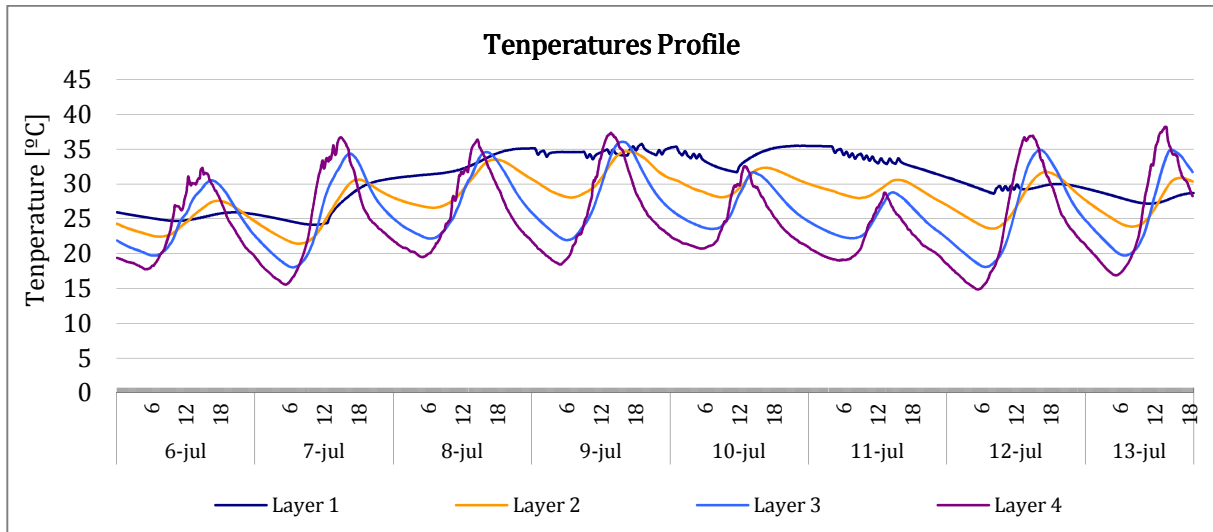
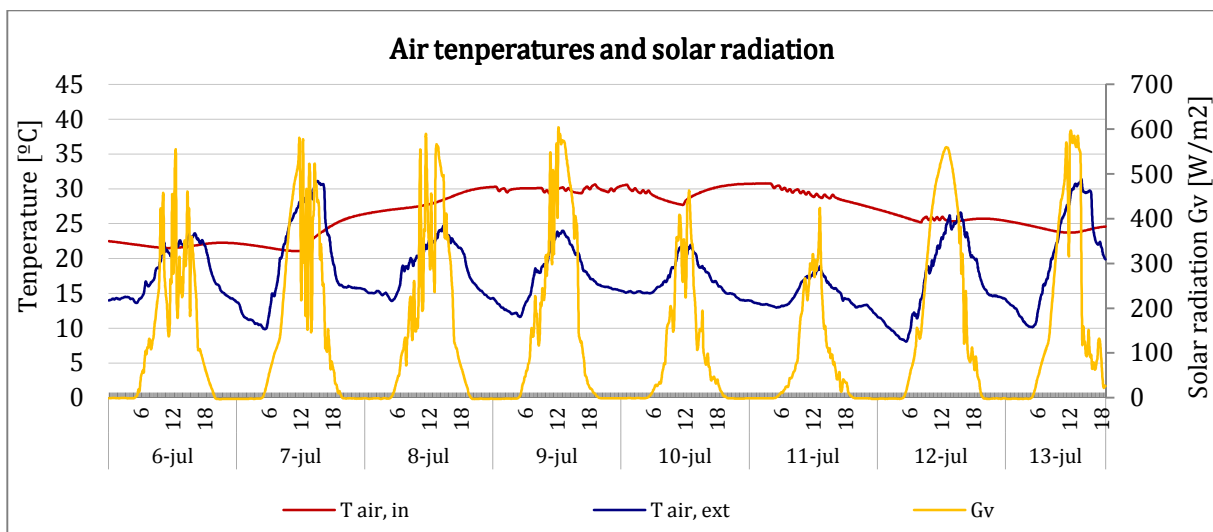


Fig. 4. 6. Arriba: Secuencias ROLBS realizada sobre el muro base. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Julio-2012-EGUZKI)

La Fig. 4.6 muestra la señal de entrada de calor durante una secuencia ROLBS llevado a cabo dentro de la sala de ensayo a través del muro base durante el mes de julio de 2012.

Se puede comprobar cómo la temperatura interior de la celda así como la primera capa responde inmediatamente a los pulsos de calor de la termorresistencia. Por otro lado, las capas más externas, presentan oscilaciones de temperatura día/noche más parecidas a los cambios de temperatura ocurridos en el exterior, correlacionadas estas con la radiación solar (Fig.4.7).



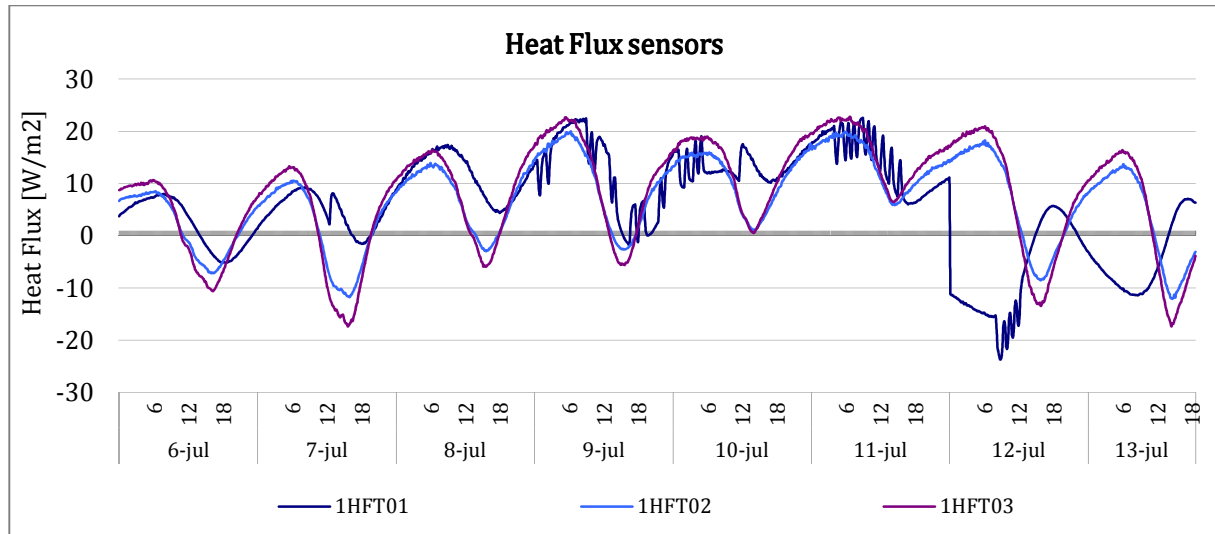
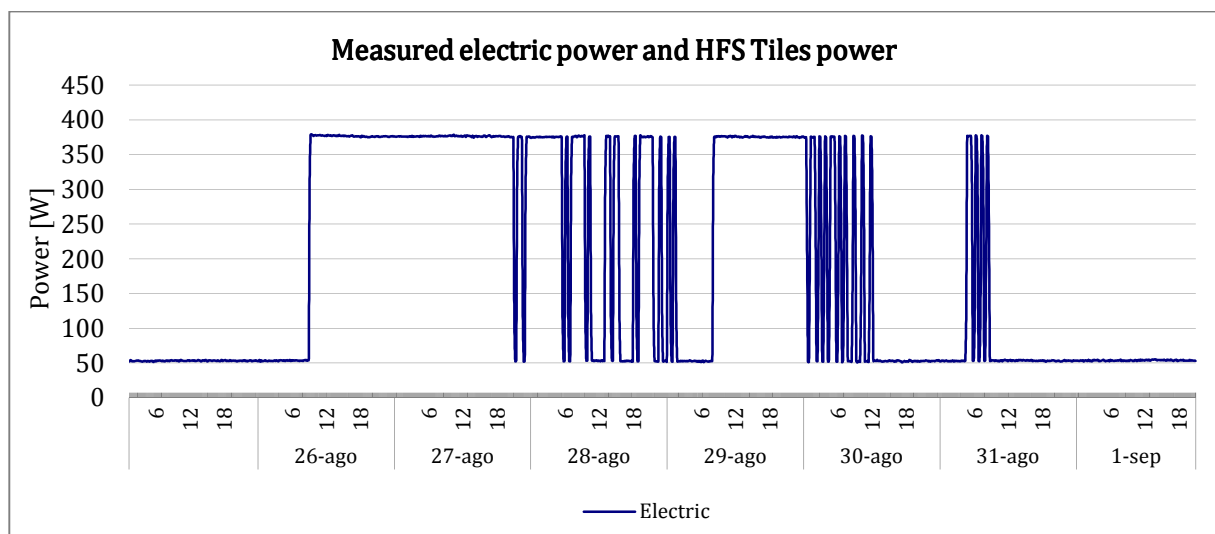


Fig. 4. 7. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Julio-2012-EGUZKI)

Al igual que en el caso de la gráfica de temperaturas Fig. 4.6 en el caso de la Fig. 4.7 correspondiente a la evolución de los flujos de calor en las diferentes capas analizadas.

3.3.2 SECUENCIA II: Fachada ventilada-Agosto 2012.

La secuencia de la señal ROLBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada ventilada se puede observar a continuación:



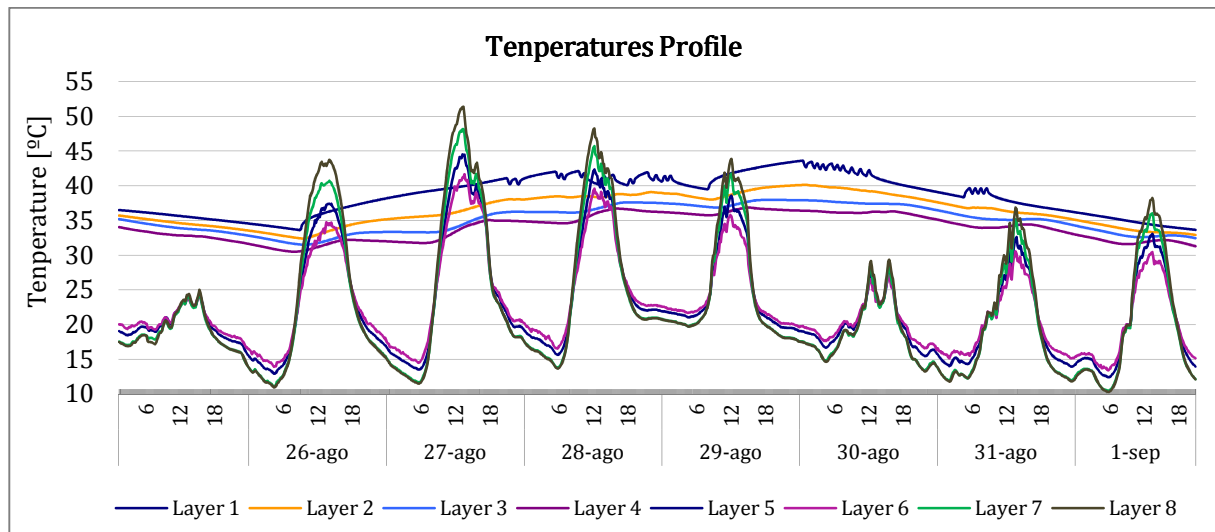


Fig. 4. 8. . Arriba: Secuencias ROLBS realizada sobre la fachada ventilada. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto-2012-EGUZKI)

En la Fig. 4. 8 se observa en la capa número uno una rápida respuesta de la temperatura a los ciclos de potencia llevados a cabo en el interior de la celda. Las capas que componen el muro base (Layer 1 a Layer 4) presentan la misma tendencia pero a menor temperatura, alrededor de los 0,2°C menos por capa.

Durante los días 26 al 29 de agosto la alta radiación solar (ver Fig. 4. 9) produce un aumento de la temperatura de las capas exteriores, llegando a máximas de 50 °C en la capa exterior, mientras que el interior de la celda de ensayo se encuentra a 40 °C. Esta fuerte incidencia solar también se ve reflejado en los fluxómetros exteriores 1HFT06 y 1HFT08.

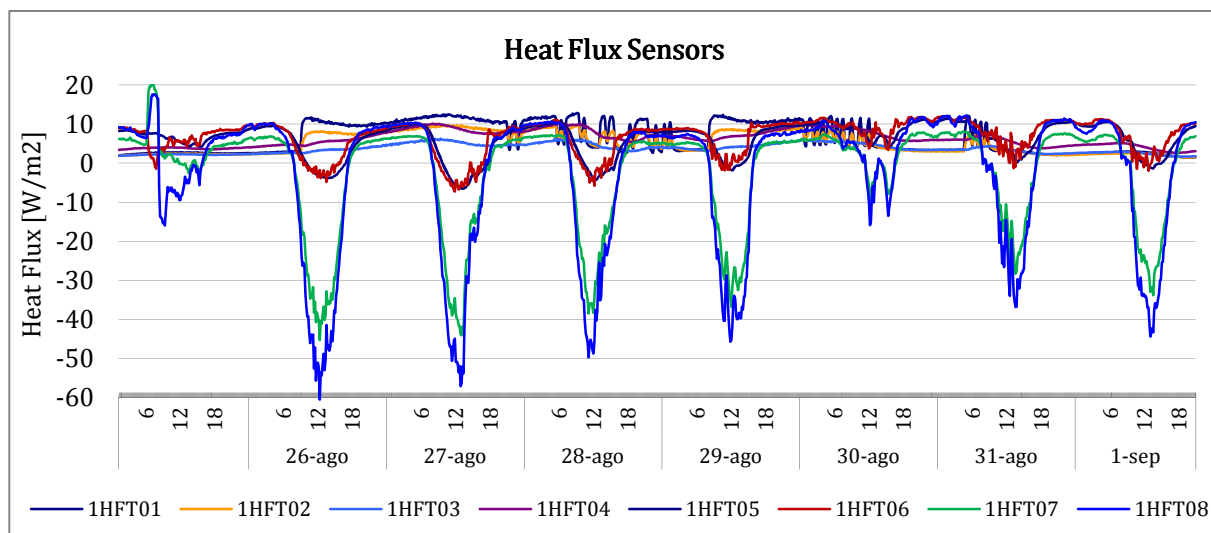
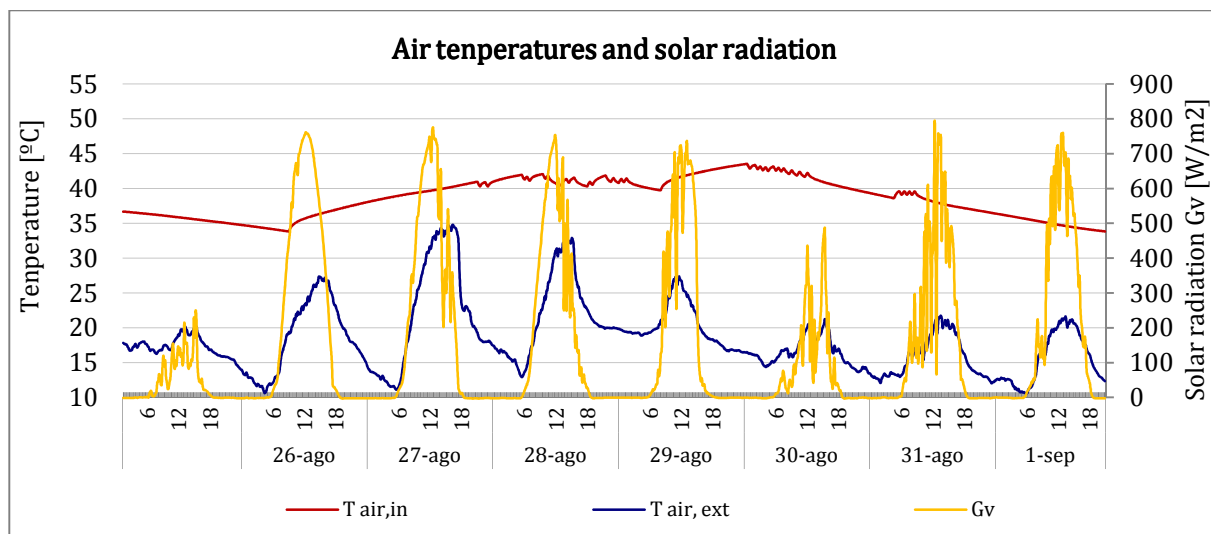


Fig. 4. 9. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto-2012- EGUZKI)

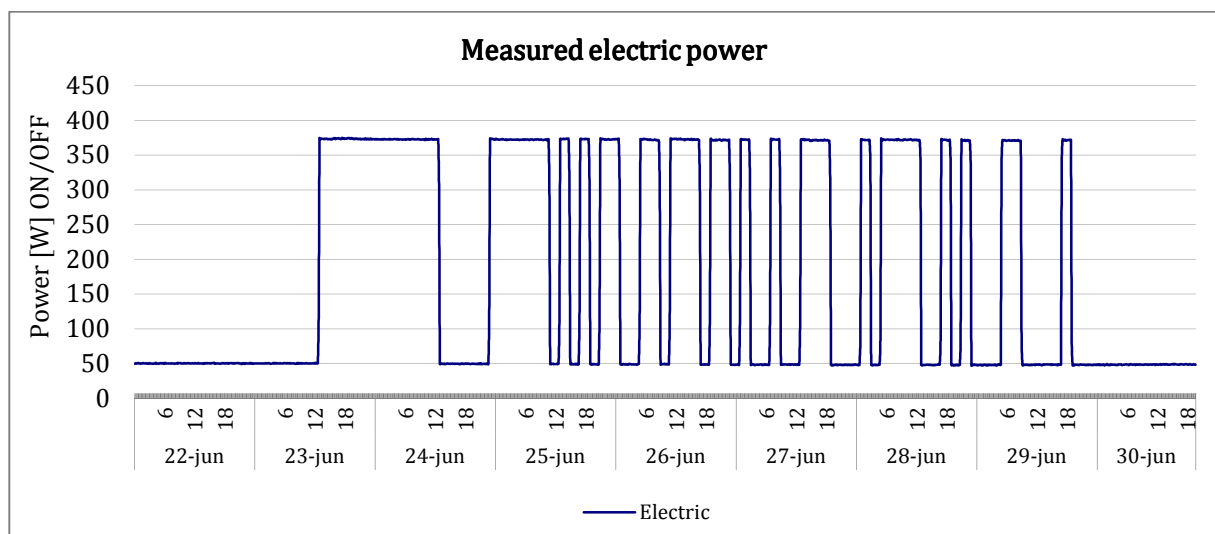
3.4 Secuencia PRBS (PseudoRandom Binary Sequence)

La secuencia PRBS es una secuencia de baja frecuencia. El objetivo de esta señal es doble. En primer lugar, permite obtener series de datos que contienen información sobre la respuesta a bajas frecuencias de los componentes ensayados. En segundo lugar, como la señal de entrada de calor está totalmente descorrelacionada con las condiciones ambientales exteriores la identificación de los parámetros se puede hacer en óptimas condiciones.

La rutina de secuencias, como se ha citado anteriormente no tiene correlación con el resto de flujos de calor de entrada. Esta secuencia fue diseñada para excitar de forma dinámica el interior de la celda de ensayo. El flujo de calor se distribuye en varias frecuencias estas variaciones en el tiempo de encendido y apagado de la termorresistencia varían entre intervalos de 60 minutos a intervalos de 12 horas [137].

3.4.1 SECUENCIA III: Muro base-Junio 2012

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base se puede observar a continuación:



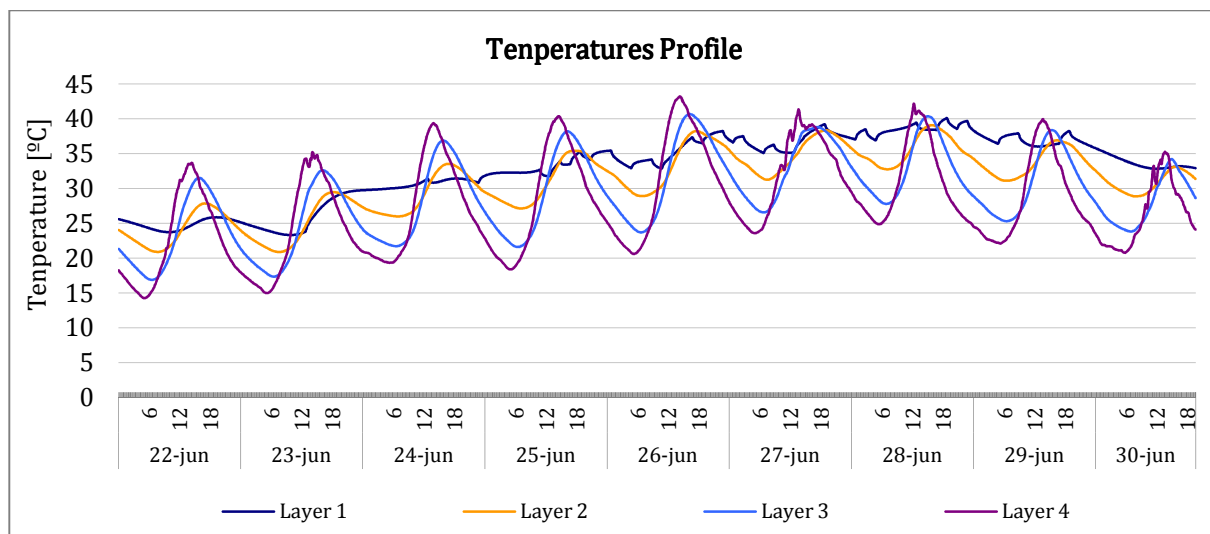
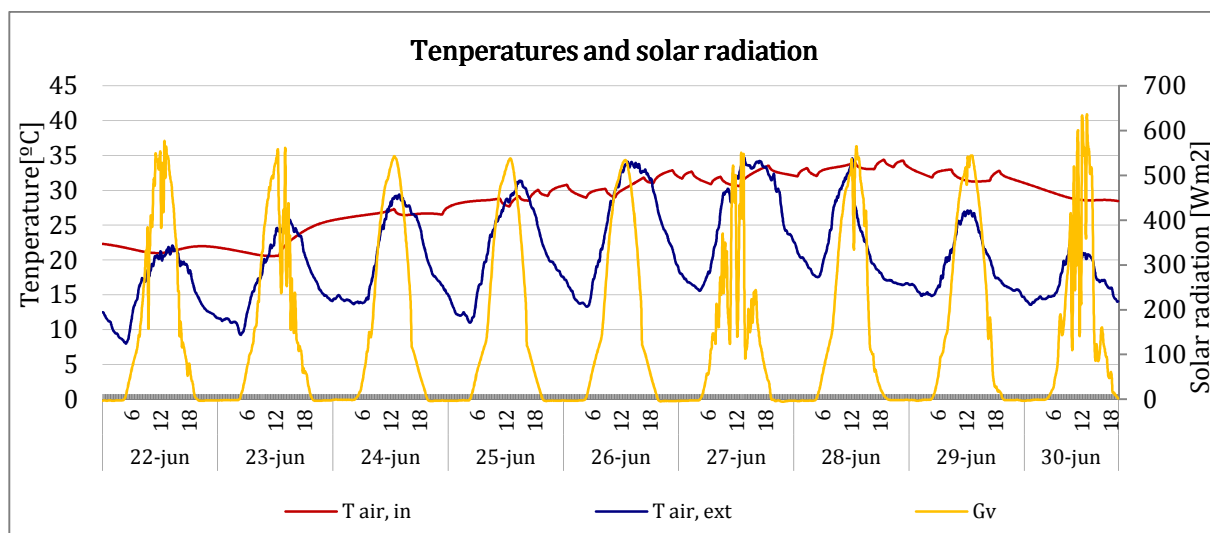


Fig. 4. 10. Arriba: Secuencia PRBS realizada sobre el muro base. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Junio-2012- EGUZKI)

Un ejemplo de la rutina PRBS de entrada de flujo de calor provocado a lo largo de una semana de junio de 2012 se representa en la Fig. 4. 10.

A lo largo de esta secuencia de muestreo, como se puede ver en las siguientes gráficas (Fig 4. 11), la temperatura interior y la exterior de la celda tienen valores de temperatura muy próximos. No existe un gradiente de temperaturas claro, por lo que determinar las propiedades térmicas de la muestra de muro base de doble hoja mediante esta secuencia no resulta adecuado.



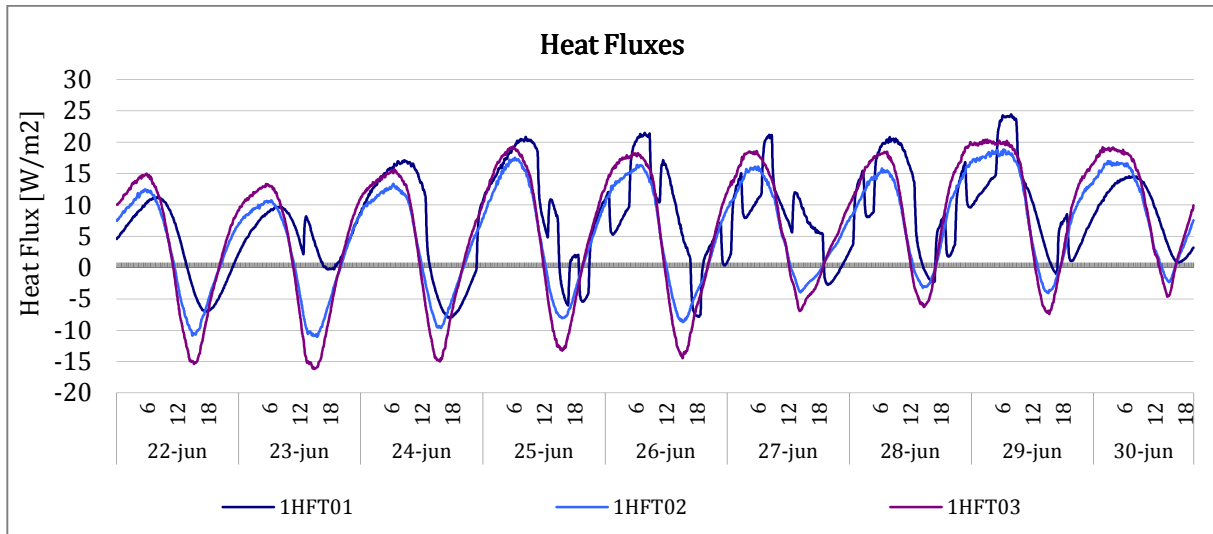
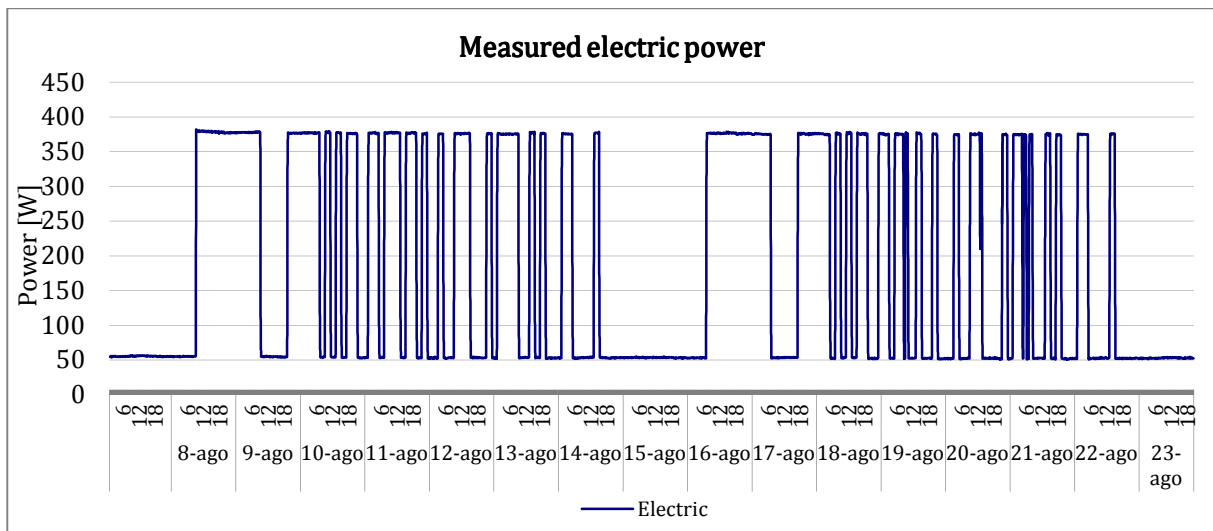


Fig. 4. 11. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Junio-2012- EGUZKI)

3.4.2 SECUENCIA IV: Fachada ventilada-Agosto 2012

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada ventilada se puede observar a continuación:



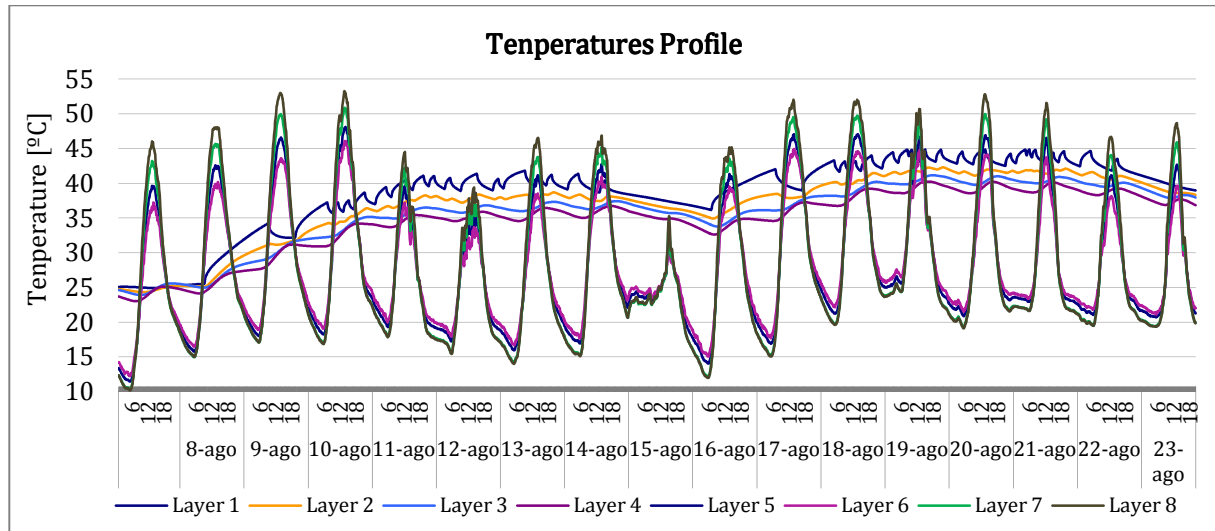


Fig. 4. 12. Arriba: Dos secuencias consecutivas de PRBS realizadas sobre la fachada ventilada. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de las secuencias PRBS (Agosto-2012- EGUZKI)

Observando las figuras anteriores se puede determinar varios aspectos, por un lado, en la capa número uno se observa una rápida respuesta de la temperatura a los ciclos de potencia llevados a cabo (Fig.4. 12) durante la secuencia de muestreo. Las capas que componen el muro base (Layer 1 a Layer 4) presentan la misma tendencia pero con una temperatura por capa menor, alrededor de los 0.2 °C menos por capa.

Por otro lado, a lo largo de la secuencia de datos la elevada radiación solar vertical global (700 W/m²) (ver Fig. 4. 13) produce el aumento de la temperatura exterior así como el de las capas exteriores (Layer 5-8), alcanzando las temperaturas máximas al mediodía 12.00 h. La temperatura máxima se alcanzó el día 10 de agosto llegando en la capa exterior (Layer 8) a los 52 °C, mientras que el interior de la celda de ensayo se encontraba a 35 °C. Esta fuerte incidencia solar también se ve reflejada en los fluxómetros exteriores 1HFT06 y 1HFT08, mientras que los fluxómetros interiores siguen la secuencia de la termorresistencia.

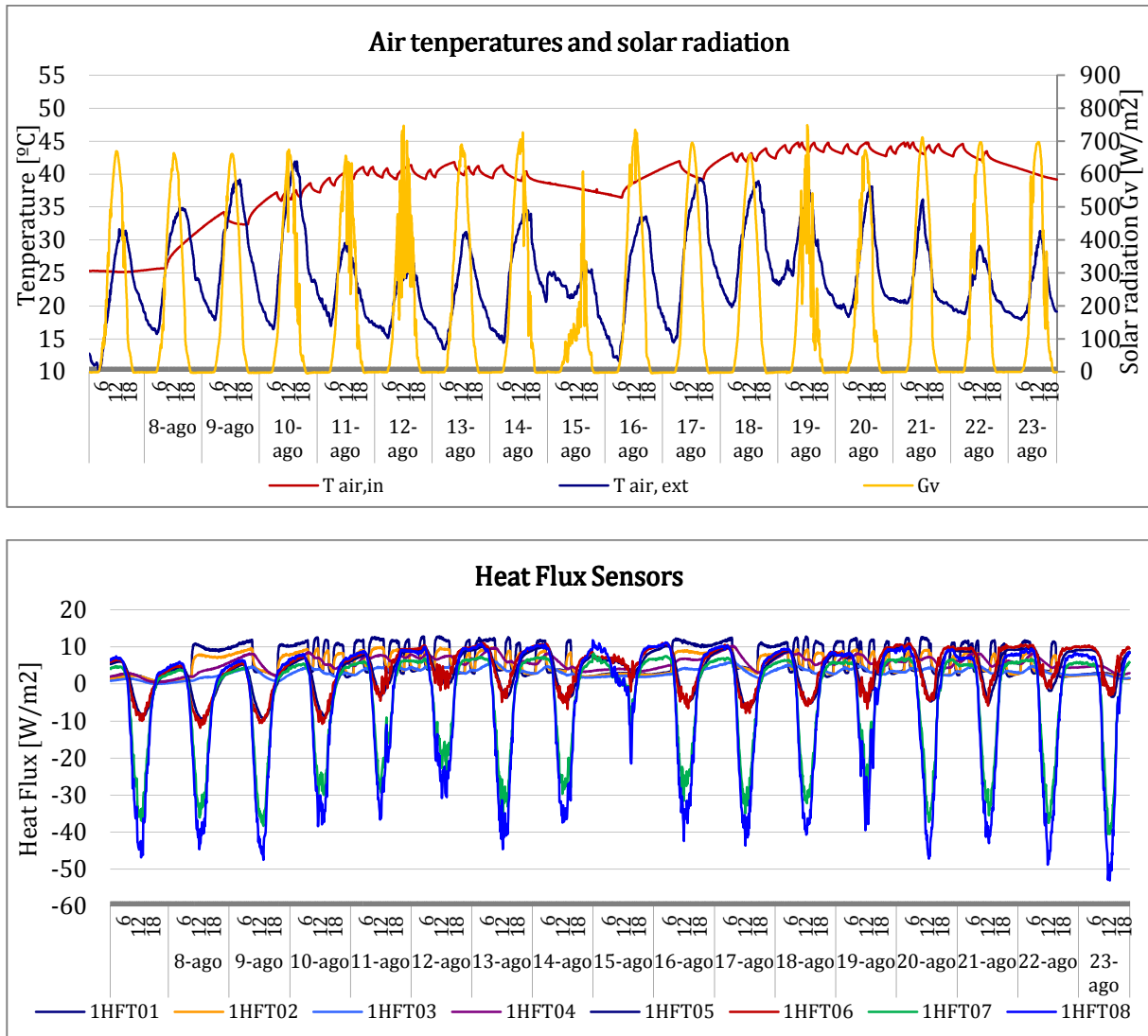


Fig. 4. 13. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto-2012- EGUZKI)

Observando la figura anterior (Fig.4. 13) se comprueba que el flujo de calor entrante sobre la fachada ventilada alcanza valores -40 W/m^2 en las horas centrales del día, mientras que durante las horas en las que no existe radiación solar, es decir horas nocturnas este valor se vuelve positivo alcanzando valores de 5 W/m^2 .

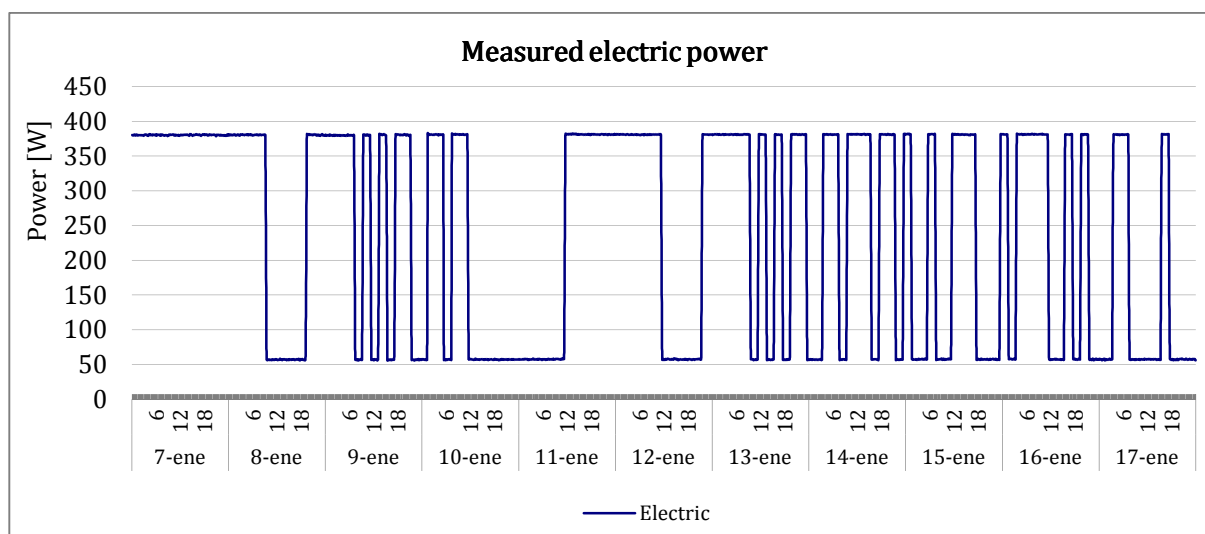
3.4.3 SECUENCIA V: Fachada vegetal Enero 2013

En ensayo se llevó a cabo en enero de 2013, cuatro meses después del trasplante de la vegetación por lo que como se ve en la Fig. 4. 14 la fachada vegetal no estaba completamente prevegetada. Sólo el 40 % de la fachada está recubierta por plantas, la parte central.



Fig. 4. 14. Detalle de la fachada vegetal en Enero de 2013 durante el ensayo PRBS en la célula de ensayo EGUZKI.

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:



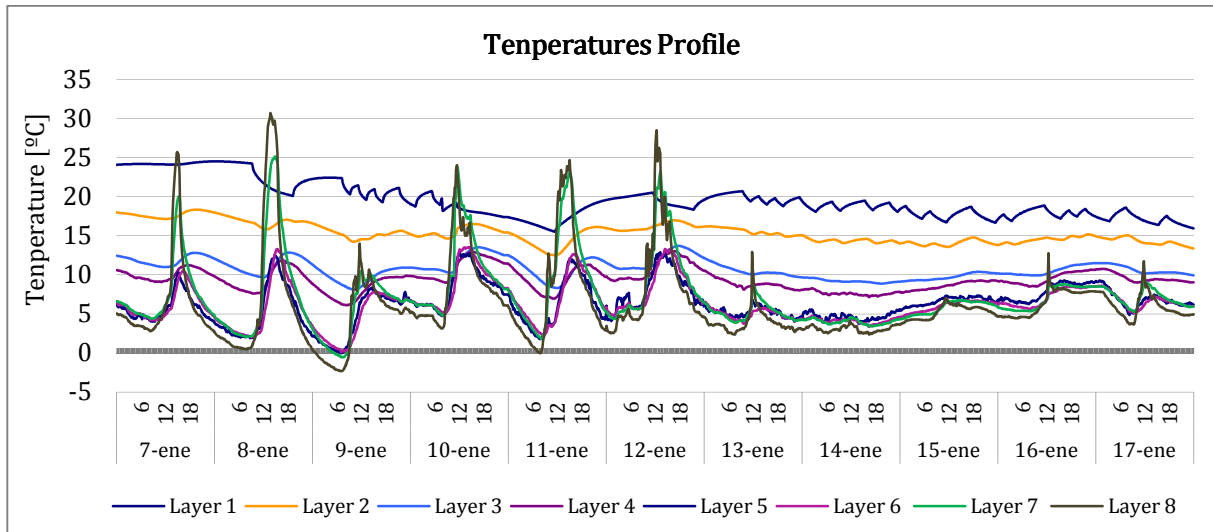
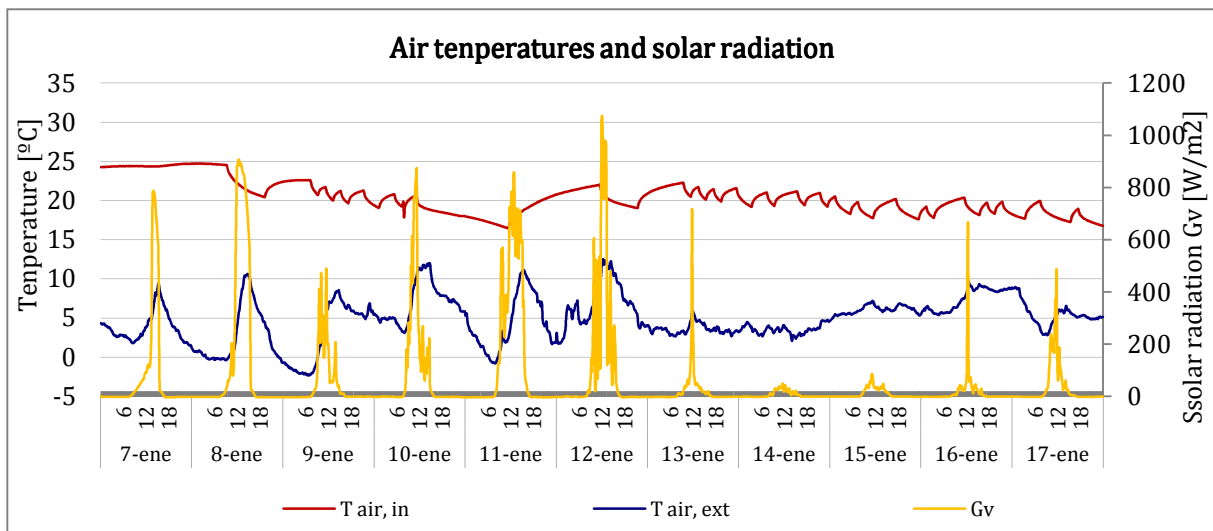


Fig. 4. 15. Arriba: Dos secuencias consecutivas de PRBS realizadas sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de las secuencias PRBS (Enero-2013- EGUZKI)

En la Fig. 4. 15 se muestra la señal consecutiva de dos secuencias de ensayo PRBS llevadas a cabo con la muestra de fachada vegetal. Mediante la amplitud del pulso se trata de aumentar las señales internas para obtener una diferencia de temperatura alta entre el interior y el exterior. Durante los intervalos de baja intensidad de la señales puede verse la potencia constante del ventilador.



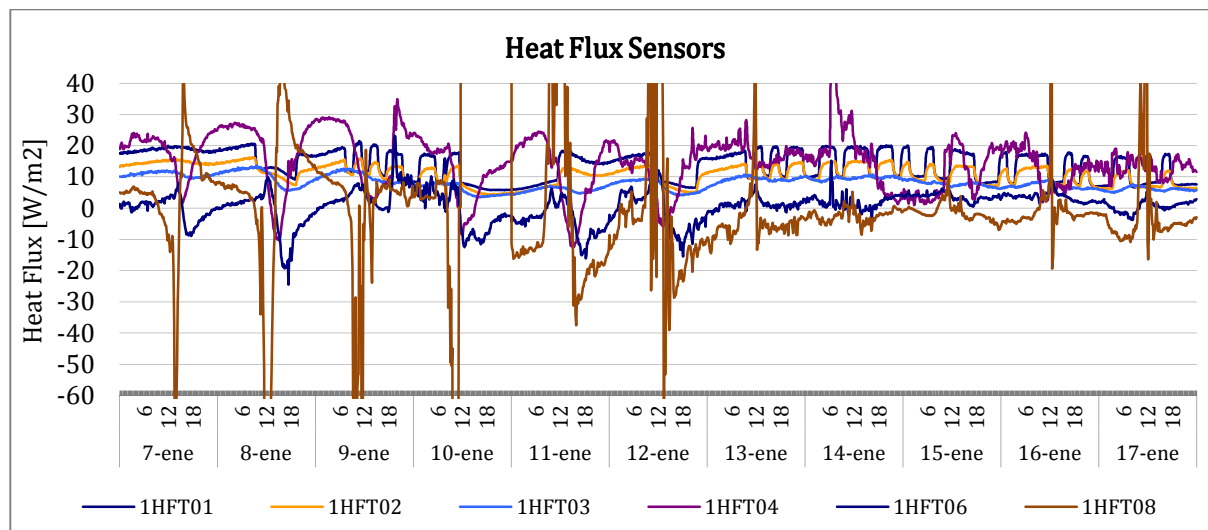


Fig. 4. 16. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Enero 2013- EGUZKI)

Esta secuencia está llevada a cabo en enero de 2013 cuando la temperatura exterior se mantiene baja (5 °C) sin muchas fluctuaciones día/noche debido a la baja radiación solar (ver Fig. 4. 16). Se puede comprobar cómo bajo estas circunstancias el efecto de las señales de flujo de calor afecta hasta la layer 4. A partir de la cámara de aire, se puede observar como las layer 6 y 8, las capas más externas, sufren el efecto de la radiación solar y como la dirección del flujo de 1HFT06 y 1HFT08 es entrante en las horas centrales del día. El flujo de calor que entra por la fachada de la muestra a través de su superficie interior es menos de la mitad en comparación con el flujo de calor que sale de la muestra. Esto significa que la muestra de fachada está siendo descargada muy rápido y por lo tanto el nivel térmico de la muestra de fachada ventilada se está reduciendo.

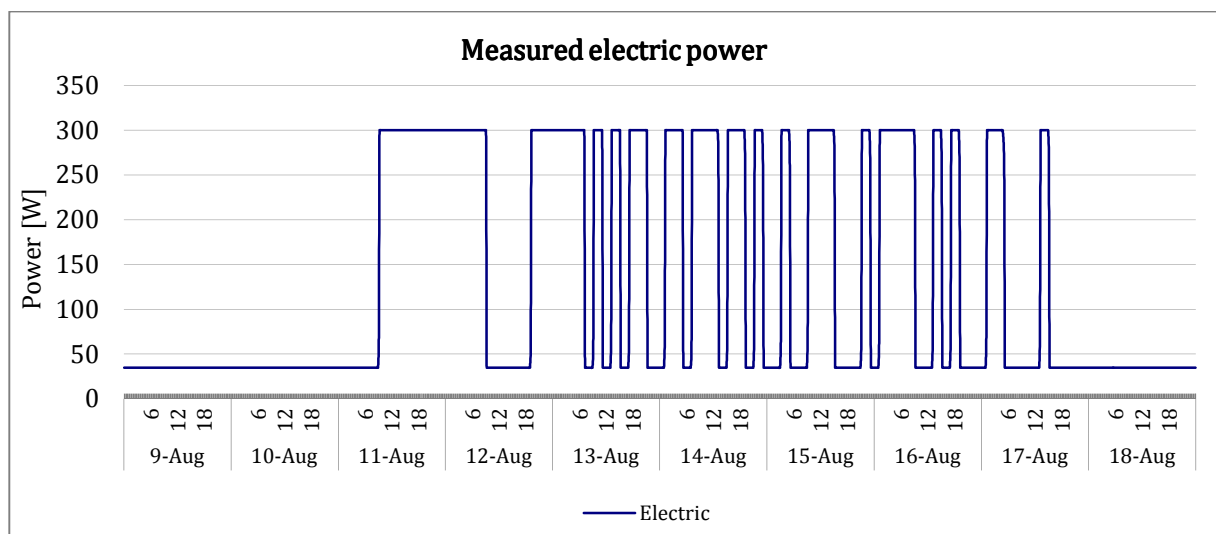
3.4.4 SECUENCIA VI: Fachada vegetal Agosto 2013

En ensayo se llevó a cabo en agosto de 2013 como se ve en la Fig. 4. 17, la fachada vegetal estaba completamente prevegetada alcanzando los tallos 20 cm de longitud media.



Fig. 4. 17. Detalle de la fachada vegetal en Agosto de 2013 durante el ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:



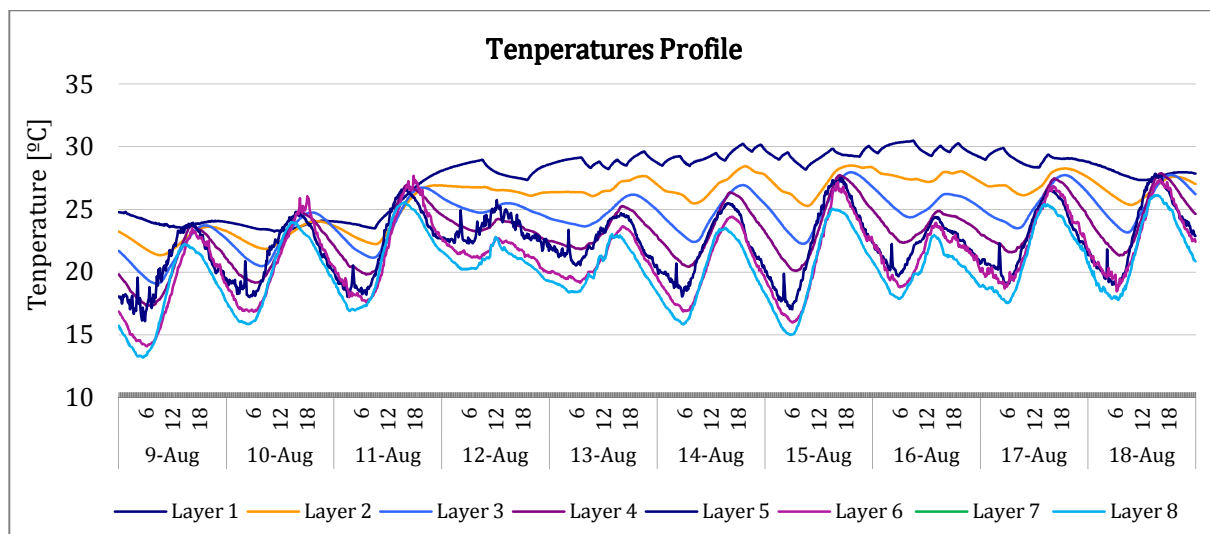
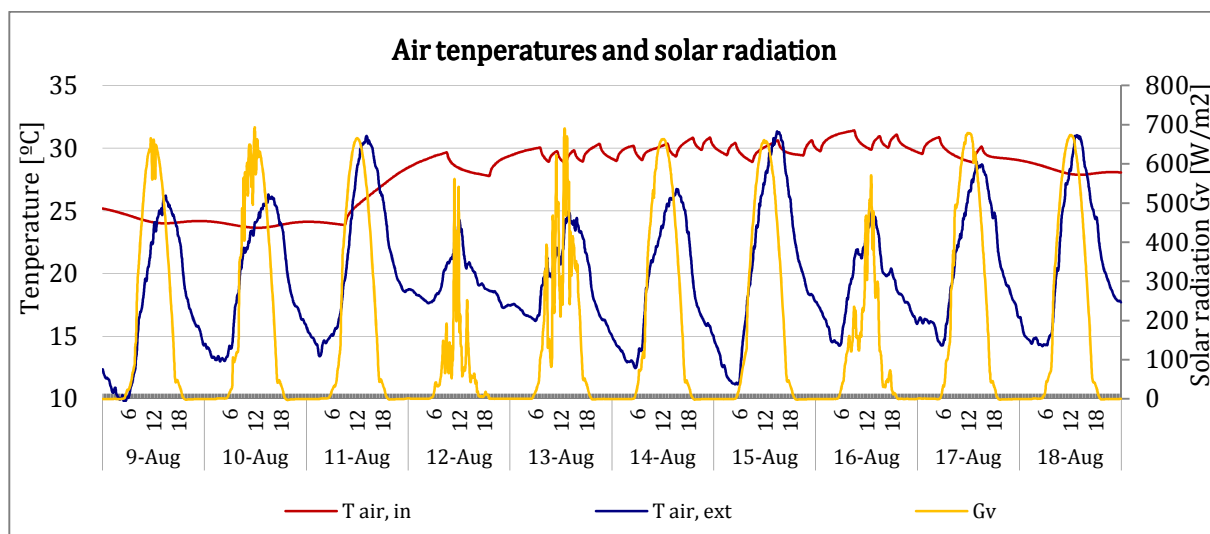


Fig. 4. 18. Arriba: Secuencias de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Agosto-2013-ILARGI)

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra se puede observar en la Fig. 4. 18. Se observa una rápida respuesta a los ciclos de potencia en la capa interior de la celda.

Por otro lado, los días de máxima radiación solar (Fig.4. 19) como el día 15 de agosto, la temperatura exterior del aire llega a alcanzar los 31 °C mientras que la capa exterior de la fachada vegetal no llega a los 28 °C. Esto verifica como a capa vegetal como aislante frente a las elevadas temperaturas, ya que no permite aumentar la temperatura superficial por encima de los 30 °C.



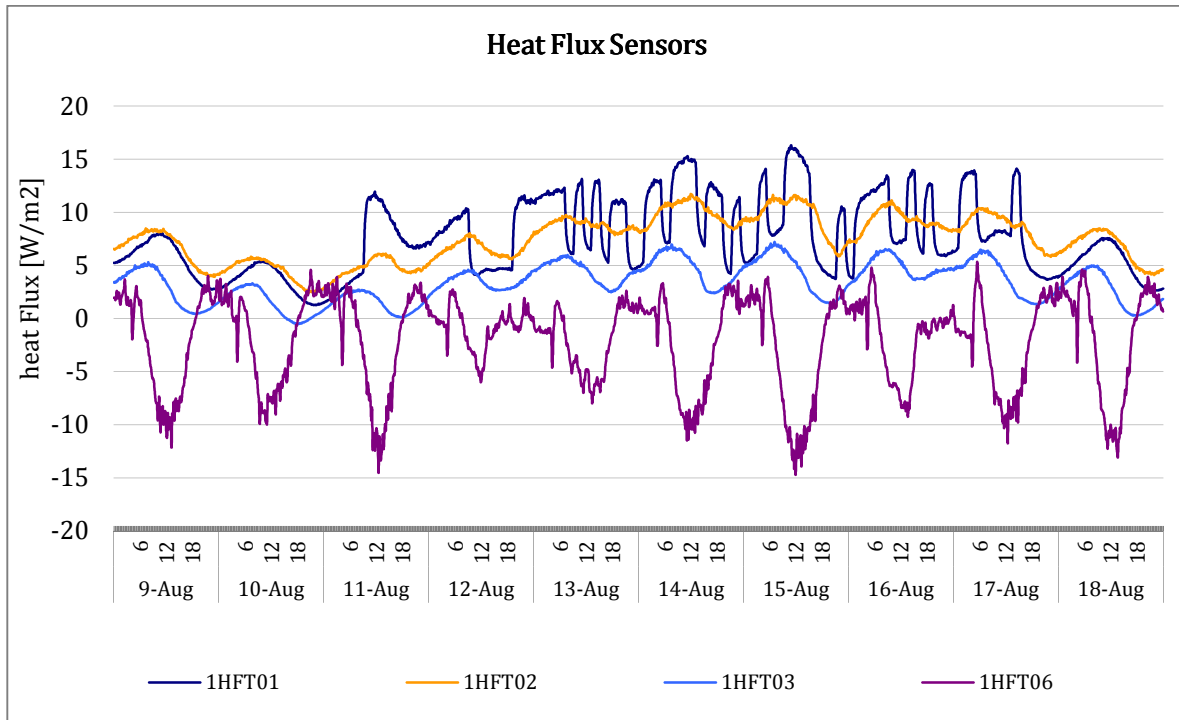


Fig. 4. 19. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto 2013- ILARGI)

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de los flujos de calor en las diferentes capas de la muestra se puede observar en la Fig. 4. 19. Se observa una clara respuesta a los ciclos de potencia en la capa interior de la celda en el fluxómetro 1HFT01, y más atenuada en los dos siguientes 1HFT02 y 1HFT03. Por el otro lado, el fluxómetro 1HFT06, colocado tras el módulo vegetal, presenta variaciones día/noche relacionadas con la radiación solar.

En la figura anterior (Fig.4. 19) no aparece gráfico el fluxómetro 1HFT04 ni el 1HFT08 debido a una mala conexión.

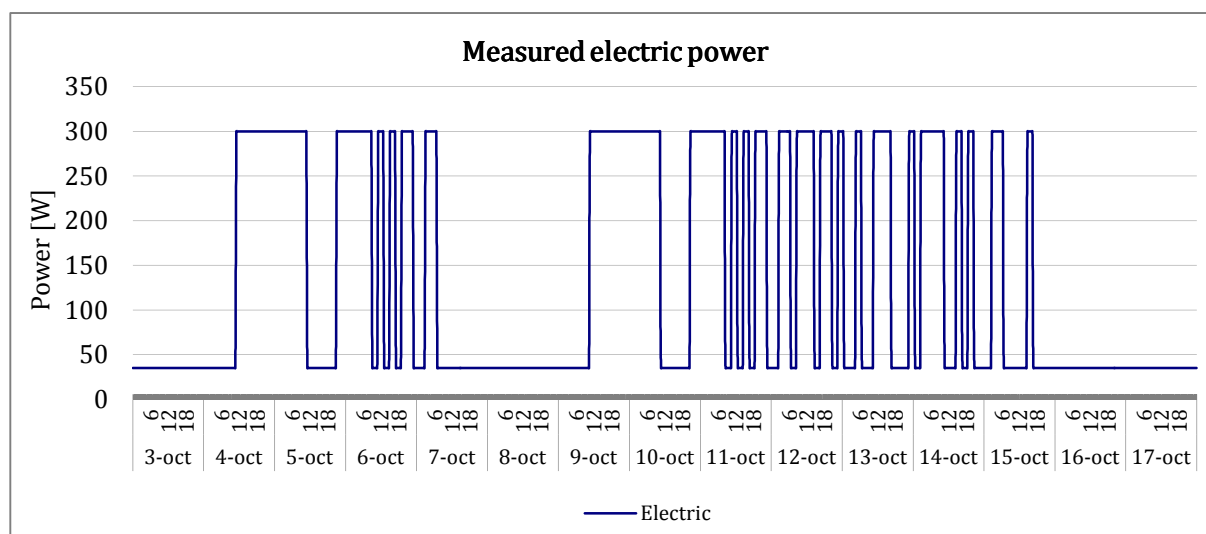
3.4.5 SECUENCIA VII: Fachada vegetal Octubre 2013

A continuación en la Fig. 4. 20 se puede observar como a lo largo de esta secuencia de muestreo la fachada vegetal se encontraba completamente prevegetada en el 100 % de su superficie.



Fig. 4. 20. Detalle de la fachada vegetal en Octubre de 2013 durante el ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:



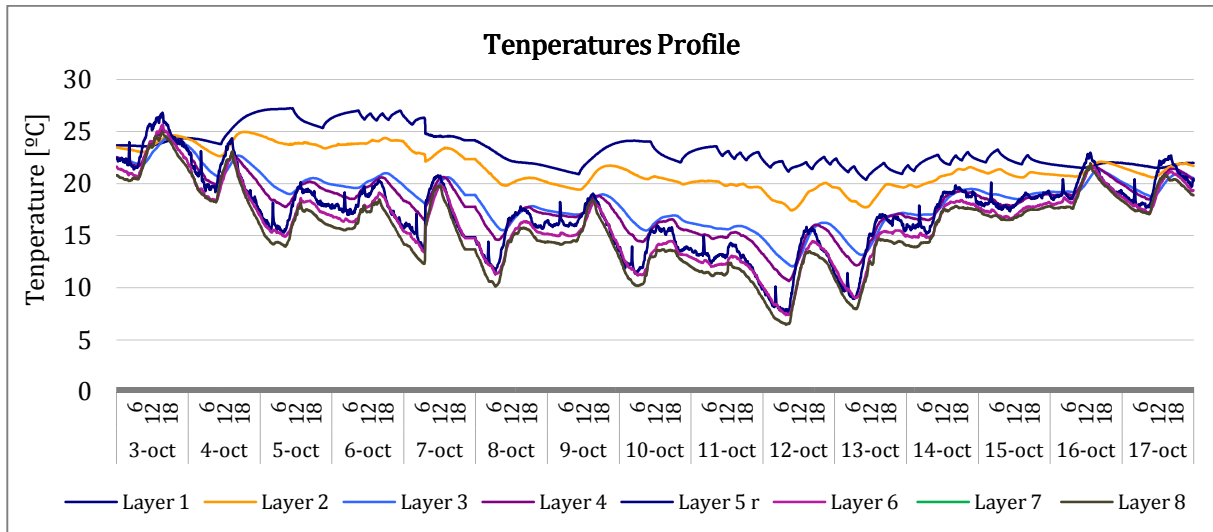
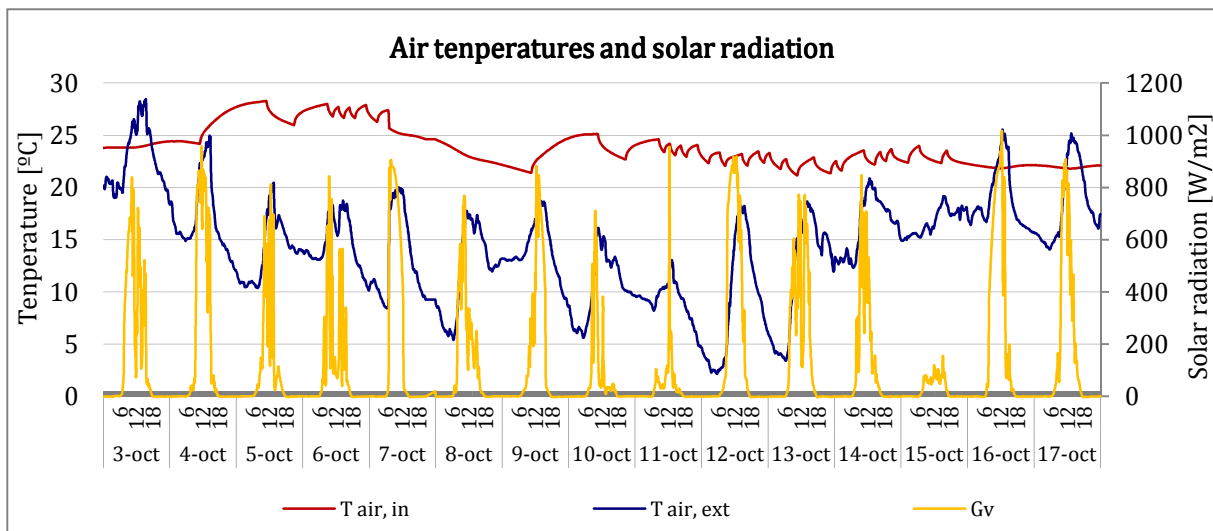


Fig. 4. 21. Arriba: Dos secuencias consecutivas de PRBS realizadas sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de las secuencias PRBS (Octubre-2013- ILARGI)

A lo largo de dos secuencias PRBS consecutivas se puede observar como en las dos primeras capas interiores de la fachada vegetal (Layer 1-2) es patente (Fig.4. 21) la tendencia de las secuencias de potencia ensayadas, pero en las capas más exteriores (Layer 6-7-8) así como en las intermedias (Layer 3-4-5), la temperatura depende más de las fluctuaciones día/noche de la temperatura exterior que de las secuencias interiores.



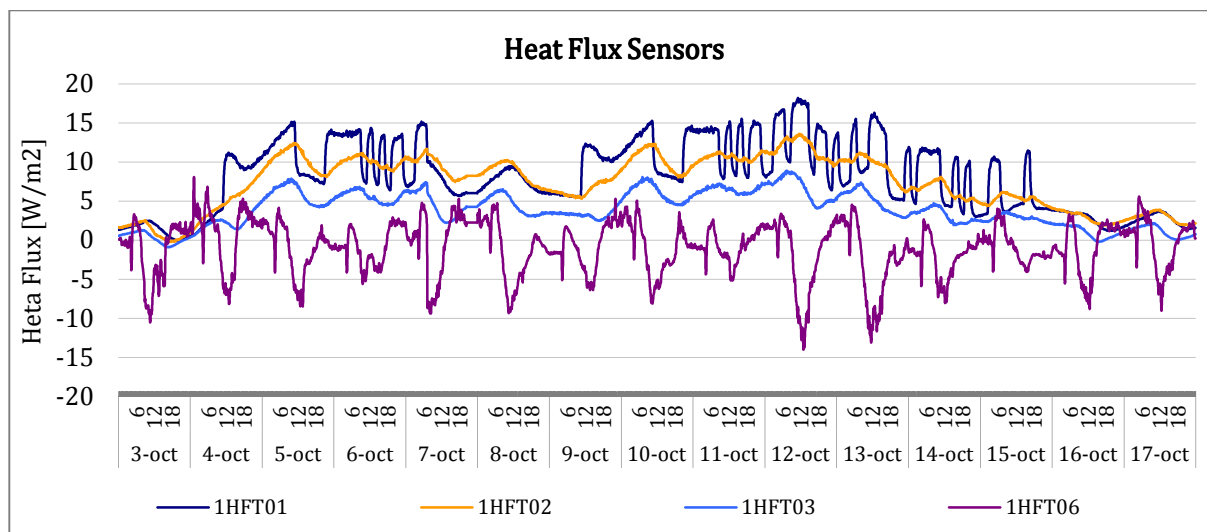


Fig. 4. 22. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Octubre 2013- ILARGI)

En la figura anterior (Fig.4. 22) no aparece gráfico el fluxómetro 1HFT08 debido a una mala conexión.

3.4.6 SECUENCIA VIII: Fachada vegetal Octubre 2013

La fachada vegetal durante el siguiente ensayo se encontraba totalmente prevegetada ocupando el 100 % de la superficie de la muestra Fig. 4. 23.



Fig. 4. 23. Detalle de la fachada vegetal en Octubre de 2013 durante los ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior,

radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

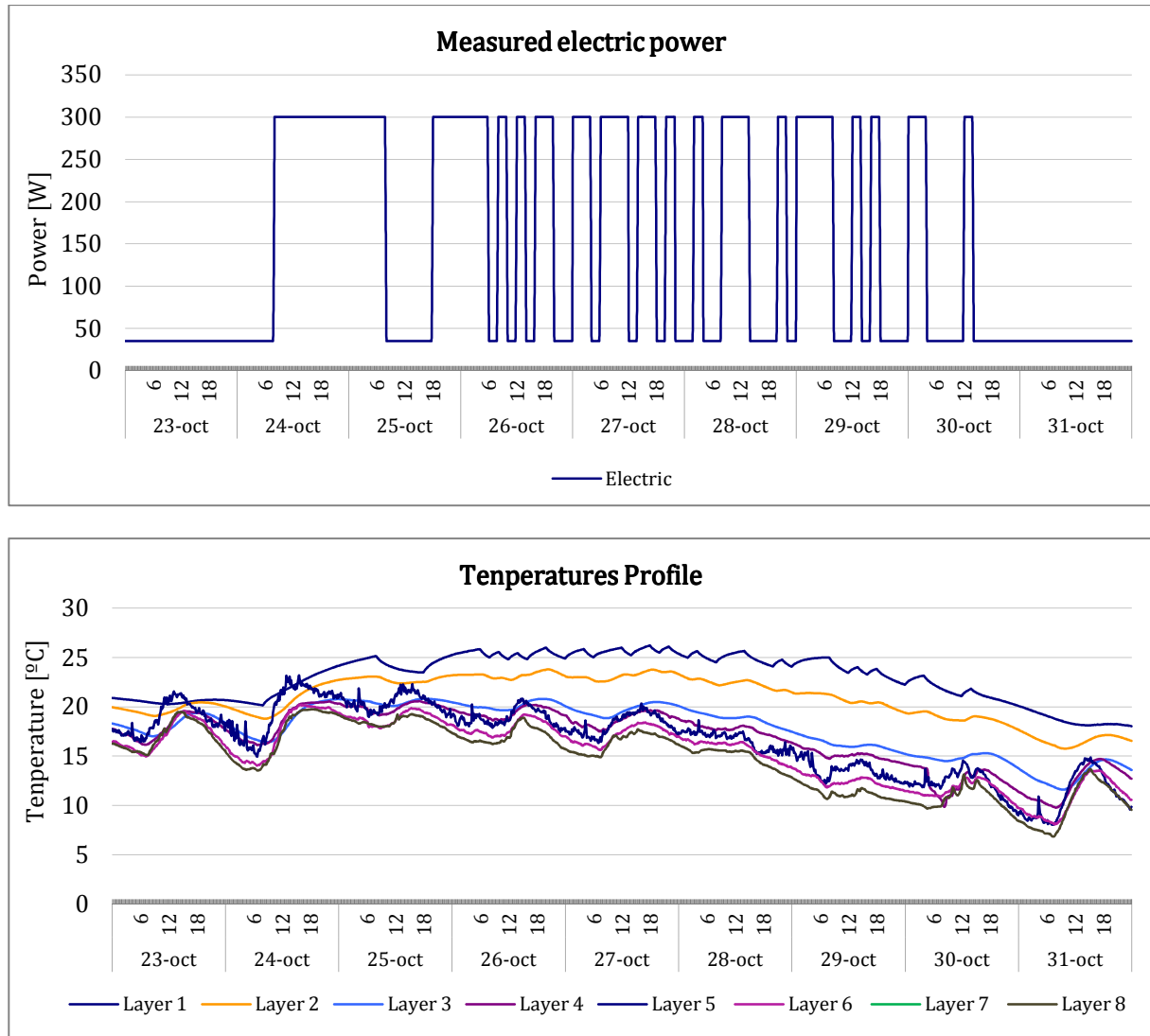


Fig. 4. 24. Arriba: Secuencias de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Octubre-2013-ILARGI)

La temperatura en las dos primeras capas de la fachada ventilada (ver Fig.4. 24) sigue la tendencia de las secuencias de potencia ensayadas, pero en las capas más exteriores (Layer 6-7-8) así como en las intermedias (Layer 3-4-5) se puede observar como la temperatura depende más de las fluctuaciones de la temperatura exterior. Así durante los días 27-28-29 a medida que baja la temperatura exterior las capas intermedias y exteriores presentan la misma disminución.

La diferencia respecto a la secuencia VII es el mayor gradiente entre la temperatura interior de la celda y el ambiente exterior, lo que permite determinar con mayor precisión los parámetros característicos de los componentes de la fachada vegetal.

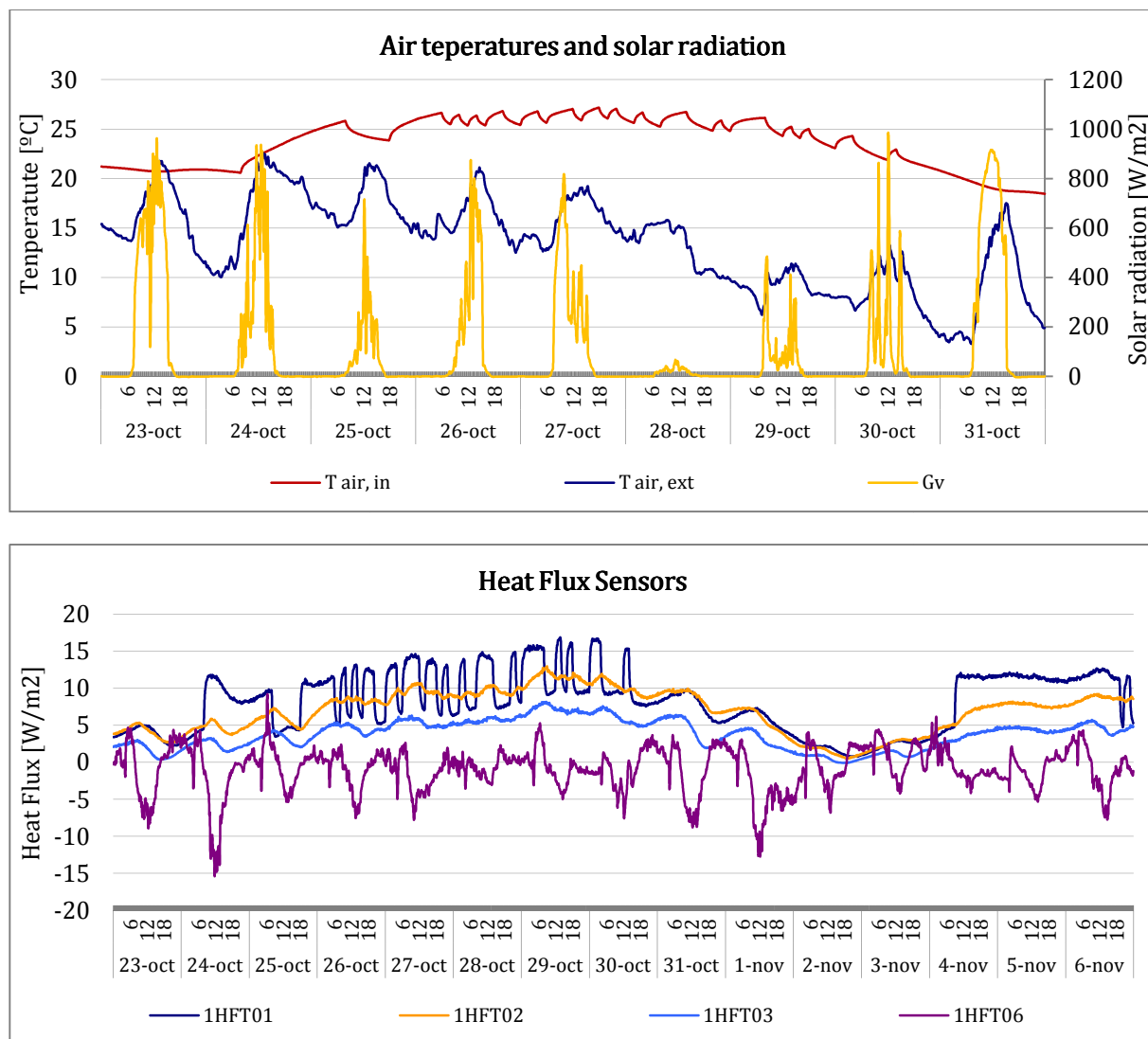


Fig. 4. 25. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Octubre 2013- ILARGI)

El salto de temperatura entre el interior y exterior de la celda alcanza valores de 10-15 °C, se alcanzó la mayor diferencia entre ellas durante la noche del 28 de octubre, donde DT alcanza valores de 20 °C. También es importante la influencia de la radiación solar en la temperatura exterior. Durante el período nocturno, cuando no hay radiación solar, la temperatura llega a mínimos 5 °C, mientras que durante la parte central del día (12.00h)

la temperatura gracias al máximo en la radiación solar (800 W/m^2), alcanza temperaturas de hasta $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

En cuanto a los valores en las primeras horas de la mañana, cuando la fachada todavía no ha recibido radiación solar, se siguen produciendo pérdidas por intercambio de calor por radiación entre la fachada vegetal y el cielo. Cuando la fachada comienza a recibir la radiación solar, la temperatura aumenta, alcanzando máximas al mediodía. Este punto demuestra la importancia de las ganancias y las pérdidas debidas a los intercambios de radiación solar en el comportamiento térmico.

La evolución de los flujos de calor en las diferentes capas de la muestra se puede observar en la Fig. 4. 25. Se observa una clara respuesta a los ciclos de potencia en la capa interior de la celda en el fluxómetro 1HFT01, y más atenuada en los dos siguientes 1HFT02 y 1HFT03

En la figura anterior (Fig.4. 25) no aparece gráfico el fluxómetro 1HFT04 ni el 1HFT08 debido a una mala conexión.

3.4.7 SECUENCIA IX: Fachada vegetal Febrero 2014

En la siguientes imágenes (Fig.4. 26) se observa el estado de desarrollo de la fachada vegetal durante esta secuencia de ensayos, la fachada está completamente vegetada y tupida por los todos bordes, con tallos de hasta 30 cm de longitud.



Fig. 4. 26. Detalle de la fachada vegetal en Febrero de 2014 durante los ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

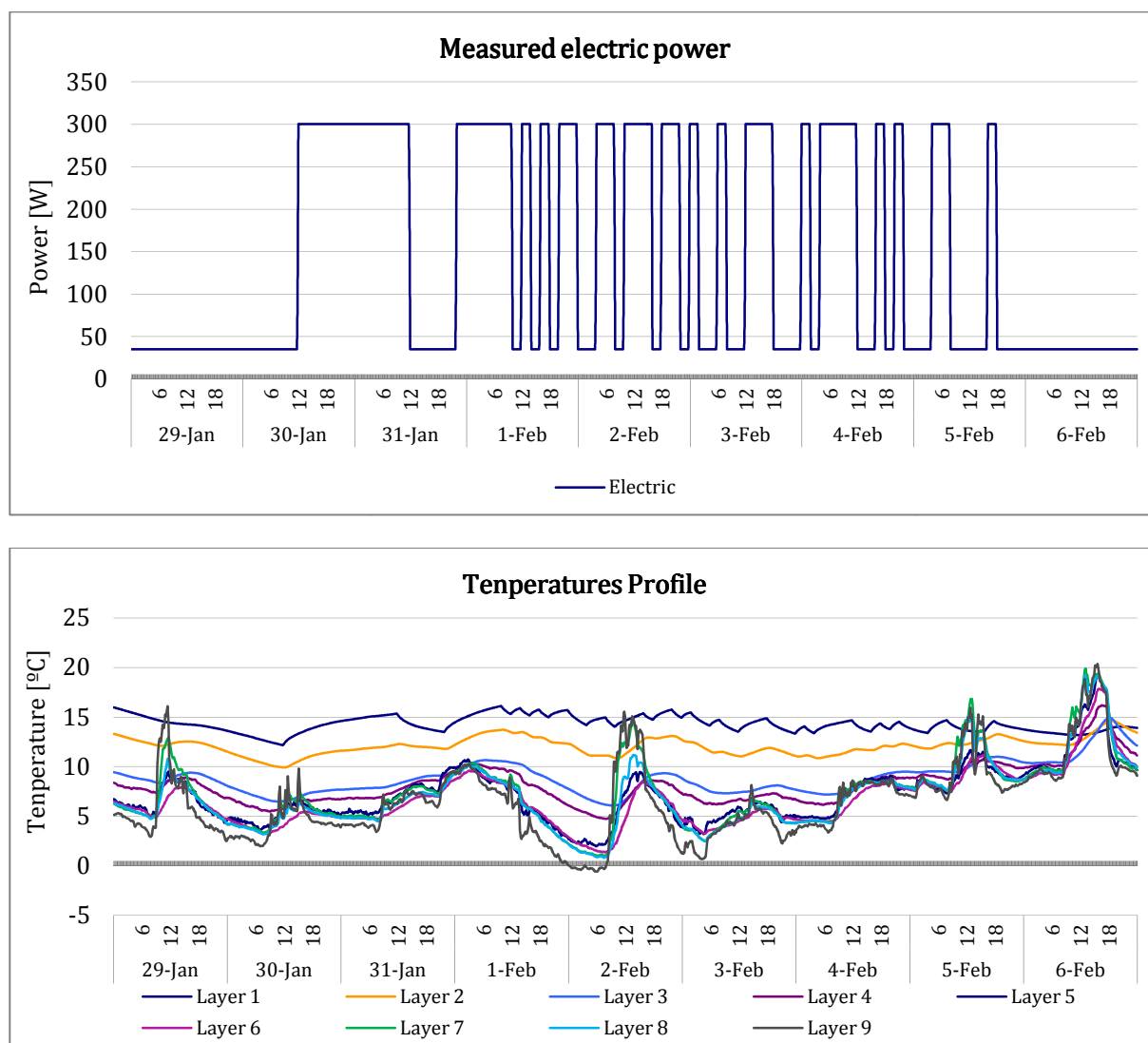
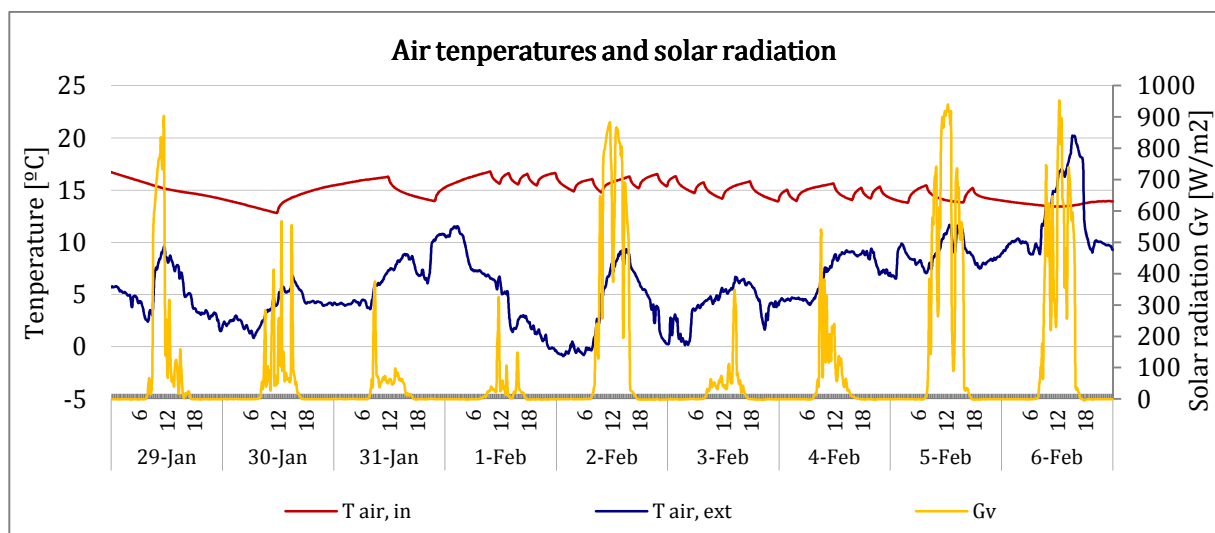


Fig. 4. 27. Arriba: Secuencia de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Febrero-2014-ILARGI)

En esta serie se pueden ver representados los días más fríos del año, llegando a mínimas por debajo de cero grados (Fig. 4. 27). La capa foliar (Layer 9) llega a alcanzar temperaturas próximas 0 °C pero las capas exteriores (Layer 8-7-6-5) se mantiene por encima de los 0 °C (Fig. 4. 28).

En las gráficas se puede observar la influencia de la termorresistencia y la temperatura exterior en la muestra de fachada vegetal. La temperatura del aire interior y las superficies interiores son, obviamente, más sensibles a la influencia de la termorresistencia, sobre todo cuando es un día nublado. Los días nublados 31 de enero, 1 y 3 de enero la radiación solar llega a máximos de 300 W/m². Estos días corresponden con los días de temperatura más bajas. La superficie exterior de la fachada vegetal (Layer 8) no está prácticamente afectada por las variaciones interiores.

Por el contrario, los días en los que la radiación solar está presente con hasta 900 W/m², como es el caso de los días 2, 5 y 6 de febrero la temperatura exterior alcanza máximas de 20 °C, temperatura que se ve reflejada en las capas exteriores de la fachada vegetal (Layer 6-8)(Fig. 4. 28).



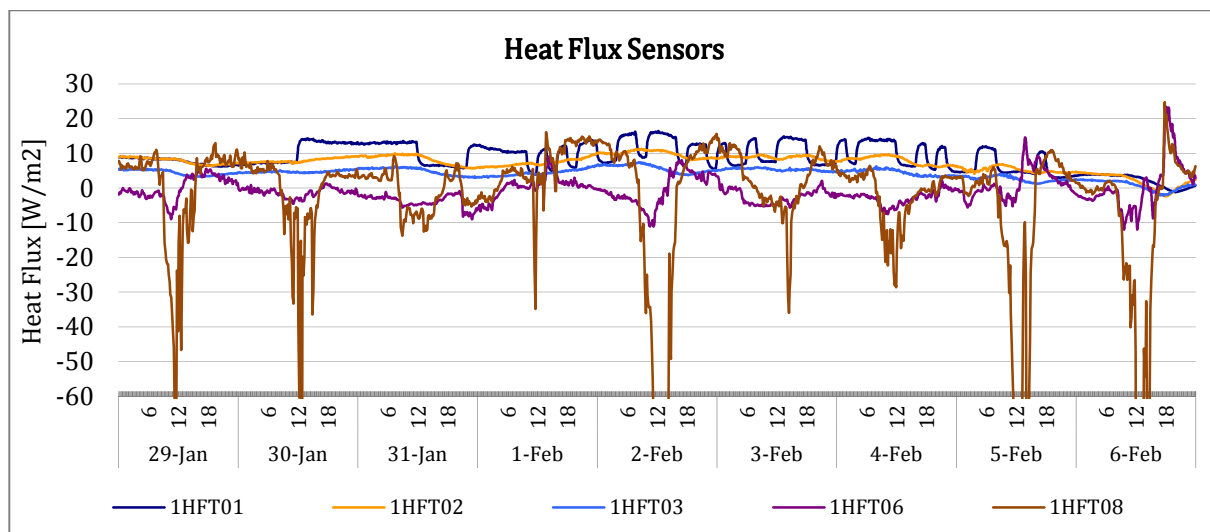


Fig. 4. 28. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Enero 2014- ILARGI)

3.4.8 SECUENCIA X: Fachada vegetal Mayo 2014

En las siguientes imágenes (Fig. 4. 29) se observa el estado del desarrollo vegetativo de las plantas. A lo largo de esta secuencia de muestreo llevada a cabo en Mayo de 2014, las plantas se encuentran en plena floración alcanzado sus tallos los 50 cm de longitud media.



Fig. 4. 29. Detalle de la fachada vegetal en Mayo de 2014 durante los ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

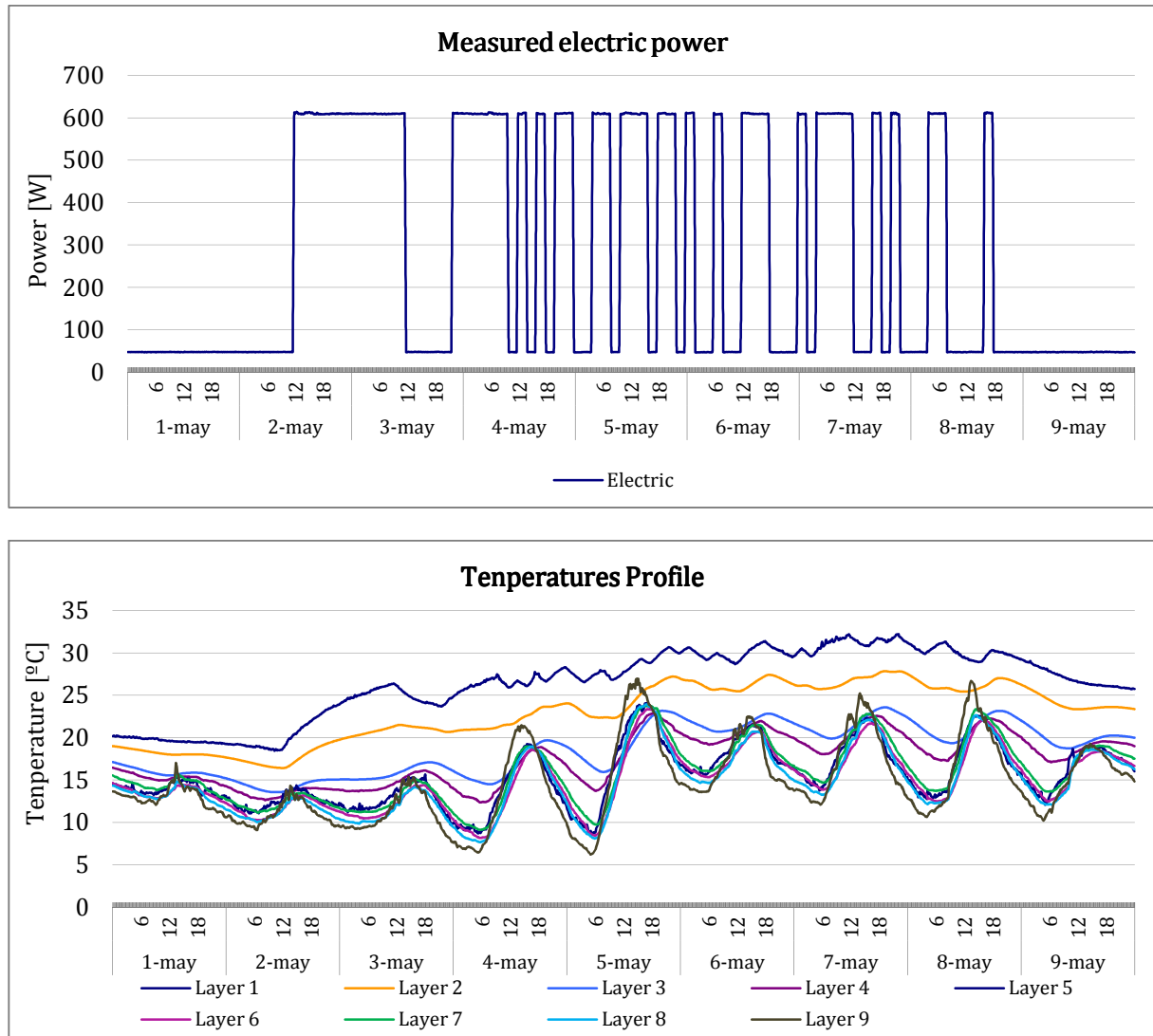


Fig. 4. 30. Arriba: Secuencia de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Mayo-2014-ILARGI)

En la Fig. 4. 30 se muestra la señal de entrada de calor PRBS llevado a cabo sobre la muestra vegetal, la amplitud de los pulsos se han doblado para comprobar las posibles no linealidades del flujo de calor, para ello se ha cambiado a una termorresistencia de 600W.

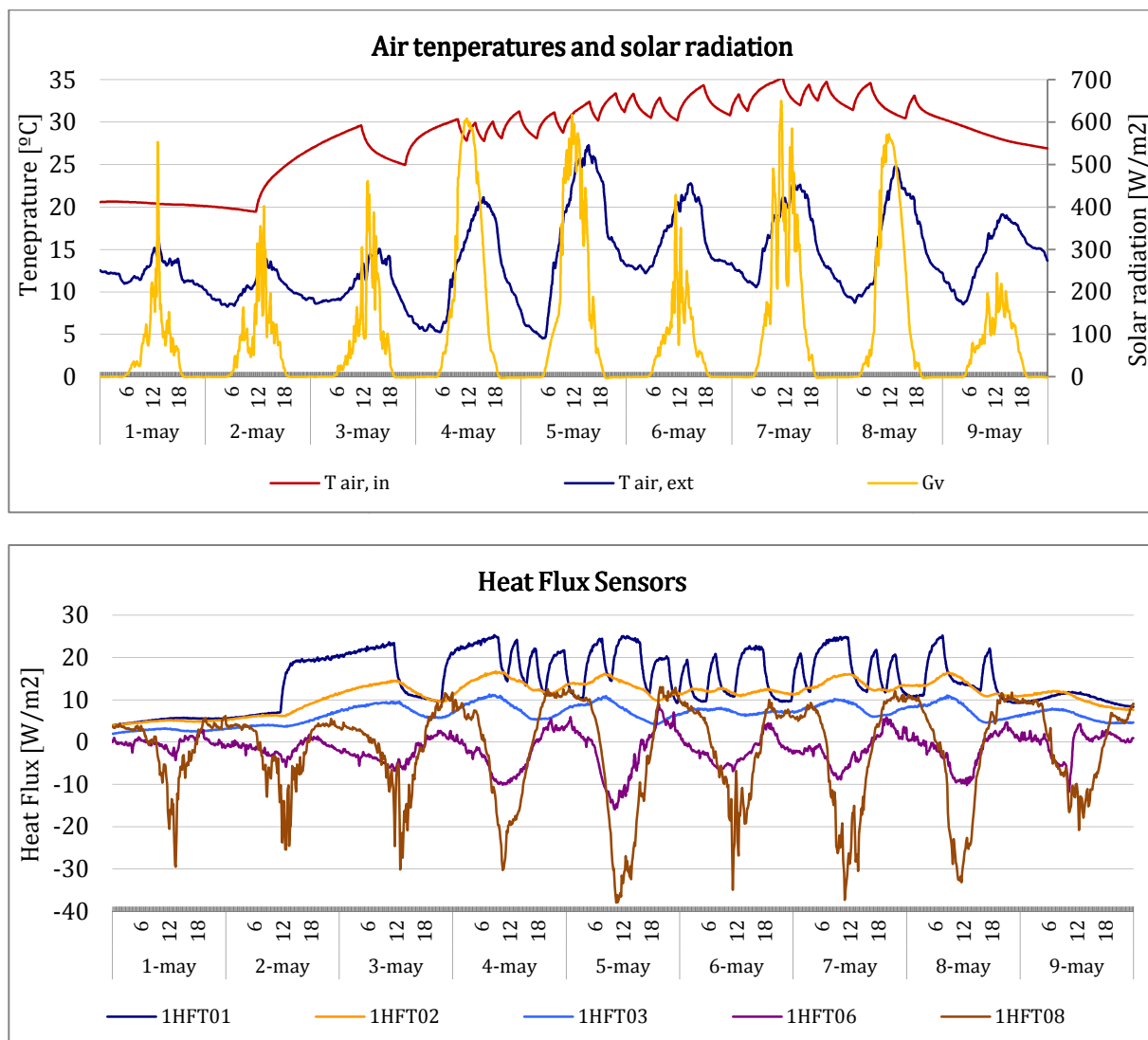


Fig. 4. 31. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Mayo 2014- ILARGI)

Hay dos aspectos significativos a destacar en esta gráficas, por un lado, la importancia de la radiación solar sobre las capas exteriores de la muestra (Layer 5-8), por otro lado, la influencia de los pulsos de calor sobre las dos capas internas de la muestra (Layer 1-2).

Se puede observa como sobre la temperatura exterior, el aumento de la temperatura en las horas centrales del día y la disminución de esta en las horas nocturnas debido al ciclo día/noche.

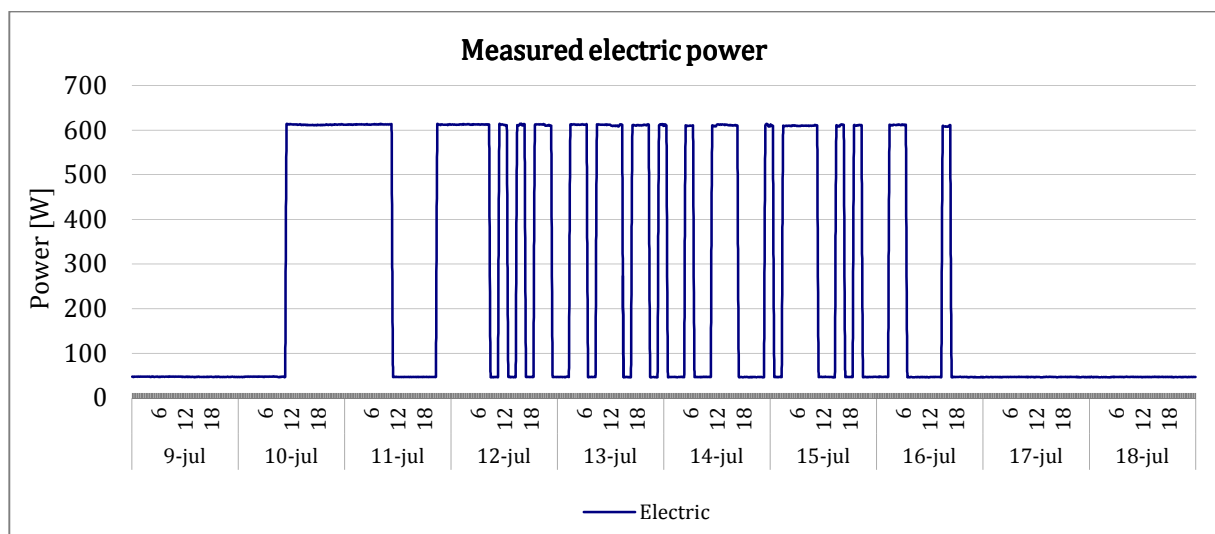
3.4.9 SECUENCIA XI: Fachada vegetal Julio 2014

En la siguiente Fig. 4. 32 se puede ver el desarrollo vegetativo de las plantas durante la siguiente secuencia de ensayo. Se observa el final de la floración y el comienzo de la marchitez de las inflorescencias.



Fig. 4. 32. Detalle de la fachada vegetal en Julio de 2014 durante los ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:



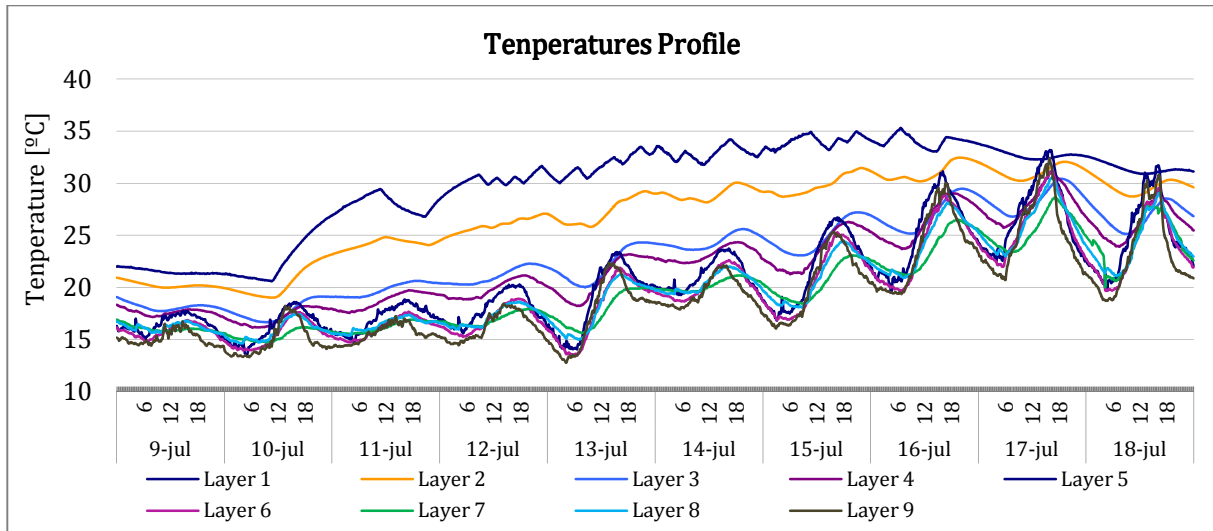
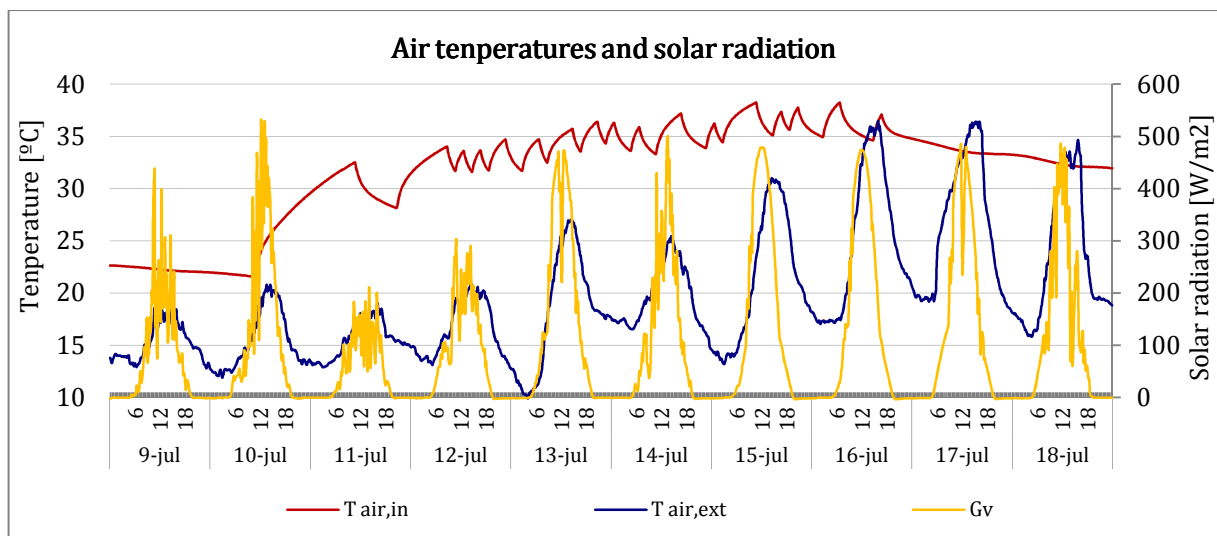


Fig. 4. 33. Arriba: Secuencia de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Julio-2014-ILARGI)



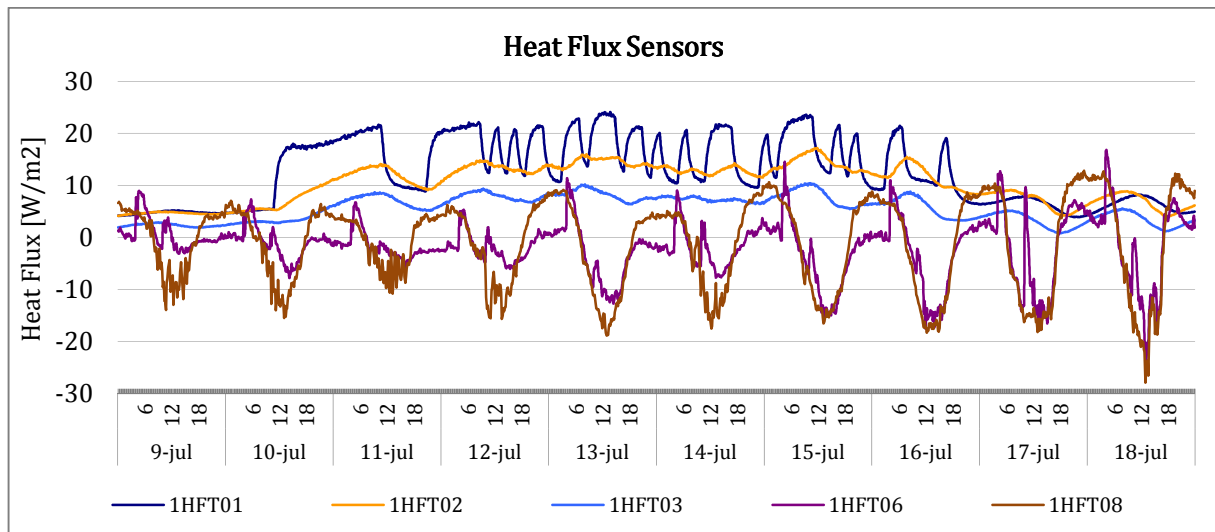


Fig. 4. 34. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Julio 2014- ILARGI)

Observando los gráficos anteriores, hay algunos puntos a comentar. En primer lugar, la secuencia de potencia medida y representada en la Fig. 4. 33 se muestra paralelamente en la figura 4. 34 produciendo cambios en la temperatura de las diferentes capas. Por otro lado, el flujo de calor fluye desde el punto más caliente (interior de la celda, termorresistencia) al punto más frío (ambiente exterior). Este flujo de calor se puede observar a lo largo de todo el gráfico, de adentro hacia afuera, sobre todo cuando la termorresistencia está en funcionamiento. Se ve como el calor producido por la termorresistencia calienta el aire en el interior de la celda, a continuación atraviesa las particiones interiores de la muestra hasta llegar a la superficie interior de la fachada vegetal, desde la superficie interior de la fachada vegetal continua a la superficie exterior de la fachada vegetal, y finalmente, se libera el calor al ambiente exterior. La inercia térmica de cada elemento se muestra así en el gráfico. Cuando el calentador está encendido, la temperatura del aire interior presenta una respuesta rápida a su variación.

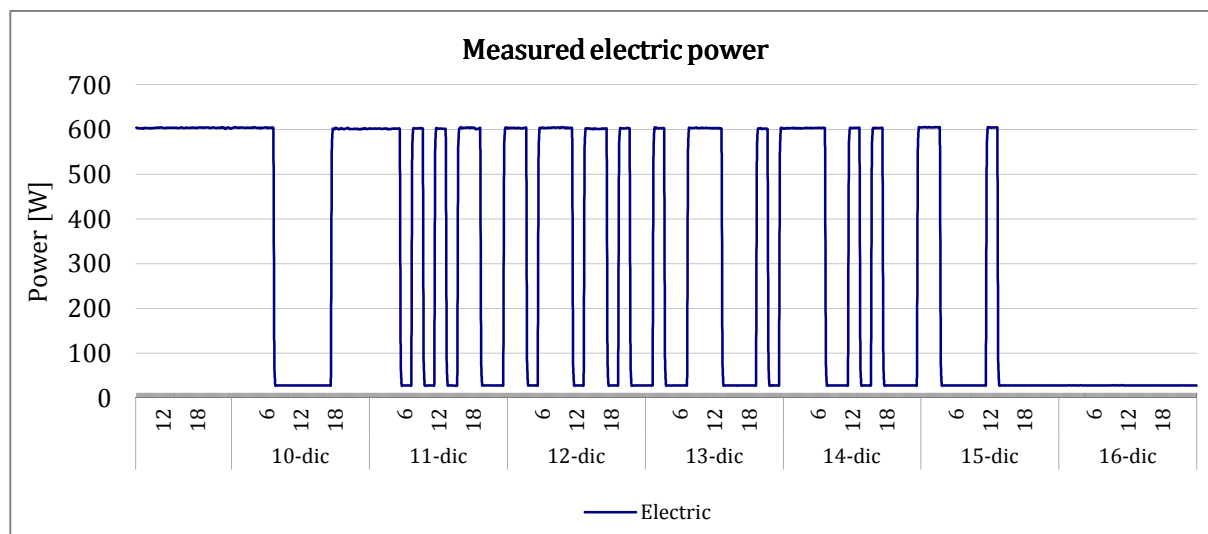
3.4.10 SECUENCIA XII: Fachada vegetal Diciembre 2014

El estado del desarrollo fenológico y vegetativo de la plantas a la lo largo de esta última secuencia PRBS que tuvo lugar a finales del año 2014 se observa en la siguiente Fig. 4. 35.



Fig. 4. 35. Detalle de la fachada vegetal en Diciembre de 2014 durante los ensayo PRBS en la célula de ensayo ILARGI

La secuencia de la señal PRBS y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:



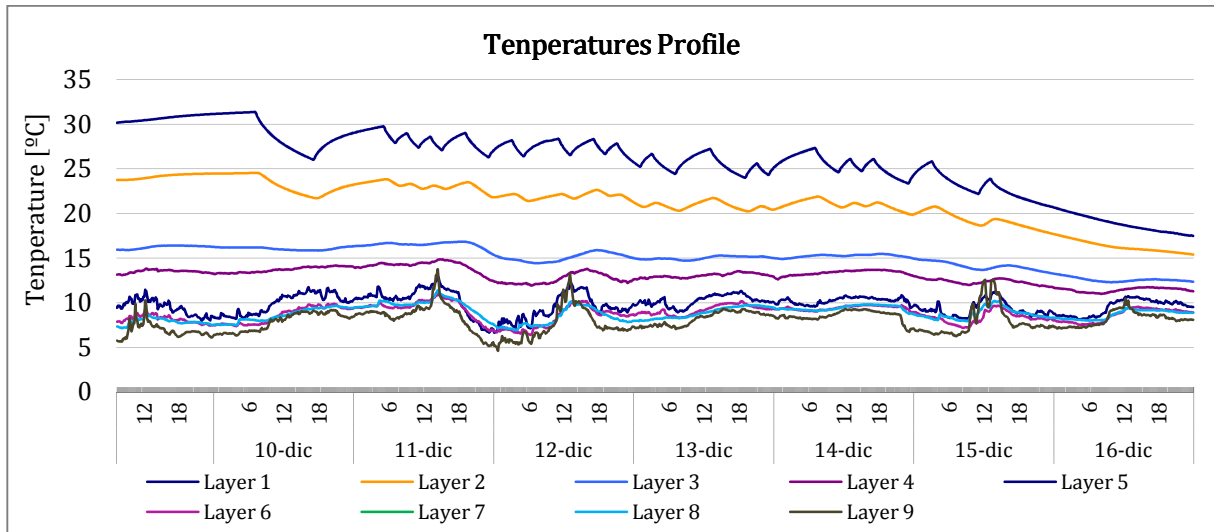
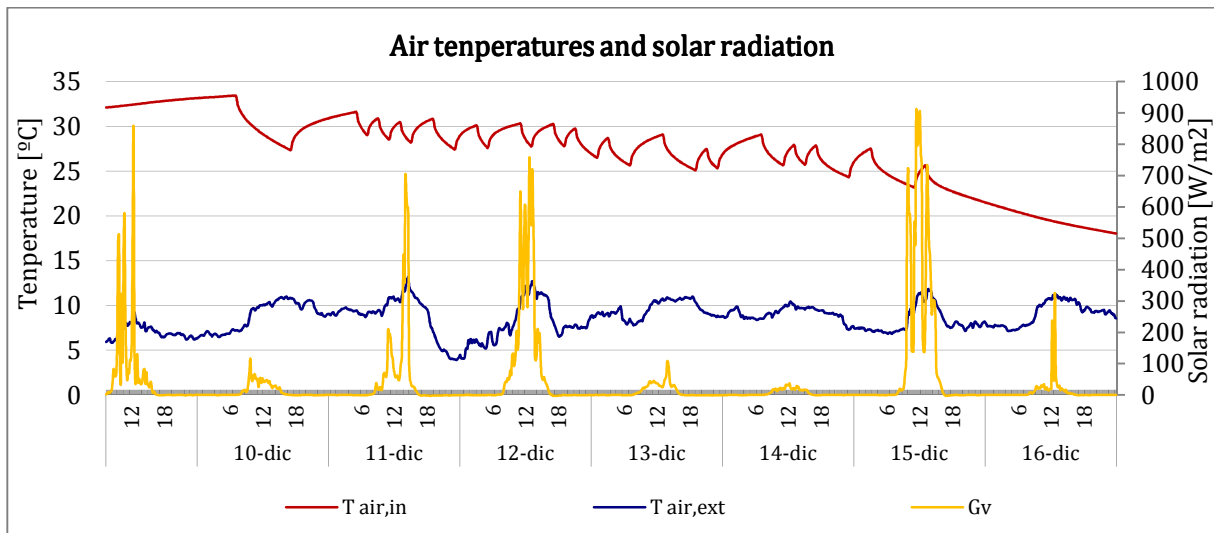


Fig. 4. 36. Arriba: Secuencia de PRBS realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia PRBS (Diciembre-2014-ILARGI)



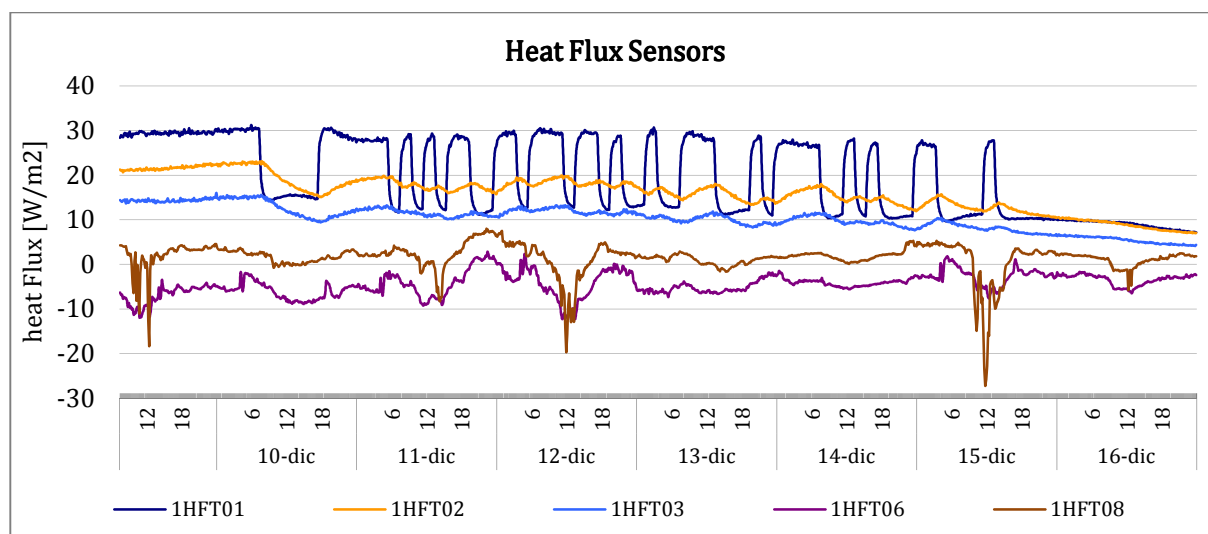


Fig. 4. 37. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Diciembre 2014-ILARGI)

Durante esta secuencia de ensayo realizada en invierno se observa un elevado gradiente de temperaturas entre el interior y exterior de la fachada vegetal, donde DT alcanza valores superiores a 20 °C entre ambas temperaturas registradas. Los gráficos muestran la influencia de la radiación solar en la temperatura de la superficie del aire exterior. No hay fluctuaciones importantes en la temperatura exterior día/noche debido a la baja incidencia solar durante este periodo.

3.5 Secuencia potencia constante

Las secuencias de potencia constante se pueden considerar secuencia de frecuencia cero. El objetivo de esta señal es de nuevo doble. En primer lugar, permite obtener series de datos que proporcionan la información sobre la respuesta a frecuencia cero del componente ensayado. En segundo lugar, la señal de flujo de calor no está correlacionada con las condiciones ambientales exteriores, debido a ello, mediante este análisis la identificación de los parámetros se lleva a cabo en condiciones óptimas.

3.5.1 SECUENCIA XIII: Fachada vegetal Febrero 2014 (300 W)

La secuencia de la señal a potencia constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

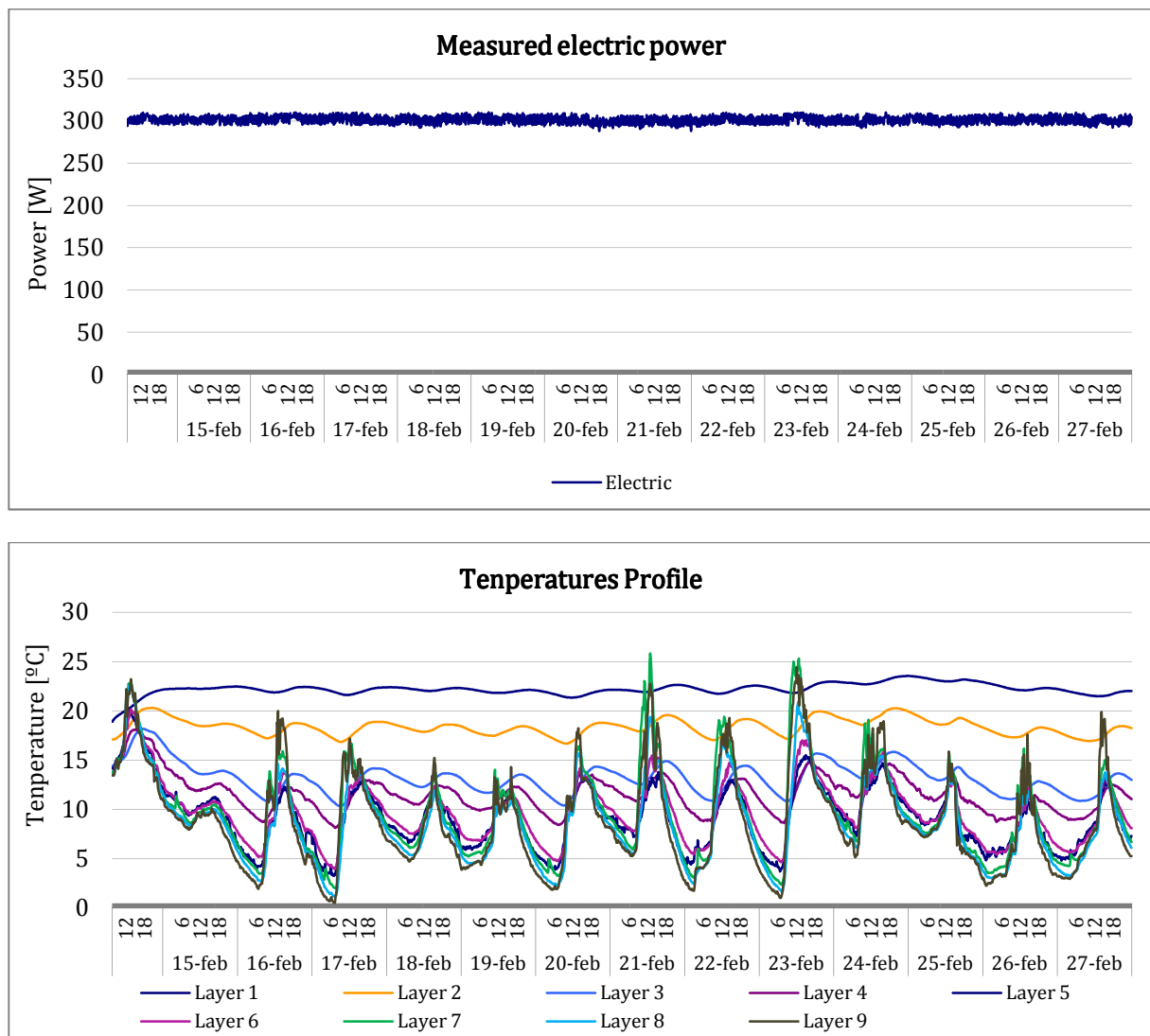


Fig. 4. 38. Arriba: Secuencia a potencia de 300 W constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Febrero-2013- EGUZKI)

La señal de pulso térmico a potencia constante de 300 W realizado a la muestra vegetal Fig.4.39 muestra como la temperatura de la primera capa de la muestra vegetal (Layer 1) se mantiene en torno a los 22 °C, la segunda capa (Layer 2) a 18 °C, la tercera capa (Layer 3) a 13 °C y la cuarta a (Layer 4) 10 °C. Por el otro lado, las capas exteriores (Layer 5-8) presentan fluctuaciones de su temperatura en función de la radiación solar, es decir durante las horas centrales del día alcanzan las máximas temperaturas de hasta 25 °C mientras que en las horas nocturnas, sin radiación solar, las temperaturas caen hasta los 0 °C.

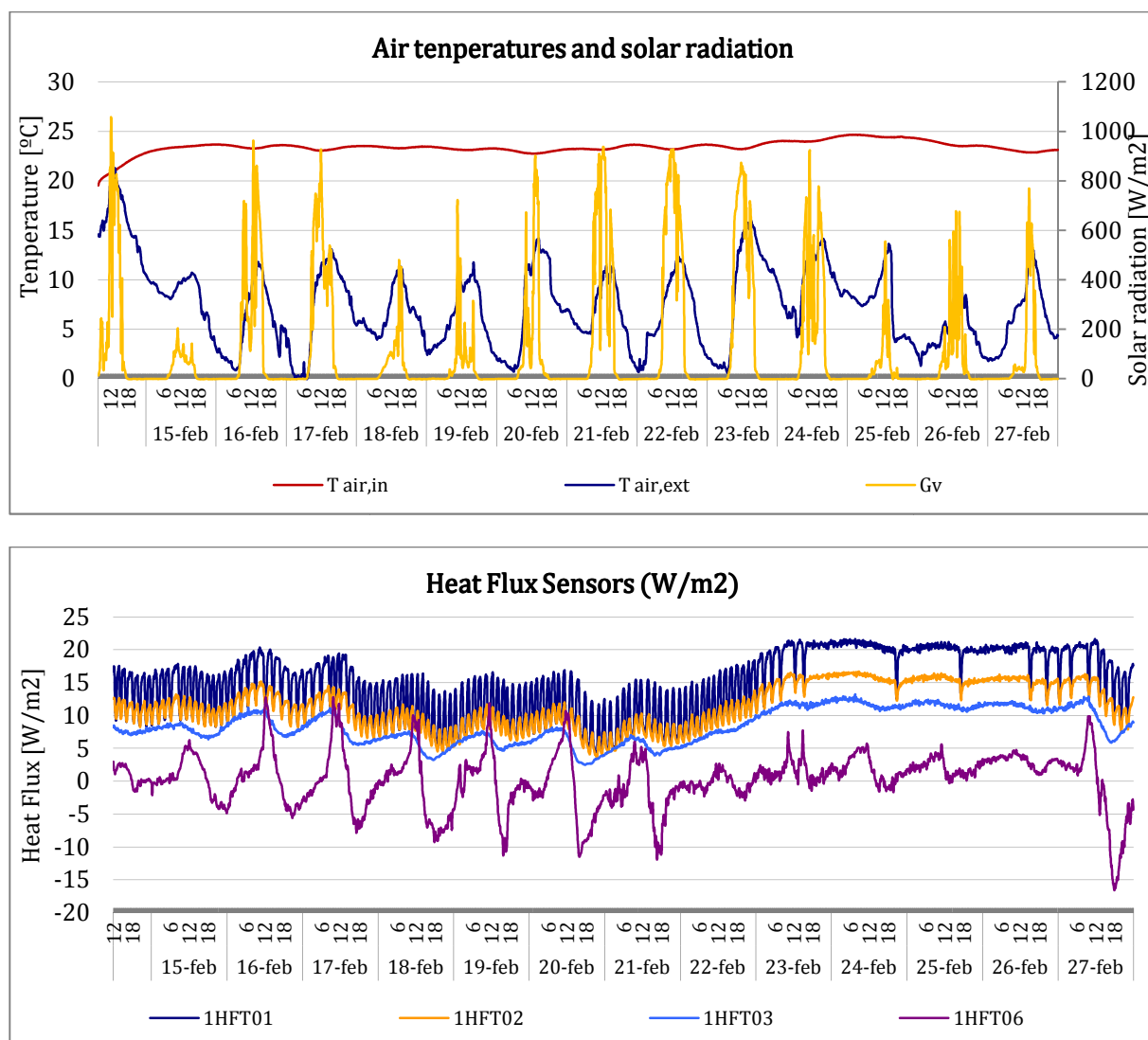


Fig. 4. 39. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Febrero-2013- EGUZKI)

3.5.2 SECUENCIA XIV: Fachada vegetal Abril 2014 (600 W)

La secuencia de la señal a potencia constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

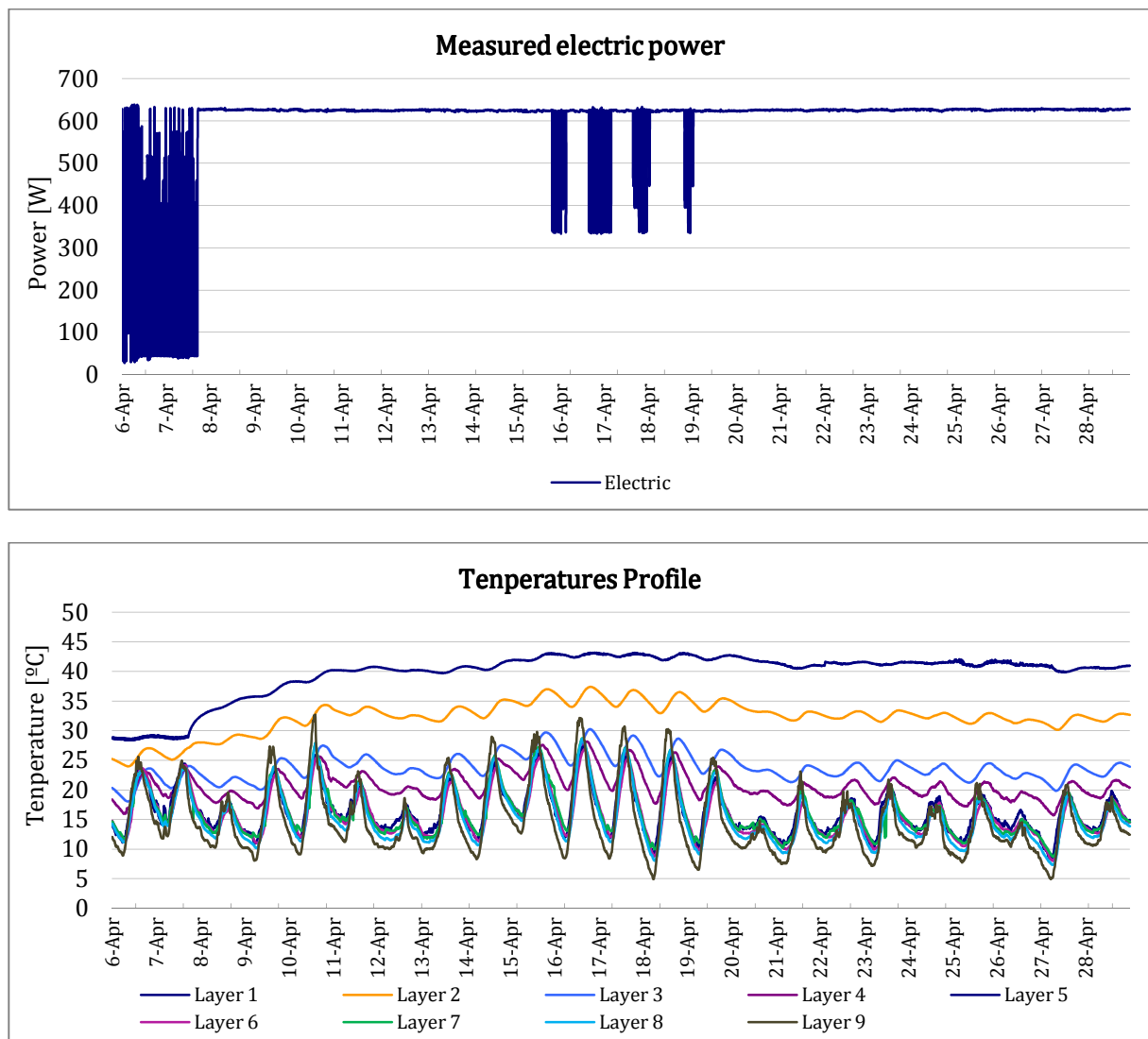


Fig. 4. 40. Arriba: Secuencia a potencia de 600 W constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Abril-2014- ILARGI)

Posterior al cambio de termorresistencia se llevó a cabo un segundo ensayo a potencia constante, en este caso con una señal de potencia constante de 600 W realizado sobre la muestra vegetal, ver Fig. 4. 41. A esta potencia la temperatura de la capa interior de la muestra se mantiene a 40 °C, llegando a máximos de 45 °C (Fig. 4. 41). Este máximo es el límite de sobrecalentamiento de la sala de ensayo, es un procedimiento de seguridad en el sistema de control que evita que la temperatura de ensayo en el interior de la celda supere los 45 °C. Por lo tanto, el sistema de seguridad limita la potencia provocando el apagado y encendido de la termorresistencia para mantener siempre la temperatura de prueba por bajo de los 45 °C.

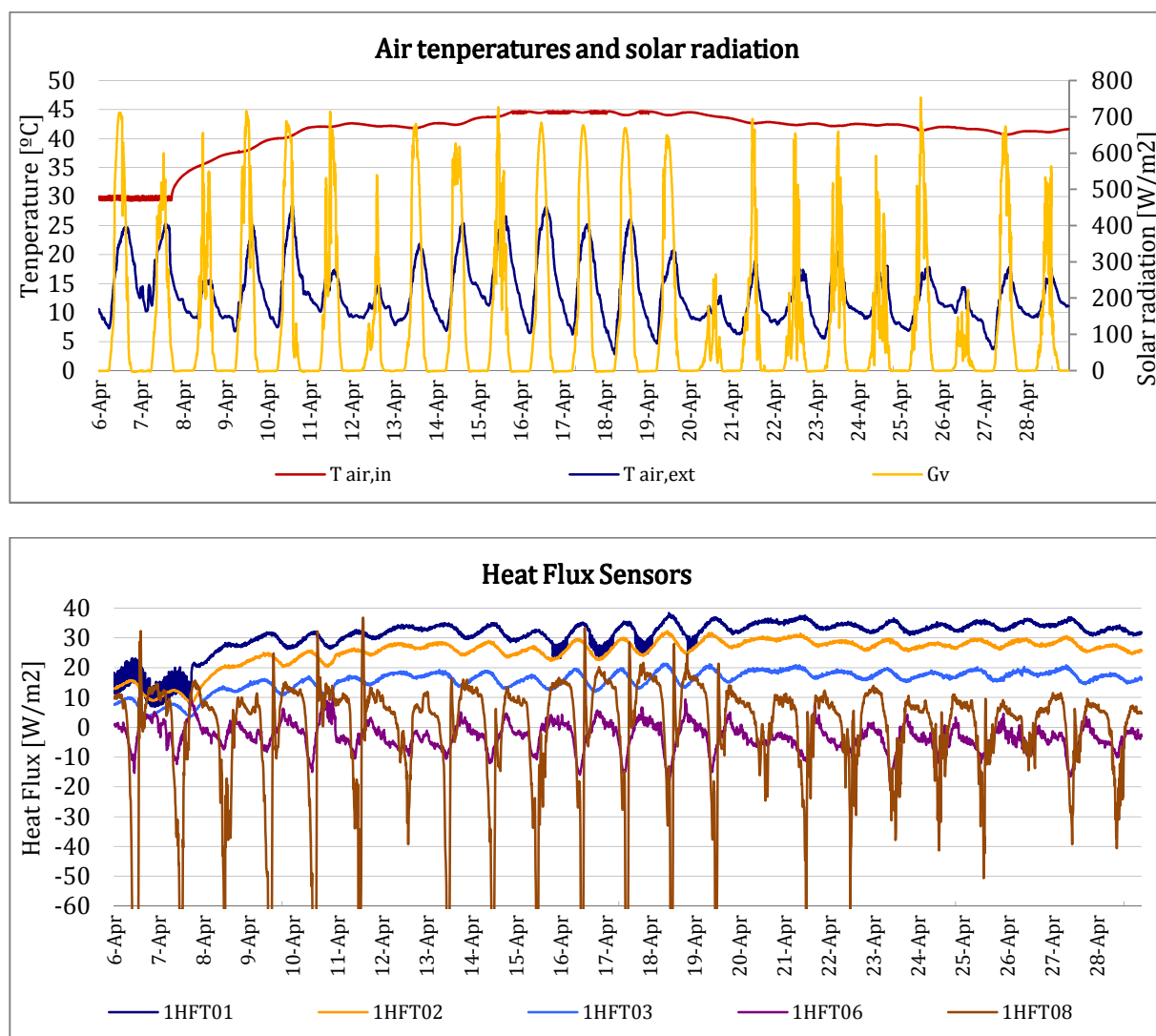


Fig. 4. 41. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Abril-2014- ILARGI)

A lo largo de esta secuencia se puede apreciar claramente el gradiente de temperaturas entre las diferentes capas que componen la fachada vegetal. La elevada temperatura 40-45 °C alcanzada en las capas internas (Layer 1-2) contrasta con las capas externas (Layer 5-8) 10 °C, alcanzando ΔT mayores a 35 °C durante los periodos nocturnos. Análogamente los flujos de calor de las diferentes capas siguen el gradiente de las temperaturas.

3.6 Secuencia temperatura constante

El objetivo principal de este tipo de secuencias de ensayo es la obtención de datos para los cálculos mediante el método de la media. Estas secuencias también pueden utilizarse para la validación de los modelos ya identificados. Las secuencias de temperatura constante se han elegido de tal manera que las condiciones de trabajo de los modelos durante las simulaciones sean similares a los de las secuencias de temperatura constante.

3.6.1 SECUENCIA XV: Fachada vegetal Febrero 2013 (20 °C)

Los días previos a la comienzo de la secuencia XV, del 8 al 11 de febrero, estuvo nevando como se puede ver en la Fig. 4. 42. Durante estos días, la radiación solar fue baja y la temperatura máxima exterior no alcanzó los 8 °C.



Fig. 4. 42. Fotografía de la fachada vegetal nevada el día 10 de febrero de 2013

La secuencia de la señal a temperatura constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire

interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

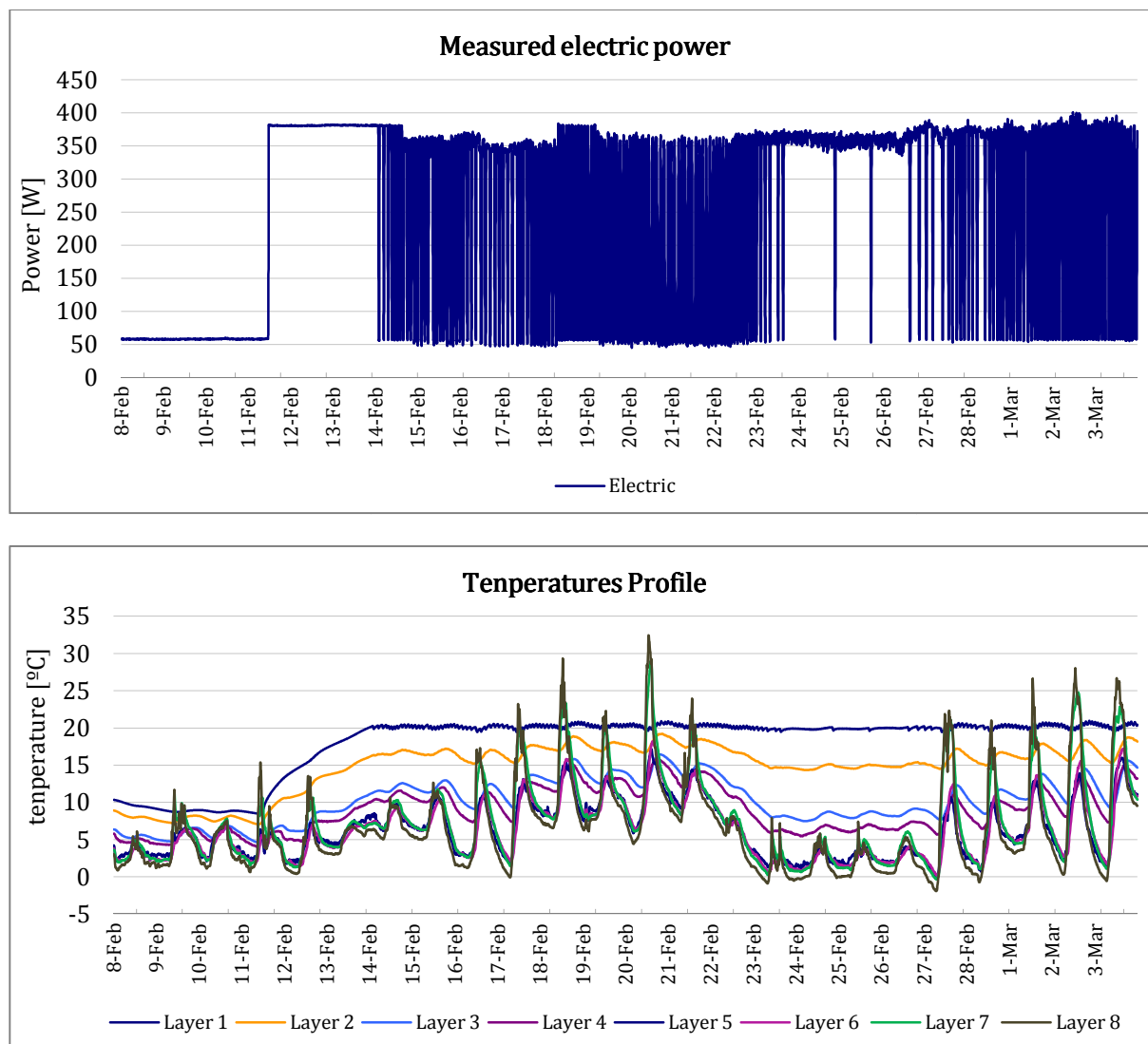


Fig. 4. 43. Arriba: Secuencia a 20 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Febrero 2013-EGUZKI)

En la gráfica anterior (Fig.4. 43) se puede observar las constantes fluctuaciones en la potencia debidas a las constantes puestas en marcha y paradas de la termorresistencia para mantener a temperatura constante la celda de ensayo. Como se observa, cuando la termorresistencia está apagada los 50 W de potencia corresponden a la potencia de

funcionamiento del ventilador. Estas mismas fluctuaciones son patentes en los fluxómetros 1HFT01 y 1HFT02.

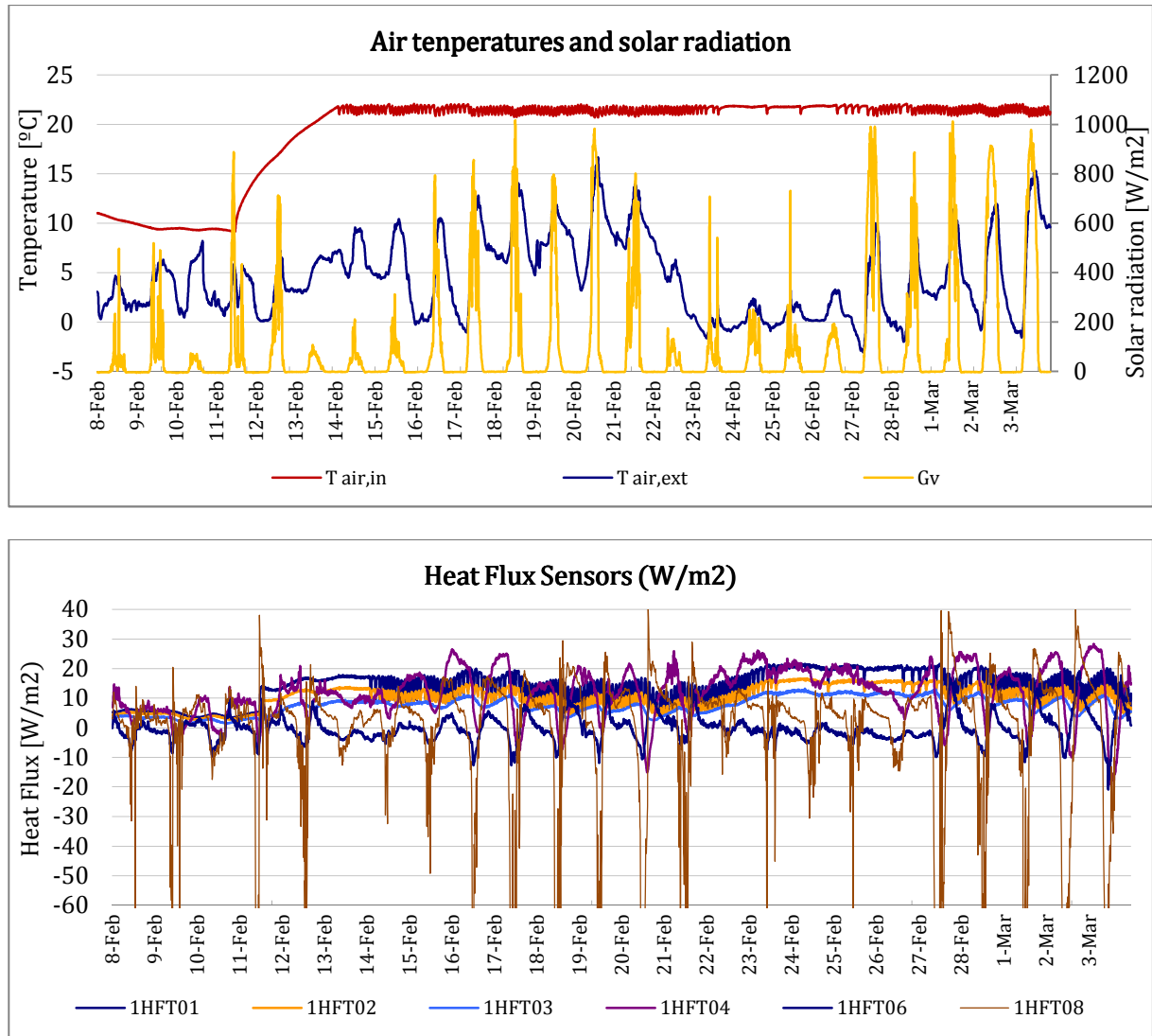


Fig. 4. 44. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Febrero 2013- EGUZKI)

Los días de radiación solar elevada como son los días 18 y 20 de febrero, alcanzando máximas de 100 W/m² la temperatura exterior llega a los 15 °C, mientras que las capas exterior de la muestra, tanto la capa foliar como la parte exterior de modulo vegetal alcanzan los 30 °C en las horas centrales del día, reduciéndose hasta los 5 °C en las horas nocturnas sin radiación solar.

3.6.2 SECUENCIA XVI: Fachada vegetal Enero 2014 (20 °C)

La secuencia de la señal a temperatura constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

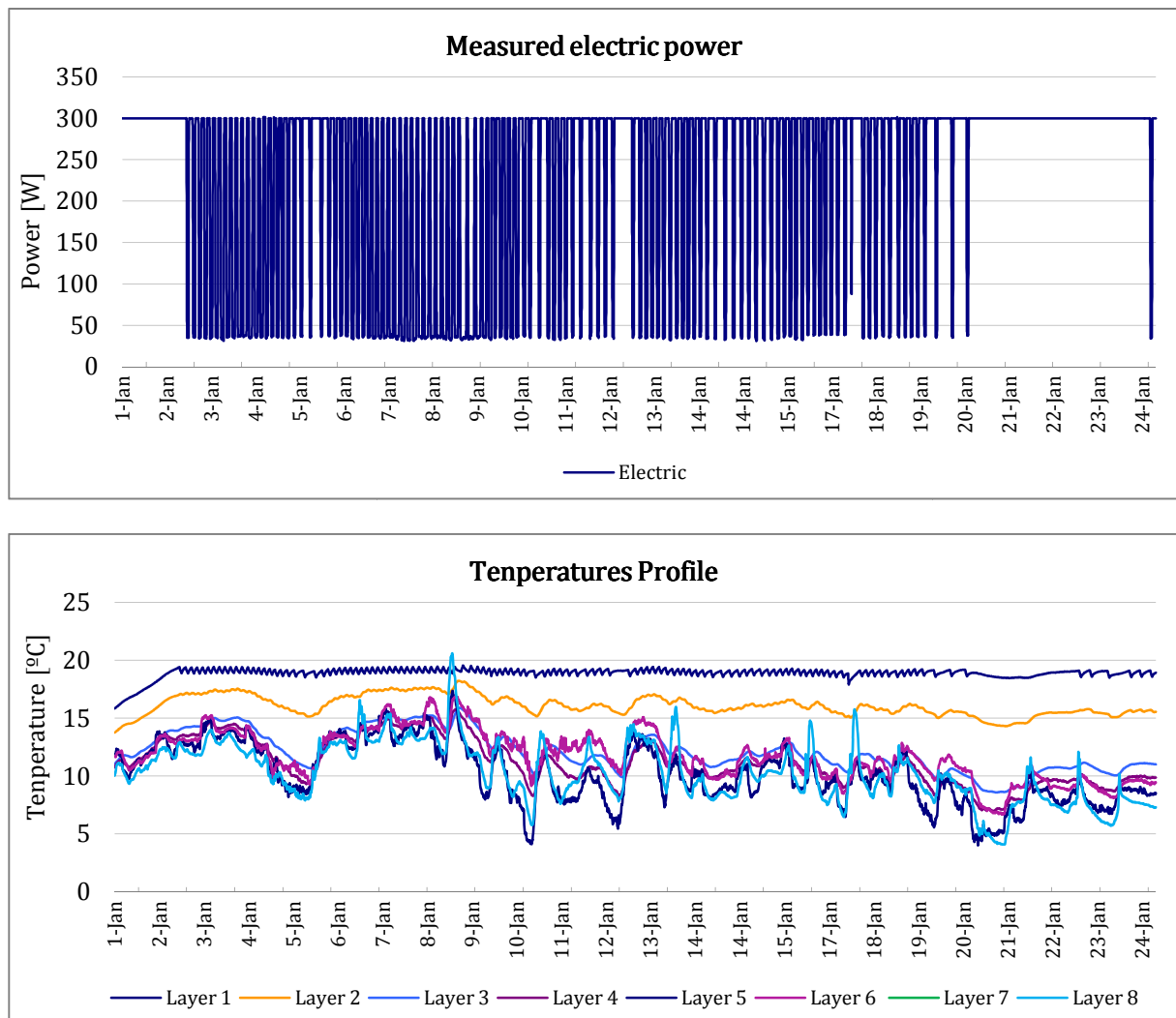


Fig. 4. 45. Arriba: Secuencia a 20 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Enero 2014-ILARGI)

Esta secuencia de ensayo se ha llevado a cabo en condiciones invernales (enero 2014) donde la radiación solar y la temperatura del aire al aire exterior son bajas y con pocas fluctuaciones. Este hecho se puede ver en la Fig. 4.46, donde la temperatura del aire exterior no fluctúa demasiado y se mantiene por debajo de los 15 °C llegando a mínimas de 0 °C.

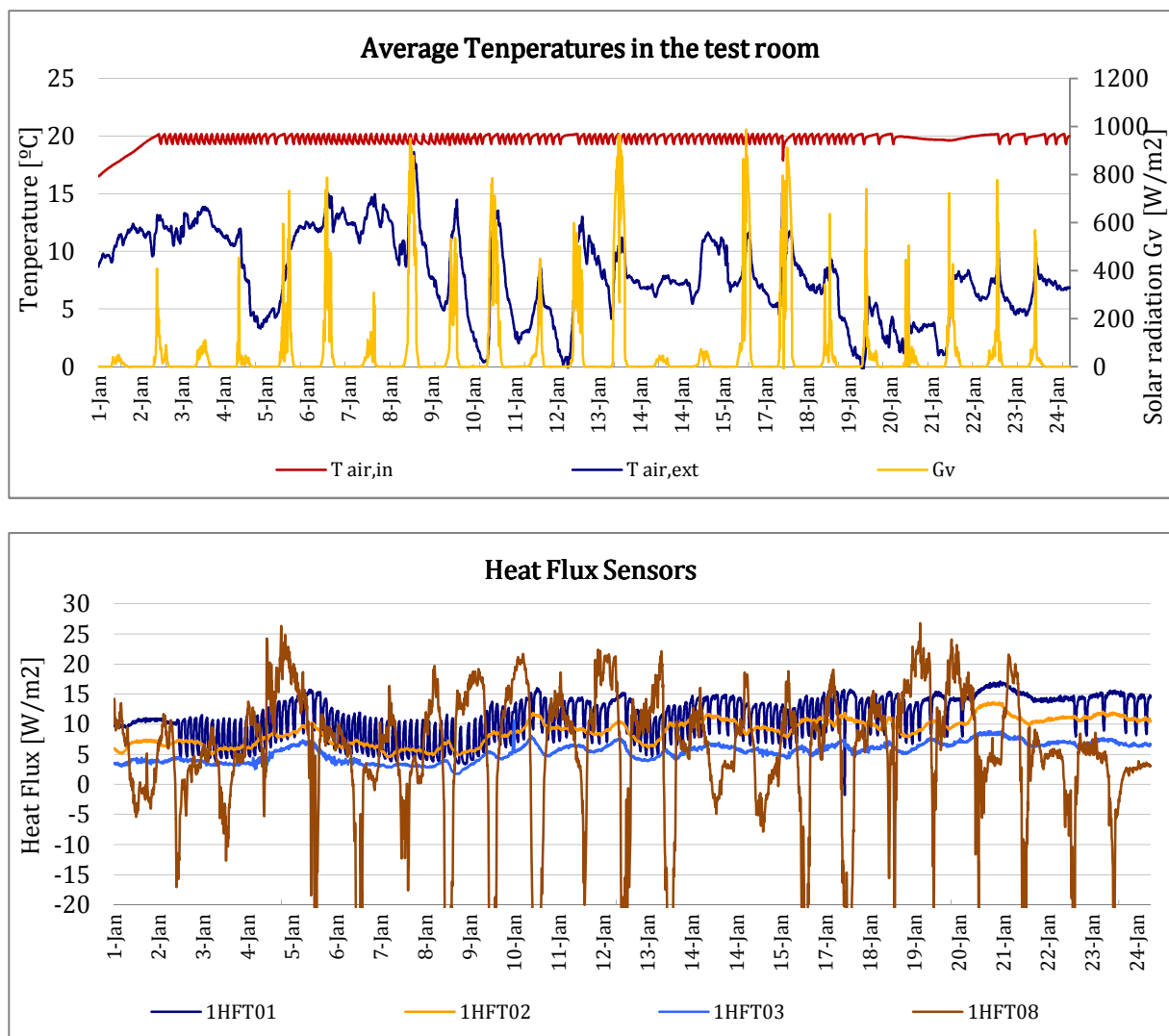


Fig. 4. 46. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Enero 2014- ILARGI)

La temperatura del aire interior de la celda se mantiene en 20 °C, mientras que la capa interna de la muestra (Layer 1) no alcanza esta temperatura y se mantiene sobre los 19 °C debido a las pérdidas térmicas. La Layer 2 se mantiene constante alrededor de los 16

°C. El resto de capas que componen la muestra de la fachada vegetal y sobre todo las capas externas (Layer 5-8) están a temperaturas muy parecidas a la temperatura exterior 10 °C.

La radiación solar en esta época del año alcanza picos de 1000 W/m², a pesar de su elevado valor, la temperatura de la capa externa (Layer 8) no varía mucho debido a que en gran parte es anulada por la vegetación. Si realizamos la comparación con la Fig. 4.43. donde la secuencia de ensayo llevada a cabo es la misma pero el estado vegetativo de las plantas es menor, se comprueba que la vegetación es capaz de reducir un gran porcentaje de la radiación solar incidente lo que provoca que la temperatura se mantenga muy próxima a la temperatura exterior. Por el contrario, cuando la fachada exterior está cubierta por material inerte, como es el caso de una fachada ventilada cerámica clásica o por una fachada vegetal poco desarrollada vegetativamente, la temperatura del exterior de la fachada alcanza temperaturas mayores a las del aire exterior.

3.6.3 SECUENCIA XVII: Fachada vegetal Marzo 2014 (30 °C)

La secuencia de la señal a temperatura constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación.

El día 3 de marzo se quemó la termorresistencia de 300 W de la célula de ensayo ILARGI, por lo que no se volvieron a tomar datos hasta el 7 de marzo, ya con una nueva termorresistencia. La peculiaridad de esta nueva termorresistencia de 400 W es su controlador interno, que no le permite sobrecalentarse produciendo el encendido y apagado constantemente, por lo que no es válida para realizar los ensayos. Por este motivo, se volvió a cambiar de termorresistencia el 21 de marzo por una termorresistencia de 600 W de potencia, en este caso sin ningún tipo de controlador interno ver Fig. 4.47.

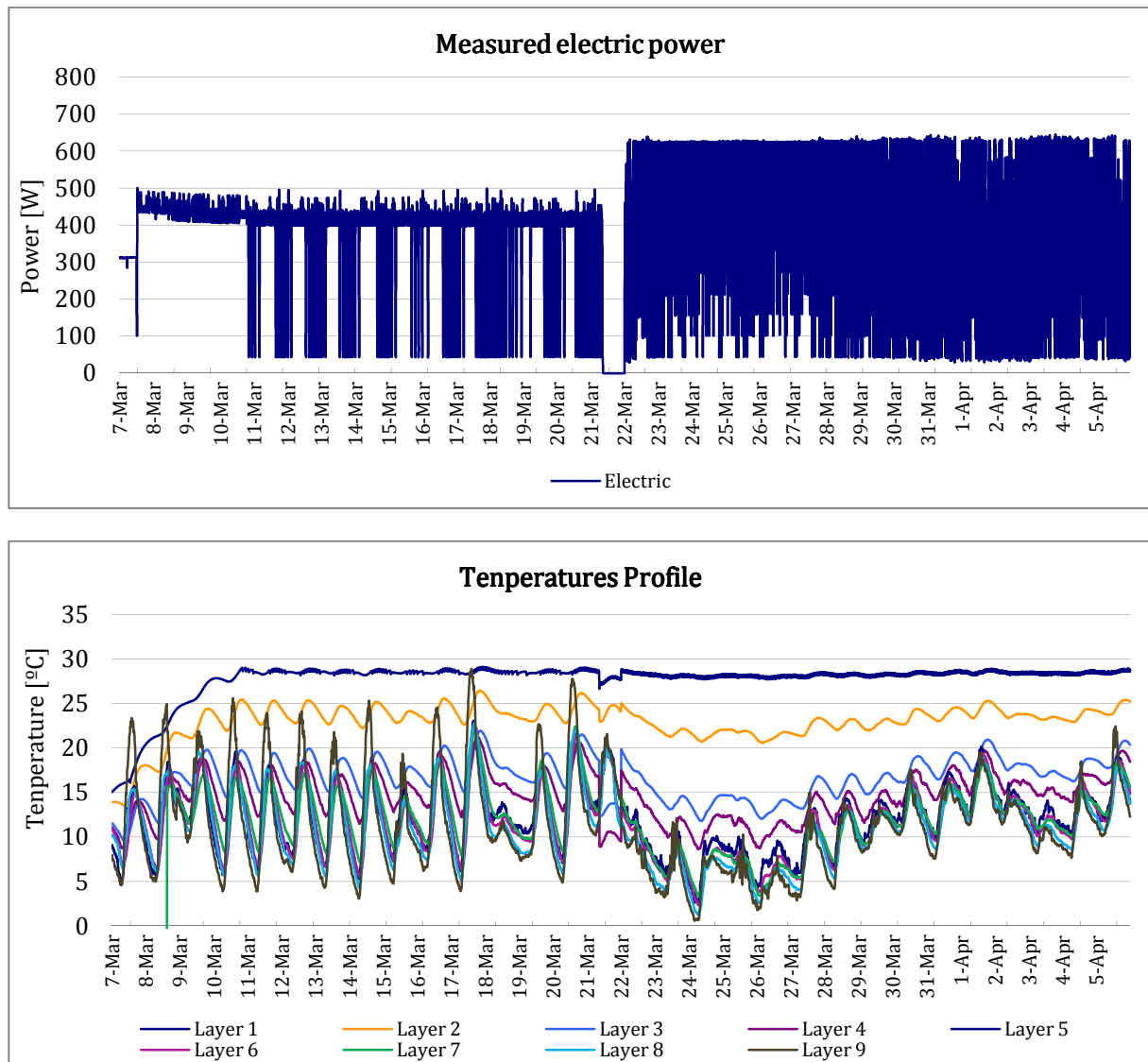


Fig. 4. 47. Arriba: Secuencia a 30 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Marzo 2014-ILARGI)

Lo más representativo de esta secuencia a 30 °C constante es el elevado gradiente térmico conseguido al final de la serie, alcanzando una diferencia de temperatura de 20°C.

Como se puede observar en las figuras 4 .47 y 4. 48 la temperatura del aire interior de la celda permanece constante en 30 °C y para ello la termorresistencia se encuentra realizando secuencias de encendido y apagado de forma constante. Estas secuencias se

ven caracterizadas por los flujos de calor (1HFT01) que presenta estas mismas secuencias.

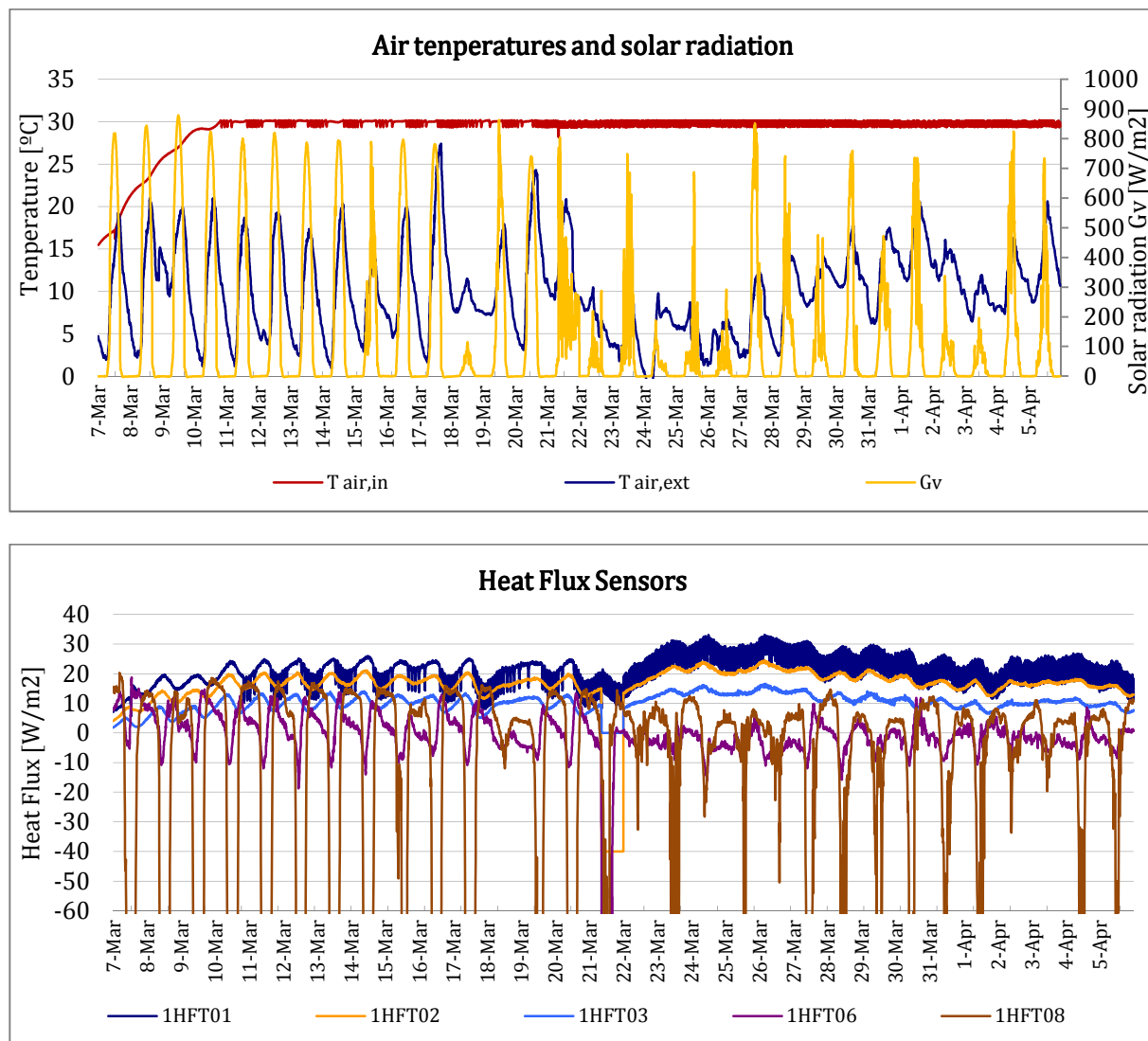


Fig. 4. 48. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Marzo 2014-ILARGI)

En la anterior gráfica (Fig. 4. 48) destacan las temperaturas de las layer 7-8-9 las cuales se encuentran muy cercanas a la temperatura exterior a pesar de la altísima radiación incidente, debido al efecto de la evapotranspiración llevado a cabo por las plantas el cual absorbe en gran medida esta radiación mediante la evapotranspiración. Este efecto aporta poder refrigerante a la fachada vegetal, manteniendo así la capa externa de la fachada en temperaturas cercanas a las del aire exterior.

3.6.4 SECUENCIA XVIII: Fachada vegetal Junio 2014 (30 °C)

La secuencia de la señal a temperatura constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

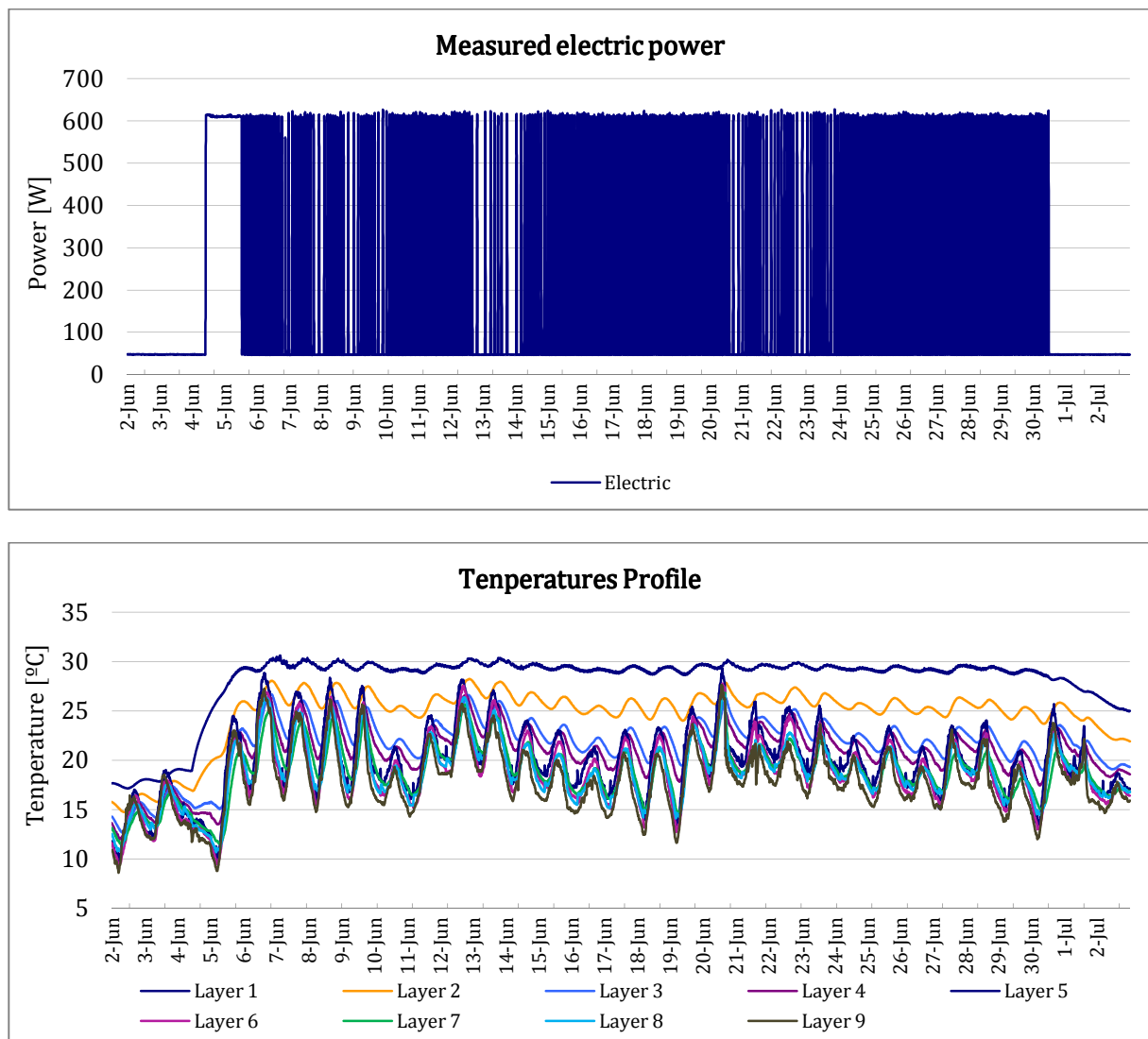


Fig. 4. 49. Arriba: Secuencia a 30 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Junio 2014-ILARGI)

En estas condiciones a temperatura constante se obtienen condiciones de casi estado estacionario. De hecho, la temperatura del aire interior junto con la temperatura de las Layer 1 y 2 puede considerarse constante una vez que la temperatura del aire interno se ha estabilizado (véase la Fig. 4. 49). Las restantes capas (Layer 5-8) están más afectadas por las fluctuaciones de la temperatura del aire exterior.

Cabe señalar que la temperatura de la Layer 9, vegetación, no supera los 30 °C cuando la temperatura exterior sobrepasa los 30 °C, es decir la vegetación impide que la temperatura siga aumentada en la cara externa de la fachada.

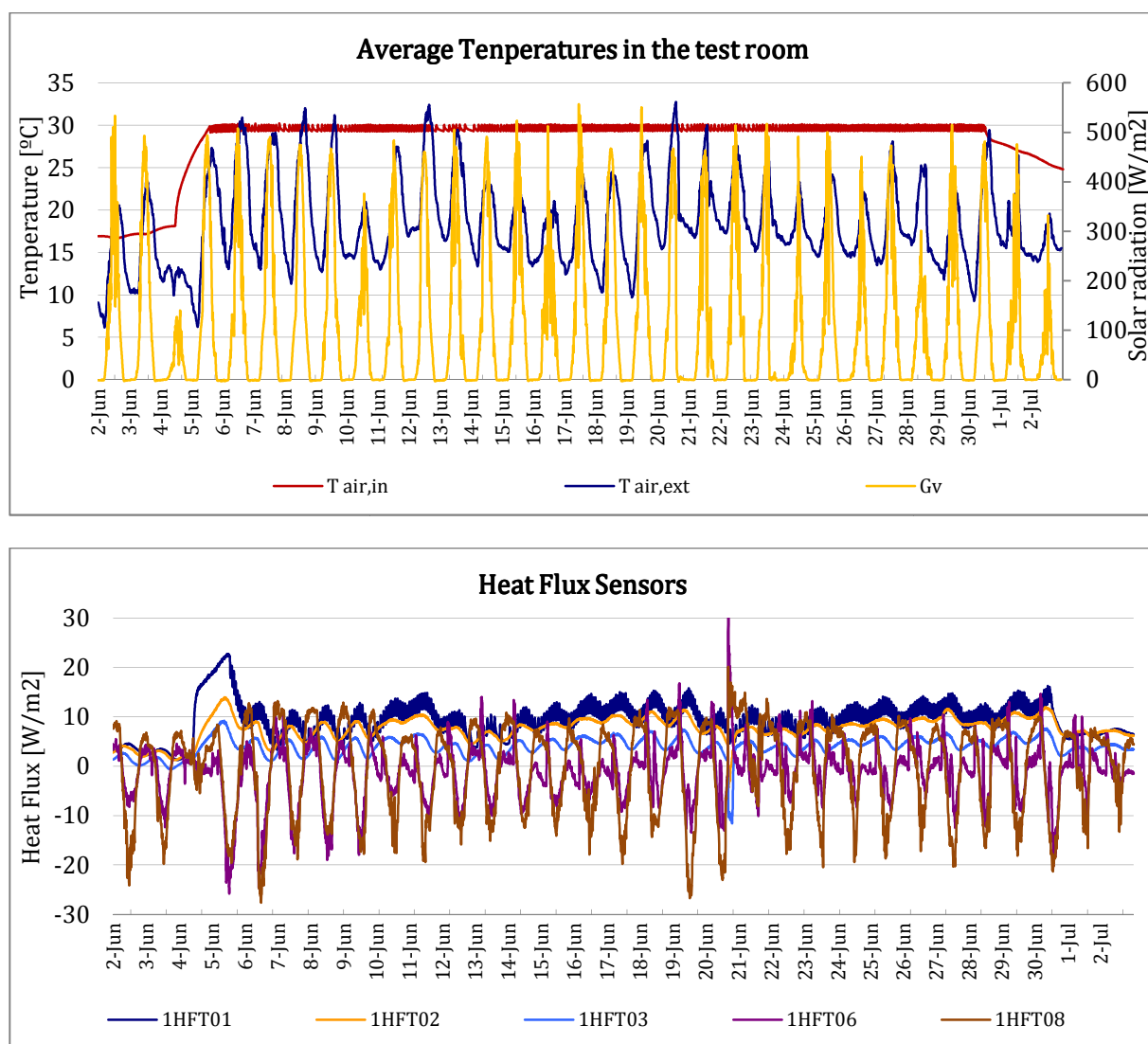


Fig. 4. 50. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Junio 2014- ILARGI)

3.6.5 SECUENCIA XIX: Fachada vegetal Agosto 2014 (10 °C)

Durante los meses de julio y agosto se llevó a cabo la instalación, en la célula Paslink, de un sistema de refrigeración mediante una unidad enfriadora de 2200 W en el exterior de la célula de ensayos. La temperatura del interior de la celda se programó para que no bajase de 1 °C ya que por debajo de esta temperatura se producen cambios de fase y esto puede dar lugar a errores en la caracterización de los diferentes componentes.

El sistema consta de tres circuitos (Fig. 4. 51). El primero de los circuitos, se encuentra dentro de la enfriadora, contiene el fluido frigorífico R404-A y cumple el clásico ciclo de refrigeración con su respectivo compresor, evaporador, condensador y válvula de expansión. Este es el encargado de absorber el calor del segundo circuito que contiene el agua glicolada.



Fig. 4. 51. Izda.: Detalle de la maquina enfriadora y el tanque pulmón. Centro: bomba de aire y variador de frecuencia. Dcha.: intercambiador de calor y válvulas de paso a la celda de ensayo.

El segundo circuito conecta la maquina enfriadora y el intercambiador de calor que se encontrará situado de tal manera que absorba adecuadamente el calor del tercer circuito de aire y sea capaz de enfriarlo. Este segundo circuito cuenta con un tanque pulmón aislado para disponer en todo momento y de forma rápida de agua glicolada para refrigerar.

El tercer circuito es el encargado de suministrar el caudal de aire necesario a la sala de ensayos a través de una bomba de aire cuya potencia máxima de refrigeración es de 500 W. Este circuito cuenta con un caudalímetro a la salida que está conectado al controlador. Este es el encargado de actuar sobre el variador de frecuencia de las

bombas de aire para aumentar o disminuir el caudal en función de la diferencia de temperaturas entre el aire de entrada y la temperatura de la cámara de ensayos.

La secuencia de la señal de potencia junto a las temperaturas de entrada y salida de la celda de ensayo y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra se muestra a continuación.

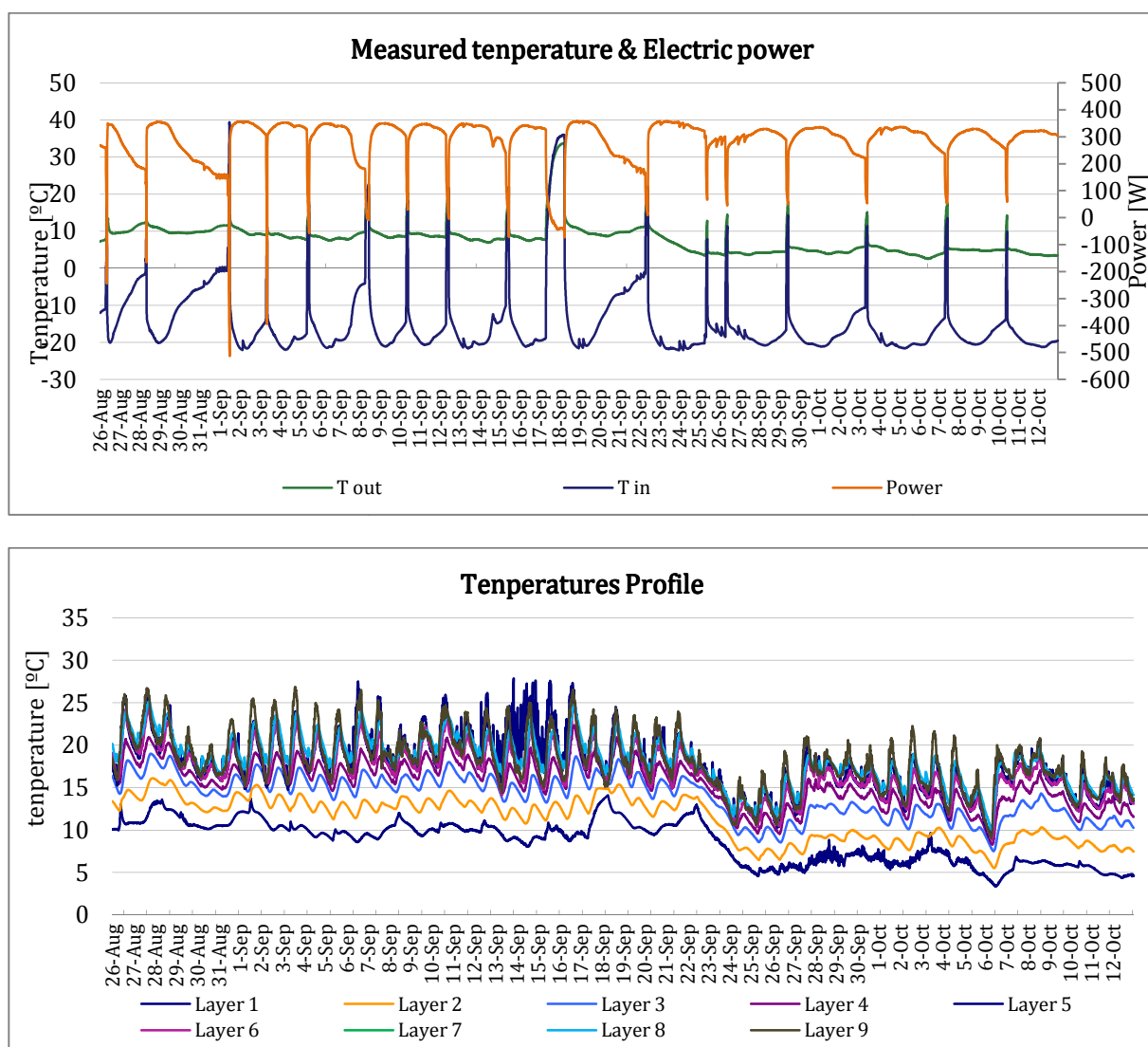


Fig. 4. 52. Arriba: Secuencia a 10 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto 2014-ILARGI)

En las siguientes graficas (Fig. 4.53) se observa la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal.

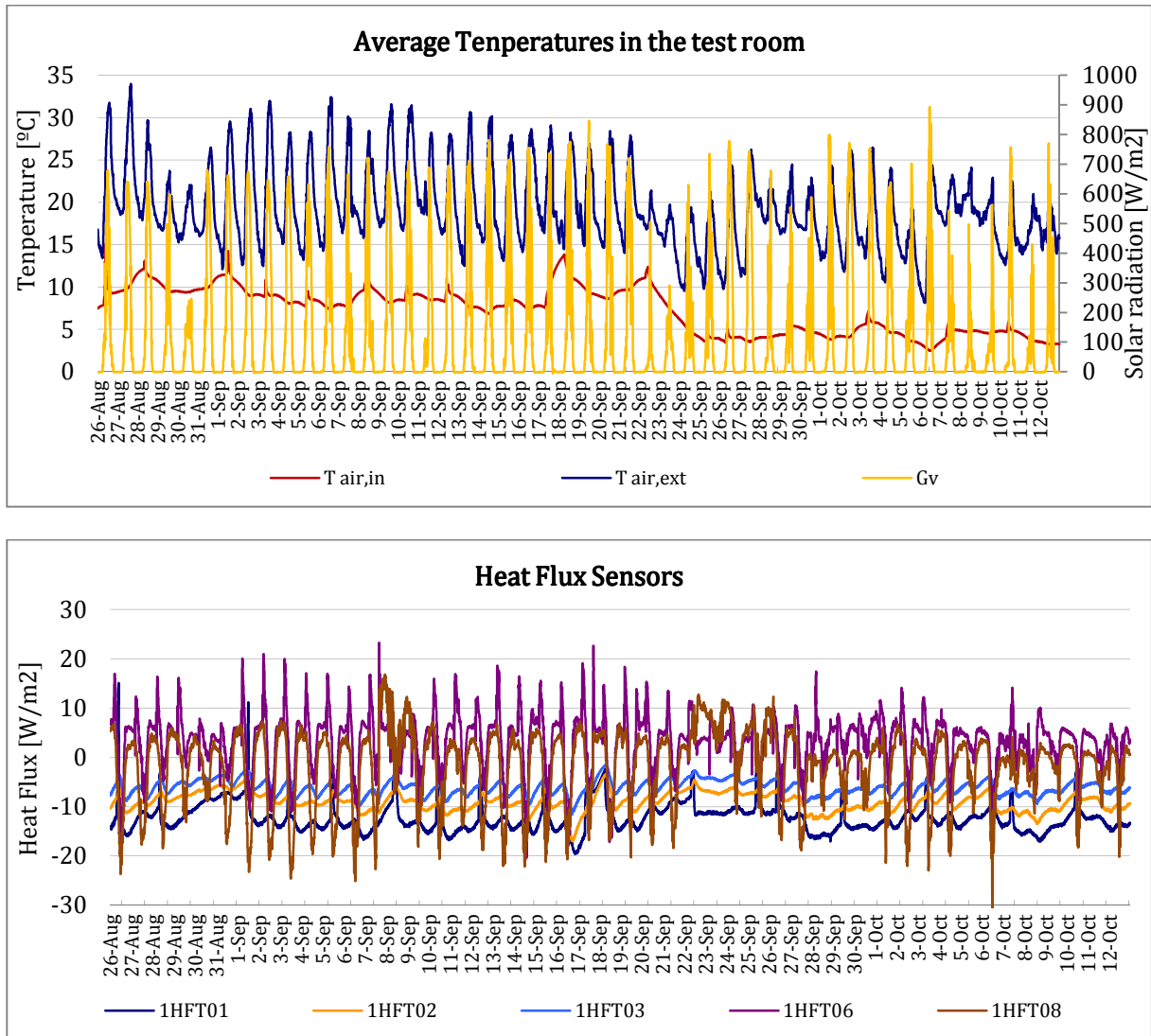


Fig. 4. 53. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Agosto 2014- ILARGI)

3.6.6 SECUENCIA XX: Fachada vegetal Noviembre 2014 (35 °C)

La secuencia de la señal a temperatura constante y su correspondiente evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra, así como la temperatura del aire interior, aire exterior, radiación vertical global y la evolución del flujo de calor en las diferentes capas que componen el muro base junto a la fachada vegetal se puede observar a continuación:

El día 19 de noviembre debido a una tormenta no hubo luz en la célula de ensayo por lo que no se recogieron los datos.

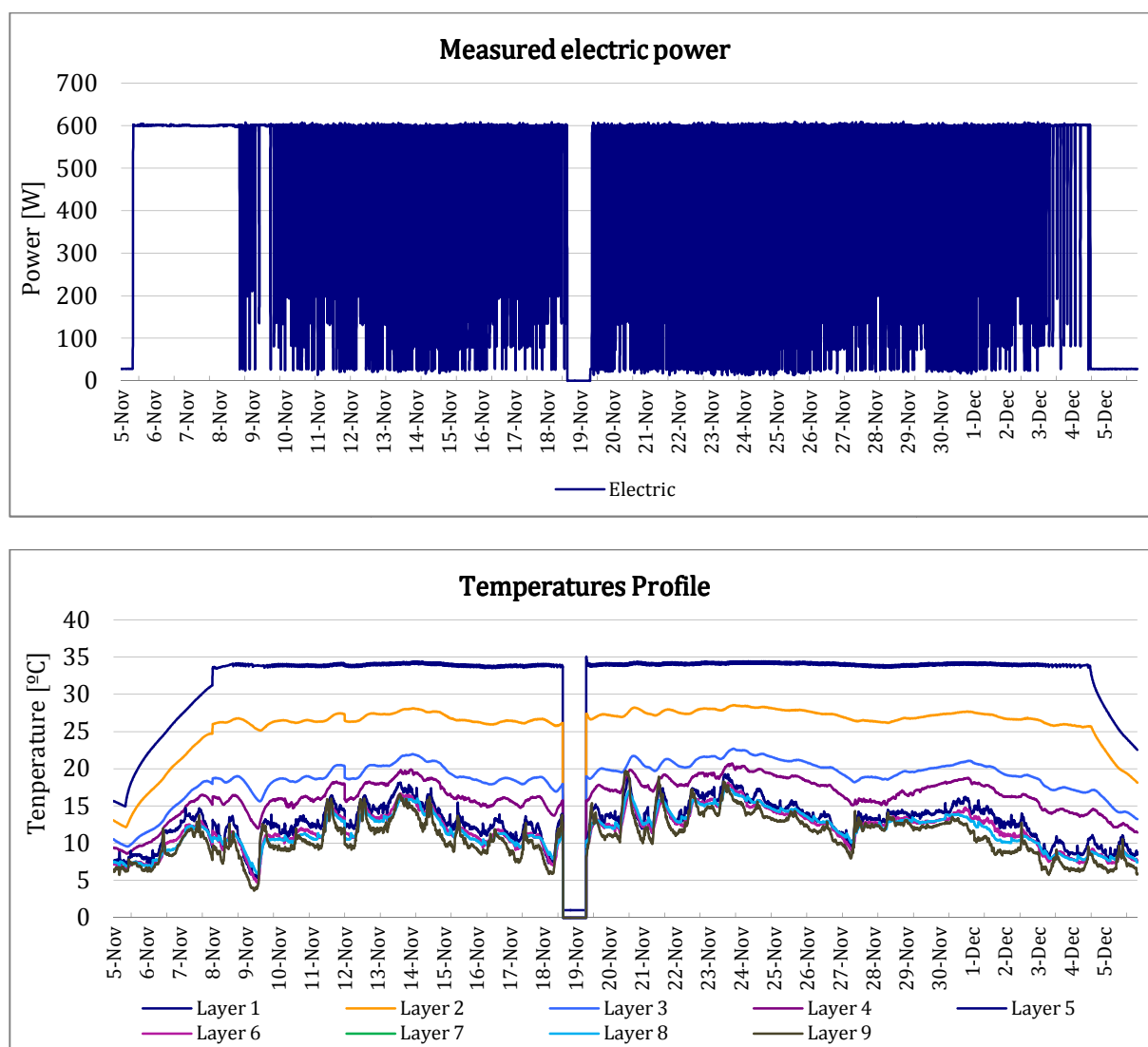


Fig. 4. 54. Arriba: Secuencia a 35 °C constante realizada sobre la fachada vegetal. Abajo: Evolución de la temperatura en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Noviembre 2014- ILARGI)

La señal de pulso térmico a temperatura constante de 35 °C se llevó a cabo durante el mes de noviembre de 2014 para conseguir un gran gradiente de temperatura entre el interior y exterior de la célula de ensayo.

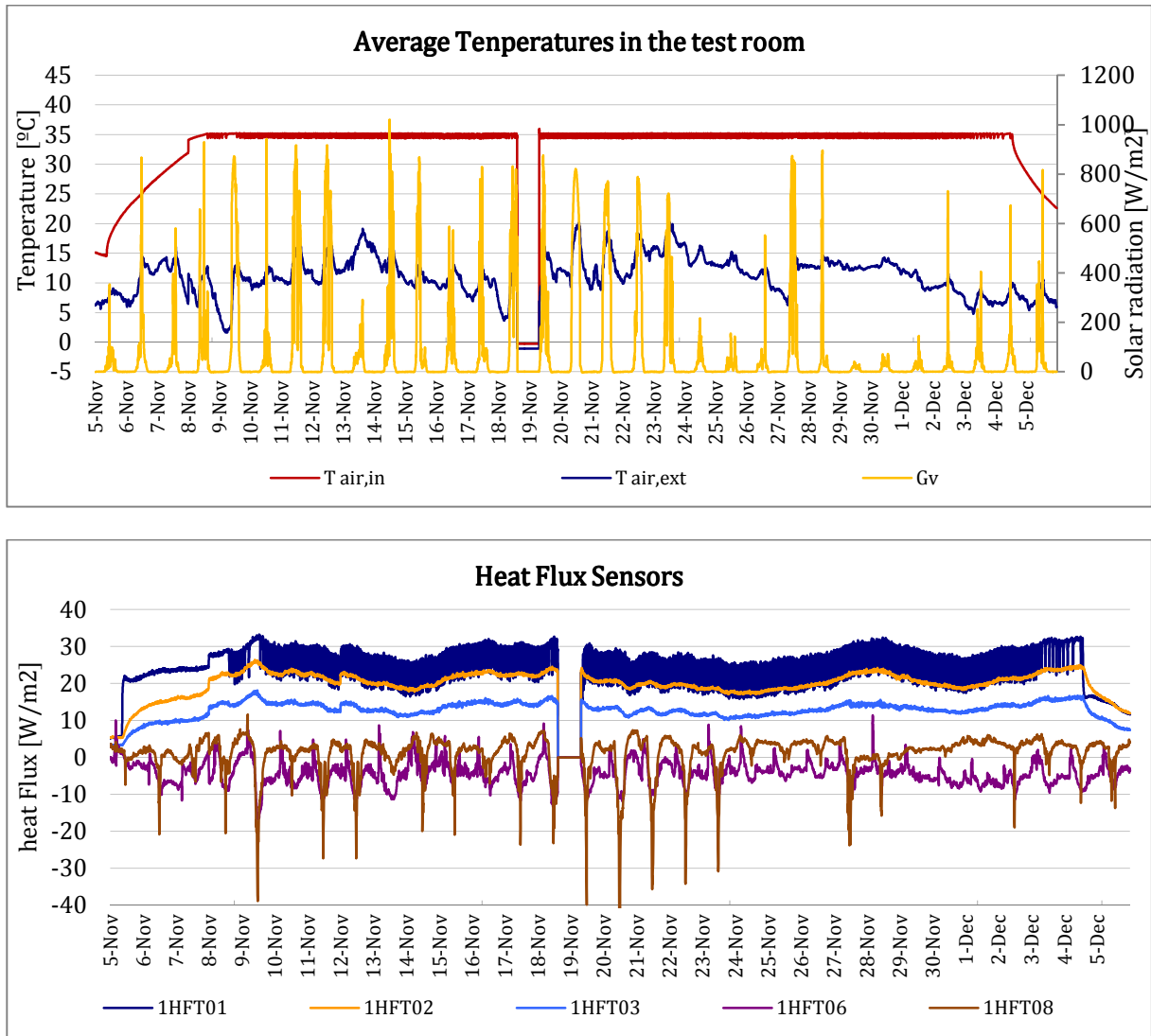


Fig. 4. 55. Arriba: Temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayo junto a la radiación global vertical. Abajo: Evolución de los fluxómetros en las diferentes capas de la muestra a lo largo de la secuencia (Noviembre 2014-ILARGI)

4 . Conclusiones

Con el fin de establecer una buena estrategia energética en los edificios existentes es necesario disponer de datos precisos sobre el rendimiento térmico de los elementos constructivos. En este capítulo se han mostrado las secuencias detalladas de las monitorizaciones llevadas a cabo en el estudio térmico de una fachada ventilada frente a fachada vegetal en la rehabilitación de un muro de hoja doble, basados en una serie de ensayos realizados a largo de 22 meses. Los datos recogidos se han utilizado para definir los modelos térmicos que se presentan en el capítulo 5.

Las secuencias de prueba presentadas son válidas para identificar un modelo matemático que represente tanto las muestras de fachada ventilada como las de fachada vegetal. Las secuencias de prueba proporcionan series de datos que contienen ensayos realizados a frecuencias de baja (PRBS) y alta (ROLBS) potencia. Por otro lado, las secuencias de temperatura constante cumplen las condiciones de equilibrio cuasi-estatales necesarios para aplicar el método de la media.

Por último, para poder comparar el comportamiento térmico de los diferentes elementos constructivos que conforman la fachada ventilada y la vegetal durante diferentes periodos de tiempo y bajo condiciones climáticas de una manera apropiada, son necesarios datos representativos. Los datos obtenidos en condiciones reales de ensayo garantizan obtener datos representativos con el fin de lograr el desarrollo y la evaluación de diversos modelos de comportamiento térmico de las fachadas a estudio y de los elementos que los constituyen, lo que permite la posterior comparación de estos resultados. Por otra parte, esta metodología será útil para evaluar una vivienda o edificio antes y después de que se realizarán las tareas de rehabilitación.

De la toma de datos tomados a largo de este capítulo se puede subrayar que la temperatura en la fachada externa tanto en ladrillo caravista como en plaqueta cerámica, el caso del muro base o fachada ventilada, la temperatura de la superficie externa alcanza valores superiores a la temperatura ambiental. Por otro lado, la fachada vegetal cubierta en un 40% de su superficie, se comporta prácticamente igual que una fachada ventilada. En el momento en el que en la fachada vegetal empieza a

desarrollarse el follaje, esta diferencia empieza a disminuir, ya que la evapotranspiración de las plantas impide que la temperatura de la fachada exterior supere los 30 °C incluso cuando en el exterior la temperatura sobrepasa los 35 °C

En el siguiente capítulo se describe la parte experimental de esta investigación, la selección de un modelo matemático representativo para una fachada vegetal y una fachada ventilada. Esta investigación proporcionará una cantidad importante de datos de las fachadas, lo que permitirá mediante los diferentes modelos térmicos desarrollados en el capítulo 5 representar el comportamiento térmico de las fachadas a evaluar. De esta manera, será posible predecir las mejoras en el consumo de energía, confort interior, etc., que están involucrados en diferentes estrategias de ahorro energético

*"No sé muy bien si la vida es una materia envuelta
en energía o si es energía envuelta en un caldo de
materia."*

Lynn Margulis (1938-2011)



CAPÍTULO 5

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO
DE UNA FACHADA VENTILADA FRENTE A
UNA FACHADA VEGETAL

RESUMEN

En este capítulo se describe el desarrollo de un modelo RC y un modelo CTSM que representen el comportamiento térmico de una fachada ventilada frente a una vegetal. Los modelos se han definido a partir de los datos obtenidos en la monitorización descrita en el Capítulo 4 de esta tesis.

Así, en la primera parte del capítulo se presentan los datos obtenidos mediante el método de la media. En la segunda parte se describe el enfoque y diseño del modelo RC, así como sus bases matemáticas. Posteriormente, se presentan los parámetros característicos obtenidos para el modelo, y una descripción del funcionamiento y los cálculos que realiza el modelo, una vez incluidos en él dichos parámetros característicos. Tras ello, se describe el modelo CTSM su descripción y cálculos así como el proceso de validación del modelo y el uso del mismo. Se acaba con una comparación entre ambos modelos para finalmente presentar las conclusiones.

ABSTRACT

The development of a RC and CTSM models for ventilated and green façade are described in this chapter. This model is led to represent thermal behavior of those façades, presented in Chapter 4, and it is developed based on data obtained during the monitoring described in mentioned chapter.

Thus, a brief introduction of the use of RC models in buildings is presented. Secondly, the approach and the model design are described, as well as its mathematical bases. Then, characteristic parameters calculated for the model are shown, and the way the model works after including those parameters is defined. Afterwards, the CTSM model validation procedure is presented, and the use for simulation is described. Then, results obtained by both models (RC and CTSM) are compared and finally conclusions are numbered.

1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de esta investigación. El capítulo ha sido dividido en seis secciones. A lo largo de la primera sección se realiza el cálculo de los parámetros físicos de las diferentes soluciones constructivas bajo los términos que establece el Código Técnico de la Edificación (CTE).

En la segunda sección se aplica el método del promedio para cada una de las capas que componen la muestra de fachada vegetal y se estima la resistencia térmica y la conductividad térmica de cada una de ellas. Esta prueba específica ha sido llevada a cabo cumpliendo de una manera óptima los requisitos del método de la media.

La tercera sección del capítulo, describe el proceso de identificación de los parámetros de la fachada ventilada y fachada vegetal utilizando el Software Lord, utilizando para ello un modelo RC. Mediante este programa informático se puede analizar la dinámica de los datos experimentales y de esta forma obtener los parámetros característicos de los componentes. Posteriormente, se presentan los modelos y los resultados de la identificación junto con la validación de los resultados.

La cuarta sección de este capítulo, describe el proceso de identificación de los parámetros de la fachada ventilada y fachada vegetal utilizando el Software CTSM. A

continuación, se presentan los modelos y los resultados de la identificación junto con la validación de los resultados.

La quinta sección analiza mediante fotografías termográficas las características térmicas de una fachada vegetal a lo largo de un periodo de 24h

Por último, una vez que se han identificado y validado los modelos del comportamiento térmico de la fachada ventilada y fachada vegetal, se presentan las conclusiones del capítulo, describiendo la validez y la exactitud que presentan estos modelos.

2 Objetivos del capítulo

Los principales objetivos de este capítulo son, describir y desarrollar una metodología para cuantificar las características térmicas de una fachada ventilada frente una fachada vegetal sobre un mismo muro base de hoja doble, mediante el desarrollo de un modelo de caja gris.

En segundo lugar comprobar la utilidad del modelo CTSM para estimar los potenciales beneficios de una fachada vegetal. Para posteriormente poder realizar la comparación de los resultados del modelo de caja gris con los obtenidos con el modelo CTSM, y la identificación de los pros y los contras de cada tipo de modelo para este caso de fachada vegetal en particular.

En tercer lugar realizar un análisis termográfico de la fachada vegetal para describir cuantitativamente sus características térmicas.

En la última sección del capítulo llevar a cabo el estudio del comportamiento aislante de las dos soluciones de rehabilitación ensayadas.

3 Cálculo de la resistencia térmica de las fachadas teniendo en cuenta el CTE

El principal objetivo de esta sección es describir los parámetros térmicos que caracterizan los elementos que componen las diferentes fachadas presentadas a lo largo de este estudio. Para ello se ha llevado a cabo el cálculo de las resistencias y capacidades térmicas del muro base y de los elementos de rehabilitación descritos en el capítulo anterior bajo las condiciones que estipula el Código Técnico de la Edificación (CTE) en el Apéndice E: Cálculo de los parámetros característicos de la demanda.

En las siguientes secciones de este quinto capítulo se comparan los valores de la resistencia térmica y la capacidad térmica calculada en esta sección con los datos procedentes de los sensores y caracterización mediante modelos matemáticos. La comparación de los resultados se utilizará como una comprobación de validación de los modelos de identificación y del proceso de validación.

En primer lugar se ha caracterizado el muro base de doble hoja para a continuación compararlo con las dos propuestas de rehabilitación realizadas sobre él, en primer lugar mediante fachada ventilada y en segundo lugar mediante fachada vegetal. Las diferentes capas de la muestra de ensayo de fachada han sido modeladas mediante redes RC ya que es la forma más eficiente de identificar las características térmicas de fachada por medio de los datos experimentales.

La representación esquemática de los componentes que componen las muestras analizadas se encuentra descrito en el capítulo 3 sección 3.1, 3.2 y 3.3, respectivamente.

3.1 Características térmicas para un Muro Base de doble hoja

El CTE en el capítulo 2.1.1. del documento “DA DB-HE / 1 Cálculo de parámetros característicos de la envolvente” describe el cálculo de los cerramientos asociados a los muros exteriores. Este cálculo es aplicable a la parte opaca de todos los cerramientos en contacto con el aire exterior tales como muros de fachada.

La transmitancia térmica U ($W/m^2 \cdot K$) viene dada por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{Eq. 21}$$

donde: R_T : es la resistencia térmica total del componente constructivo ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$).

La resistencia térmica total R_T de una fachada constituida por capas térmicamente homogéneas se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_T = R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{si} \quad \text{Eq. 22}$$

donde: R_{se} y R_{si} son las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire exterior e interior respectivamente, de acuerdo con la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$). y R_1, R_2, \dots, R_n son las resistencias térmicas de cada capa ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$).

La resistencia térmica de una capa térmicamente homogénea viene definida por la expresión:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \text{Eq. 23}$$

donde: e : es el espesor de la capa (m). y λ : es la conductividad térmica del material de la capa ($\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$). Para la obtención de los diferentes valores de los componentes de la envolvente térmica se ha acudido a las tablas del CTE.

La capacidad térmica total C_T ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) de una fachada constituida por capas térmicamente homogéneas se calcula con la siguiente expresión:

$$C_T = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad \text{Eq. 24}$$

donde: C_1, C_2, \dots, C_n son las capacidades térmicas de cada capa ($\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

La capacidad térmica de una capa térmicamente homogénea viene definida por la expresión:

$$C = C_p \cdot \rho \cdot e \quad \text{Eq. 25}$$

donde: C_p es el calor específico a presión constante ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$), ρ es la densidad (kg/m^3) y e es el espesor de la capa (m). Para la obtención de los diferentes valores de los componentes de la envolvente térmica se ha acudido a las tablas del CTE.

En la siguiente tabla 5.6 se puede observar los valores de espesor, conductividad térmica, resistencia térmica, calor específico, densidad y capacidad térmica de cada una de las diferentes capas que componen la muestra de muro base doble antes de la fase experimental.

Tabla 5. 1. Características térmicas de muro base para las diferentes capas que lo componen mediante el uso del CTE

Material	e [m]	λ [W/m °C]	R [m ² °C/W]	Cp [kJ/kg °C]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/m ² °C]
R Interior			0.13			
Raseo de cemento	0.015	0.7	0.02	0.84	1 440	18.14
Ladrillo hueco doble	0.064	0.4	0.16	0.84	1 600	86.02
Cámara de aire	0.100		0.18			
Ladrillo caravista	0.108	0.5	0.22	0.84	1 600	145.15
R Exterior			0.04			
Resistencia térmica total estimada			0.75			
Capacidad térmica total estimada						249.31

3.2 Características térmicas para una Fachada Ventilada

En la siguiente tabla 5.2 se puede observar los valores de espesor, conductividad térmica, resistencia térmica, calor específico, densidad y capacidad térmica de cada una de las diferentes capas que componen la muestra de muro base doble y rehabilitación realizada mediante fachada ventilada antes de la fase experimental mediante la utilización del CTE.

Tabla 5. 2. Características térmicas de muro base con fachada ventilada para las diferentes capas que lo componen mediante el uso del CTE

Material	e [m]	λ [W/m °C]	R [m ² °C/W]	Cp [kJ/kg °C]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/m ² °C]
R Interior			0.13			
Raseo de cemento	0.015	0.7	0.02	0.84	1 440	18.14
Ladrillo hueco doble	0.064	0.4	0.16	0.84	1 600	86.02
Cámara de aire	0.100		0.18			
Ladrillo caravista	0.108	0.5	0.22	0.84	1 600	145.15
Lana de roca	0.050	0.04	1.25	0.80	110	4.4
Cámara de aire	0.050		0.13 *			
Placa cerámica	0.012	1		0.80	2 000	19.20
R Exterior						
Resistencia térmica total estimada			2.09			
Capacidad térmica total estimada						255.91

Nota *: El CTE en su documento de apoyo DA DB HE / 1 artículo 2.1.2. c) especifica que para cámaras de aire muy ventiladas, la resistencia térmica total del cerramiento se obtiene despreciando la resistencia térmica de la cámara de aire y las de las demás capas entre la cámara de aire y el ambiente exterior, e incluyendo una resistencia superficial

exterior correspondiente al aire en calma, igual a la resistencia superficial interior del mismo elemento.

3.3 Características térmicas para Fachada Vegetal

En la tabla 5.3 se puede observar los valores de espesor, conductividad térmica, resistencia térmica, calor específico, densidad y capacidad térmica de cada una de las diferentes capas que componen la muestra de muro base doble y rehabilitación realizada mediante fachada vegetal antes de la fase experimental mediante la utilización del CTE.

Tabla 5. 3. Características térmicas de muro base con fachada vegetal para las diferentes capas que lo componen mediante el uso del CTE

Material	e [m]	λ [W/m °C]	R [m ² °C/W]	Cp [kJ/kg °C]	ρ [kg/m ³]	C [kJ/m ² °C]
R Interior			0.13			
Raseo de cemento	0.015	0.7	0.02	0.84	1 440	18.14
Ladrillo hueco doble	0.064	0.4	0.16	0.84	1 600	86.02
Cámara de aire	0.100		0.18			
Ladrillo caravista	0.108	0.5	0.22	0.84	1 600	145.15
Cámara de aire	0.050		0.09 *			
Modulo con sustrato	0.080	0.4	0.20	1.20	1 200	115.2
Vegetación	0.500	3	0.16			
R Exterior			0.04			
Resistencia térmica total estimada			1.20			
Capacidad térmica total estimada						364.51

Nota *: El CTE en su documento de apoyo DA DB HE / 1 artículo 2.1.2. b) especifica que la resistencia térmica de una cámara de aire ligeramente ventilada es la mitad de los valores de la tabla de la resistencia térmica de las cámaras de aires sin ventilar.

4 Método de la media

El método de la media es una técnica de análisis sencillo que proporciona información cuantitativa y cualitativa sobre los datos medidos, la desventaja de la aplicación de este método reside en el largo periodo de recopilación de los datos necesarios para poder obtener resultados precisos. Las secuencias de análisis del método de la media sólo se pueden aplicar en condiciones en las que el nivel térmico de la muestra de ensayo sea aproximadamente constante. Por todo ello, el método de la media proporciona resultados fiables únicamente en las condiciones que se presentan en el Capítulo 1 en la *sección 4.2.1.*, estas condiciones no se suelen cumplir en la mayoría de las secuencias de ensayo. En este estudio, el método de la media se ha aplicado únicamente sobre los datos recopilados durante tres secuencias de ensayo de la fachada vegetal.

4.1 Método de la media para Fachada Vegetal

Las tres secuencias de ensayo óptimas para la aplicación del método de la media sobre fachada vegetal con un largo período de muestreo a temperatura constante se han presentado en el capítulo 4:

3.5.3 SECUENCIA XVII: Fachada vegetal Marzo 2014 (30 °C)

3.5.4 SECUENCIA XVIII: Fachada vegetal Junio 2014 (30 °C)

3.5.6 SECUENCIA XX: Fachada vegetal Noviembre 2014 (35 °C)

Los sensores de flujo de calor y temperatura instalados (descritos en el capítulo 3) se utilizan para calcular las resistencias térmicas de las diferentes capas que componen la fachada vegetal, del mismo modo, se puede calcular la resistencia térmica global de esta.

Es muy importante comprobar de manera gráfica todas las señales que se utilizan durante los cálculos. Es por ello que todas las señales utilizadas para la aplicación del método de la media se dibujan y lo que es más importante se calcula la información estadística de cada una de las señales: promedio, máximo, mínimo, desviación estándar y varianza. Finalmente también es necesario proporcionar el error de cada una de las señales. Este error define la incertidumbre del sensor en la medida de las señales. Las señales de temperatura de las diferentes capas son un promedio de múltiples sensores (definido en el capítulo 3).

4.1.1 Identificación de los parámetros

4.1.1.1 SECUENCIA XVII: Fachada vegetal Marzo 2014 (30 °C)

Para la identificación de los parámetros térmicos de los componentes de una fachada vegetal y poder comparar sus prestaciones energéticas se ha realizado una tabla (ver tabla 5.4), a partir de los análisis de la secuencia de ensayo de marzo de 2014.

Tabla 5. 4. Resultados del método del promedio para las diferentes combinaciones de capa

Model	Average Heat Flux [W/m ²]	Average ΔT [°C]	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	Thermal Level [°C]
Layer1-Layer2	15.41	4.94	3.12	0.32	25.85
Layer2-Layer3	16.76	6.05	2.77	0.36	19.75
Layer3-Layer4	23.64	1.42	16.66	0.06	16.02
Layer4-Layer6	19.01	3.62	5.26	0.19	14.99
Layer6-Layer8	- 17.00	0.17	100	0.01	15.66
Layer8-Layer9	- 16.27	1.79	9.09	0.11	15.61

La Tabla 5.4 resume los resultados promedio del método de la media para una secuencia de temperatura constante realizada a 30 °C durante el mes de marzo de 2014. Una vez más, es muy importante comprobar la coherencia entre los resultados de las diferentes capas que componen la fachada vegetal. Hay que analizarlo desde el conjunto de sensores que se utilizan para los diferentes cálculos y comprobar en base a estos si los resultados son consistentes entre sí. Una vez analizados pueden ser validadas las mediciones que se están realizando.

El flujo de calor promedio de las diferentes capas analizadas no se desvía de la media de las mediciones de flujo de calor de las capas. Esto hace que los valores de resistencia térmica sean fiables. Señalar las Layer6-8 y Layer 8-9 donde el flujo de calor es negativo, lo que indica que el flujo de calor es hacia el interior de la celda de ensayo, debido a que la cámara de aire se encuentra a una temperatura inferior debido a la capacidad evapotranspirativa de las plantas.

De la tabla es interesante resaltar que un valor elevado de resistencia térmica es indicativo de un material aislante, de esta forma cada material que compone la muestra aporta características térmicas propias a la fachada.

Esta metodología permite caracterizar los componentes que constituyen la muestra de fachada, permitiendo su caracterización térmica.

Por otro lado, para realizar el método gráfico se utilizan las mediciones de tres medidas características durante todo el período de prueba. Estas son, la temperatura del aire interior ($T_{air, in}$ [$^{\circ}C$]), la temperatura del aire exterior ($T_{air, ext}$ [$^{\circ}C$]) y la densidad de flujo de calor a través de la superficie de la pared interior (q_i [W/m^2]) durante el intervalo de tiempo entre las mediciones sucesivas (1 min) y de los datos de postprocesamiento (10 min). A continuación se presentan los resultados obtenidos:

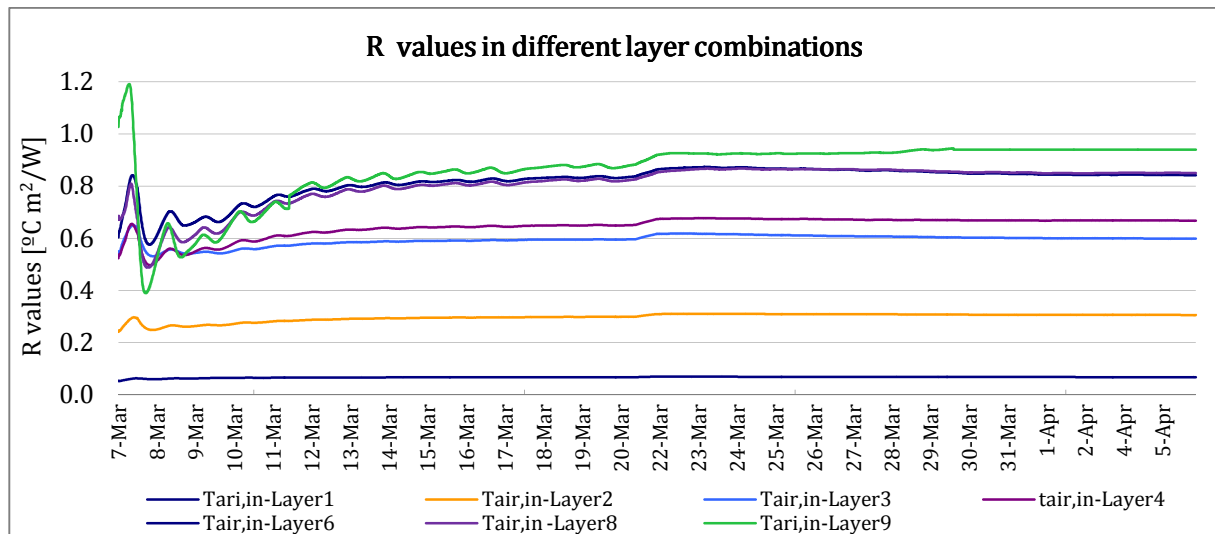


Fig. 5. 1. Valores de Resistencia térmica ($^{\circ}C m^2/W$) de las diferentes capas analizadas (marzo 2014)

En la Figura 5.1 se muestra la evolución de los valores R calculados con el método de la media para la fachada vegetal que ha sido ensayada a lo largo de esta tesis. Se observan siete valores de R diferentes, uno para cada de una de las diferentes combinaciones de capas que componen la muestra.

A medida que transcurre el tiempo de muestreo los datos de resistencia térmica se vuelven constantes. Por último, tanto en la tabla resumen como en el gráfico se puede observar la resistencia térmica que aporta la capa de vegetación $0.11 \text{ }^{\circ}C m^2/W$ en el conjunto de la fachada vegetal.

4.1.1.2 SECUENCIA XVIII: Fachada vegetal Junio 2014 (30 °C)

Para la identificación de los parámetros térmicos de los componentes de una fachada vegetal y poder comparar sus prestaciones energéticas se ha realizado una tabla (ver tabla 5.5), a partir de los análisis de la secuencia de pruebas de junio de 2014.

Tabla 5. 5. Resultados del método del promedio para las diferentes combinaciones de capa

Model	Average Heat Flux [W/m ²]	Average ΔT [°C]	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	Thermal Level [°C]
Layer1-Layer2	8.99	2.16	4.16	0.24	26.75
Layer2-Layer3	8.27	2.15	3.84	0.26	23.89
Layer3-Layer4	9.07	2.54	3.57	0.28	22.18
Layer4-Layer6	8.81	1.85	4.76	0.21	21.47
Layer6-Layer8	8.01	0.32	25.03	0.04	20.44
Layer8-Layer9	6.22	0.62	10.03	0.10	19.84

La tabla 5.5 ha sido dividida en 6 filas que expresan las 6 combinaciones de capas que componen la muestra de fachada vegetal, donde se añaden en cuatro columnas los datos calculados de flujo de calor, diferencia de temperatura, transmitancia térmica y resistencia térmica de cada una de las capas.

La comparación entre las diferentes capas permite observar la diferencia de comportamiento entre unos tipos de materiales y otros.

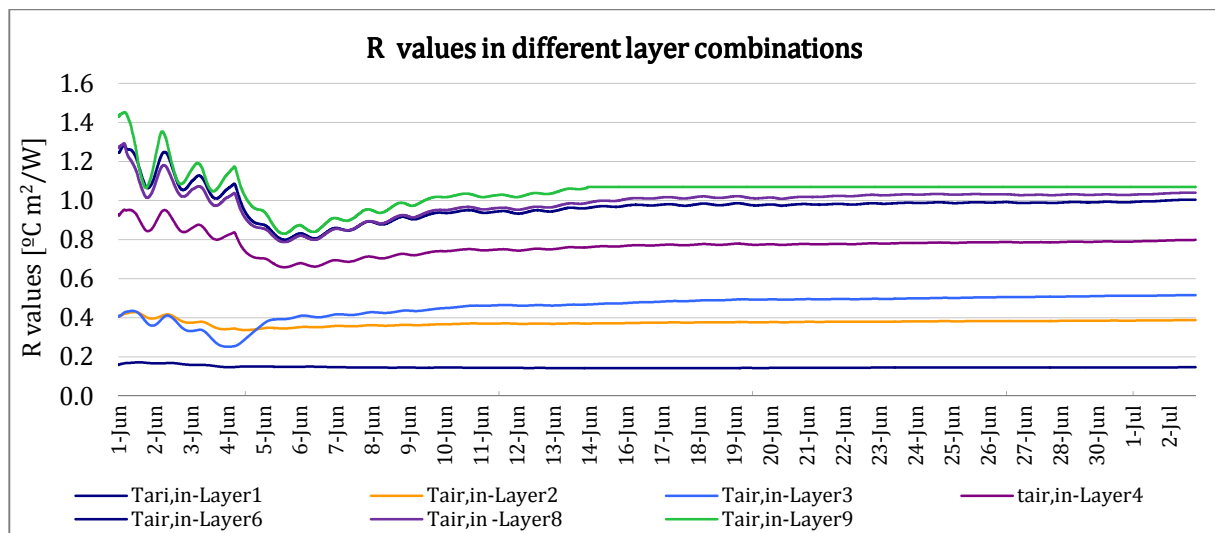


Fig. 5. 2. Valores de Resistencia térmica (°C m²/W) de las diferentes capas analizadas (junio 2014)

En la fig.5.2. se puede observar de forma gráfica las resistencia térmica de los elementos que componen el muro vegetal y sus valores a lo largo del tiempo. De esta forma,

sabiendo sus características térmicas se puede saber la relación entre los parámetros de los elementos y la estrategia de aislamiento a seguir.

A partir del análisis de la secuencia anterior cabe señalar los valores de resistencia térmica de las capas que componen la fachada vegetal. En primer lugar, el muro base sobre el que se ha colocado la estructura vegetal presenta un valor de resistencia térmica total de $0.63 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$. Una vez colocado el elemento vegetal la resistencia térmica de este muro alcanza valores de $0.98 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$, lo que proporciona característica aislante sobre este.

El valor de resistencia térmica se mantiene constante para cada una de las capas a partir del sexto día. Por lo que se observa, no existe una diferencia significativa entre las últimas capas $T_{\text{air, in-Layer 6}}$, $T_{\text{air, in-Layer 8}}$ y $T_{\text{air, in-Layer 9}}$.

4.1.1.3 SECUENCIA XX: Fachada vegetal Noviembre 2014 ($35 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Para la identificación de los parámetros térmicos de los componentes de una fachada vegetal y poder compararlos sus prestaciones energéticas se ha realizado una tabla (ver tabla 5.6), a partir de los análisis de la secuencia de pruebas de noviembre de 2014

Tabla 5. 6. Resultados del método del promedio para las diferentes combinaciones de capa

Model	Average Heat Flux [W/m^2]	Average ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]	Thermal Level [$^{\circ}\text{C}$]
Layer1-Layer2	23.00	5.53	4.16	0.24	30.25
Layer2-Layer3	23.04	6.70	3.44	0.29	24.00
Layer3-Layer4	24.12	3.86	6.25	0.16	19.63
Layer4-Layer6	22.56	4.29	5.26	0.19	17.90
Layer6-Layer8	30.67	0.32	95.84	0.01	16.12
Layer8-Layer9	6.70	0.87	7.70	0.13	16.07

La tabla 5.6 ha sido dividida en 6 filas que expresan las 6 combinaciones de capas que componen la muestra de fachada vegetal, donde se añaden en cuatro columnas los datos calculados de flujo de calor, diferencia de temperatura, transmitancia térmica y resistencia térmica de cada una de las capas.

En la tabla anterior se pueden observar las características térmicas de cada uno de los elementos que componen la fachada vegetal. Cabe señalar como la resistencia térmica de la cámara de aire ventilada exterior es de $0.19 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$ y la resistencia térmica de la capa vegetal es de $0.13 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$.

El nivel térmico muestra la evolución de la temperatura de las diferentes capas. Se aprecia la dirección del flujo térmico desde el interior de la celda al ambiente exterior.

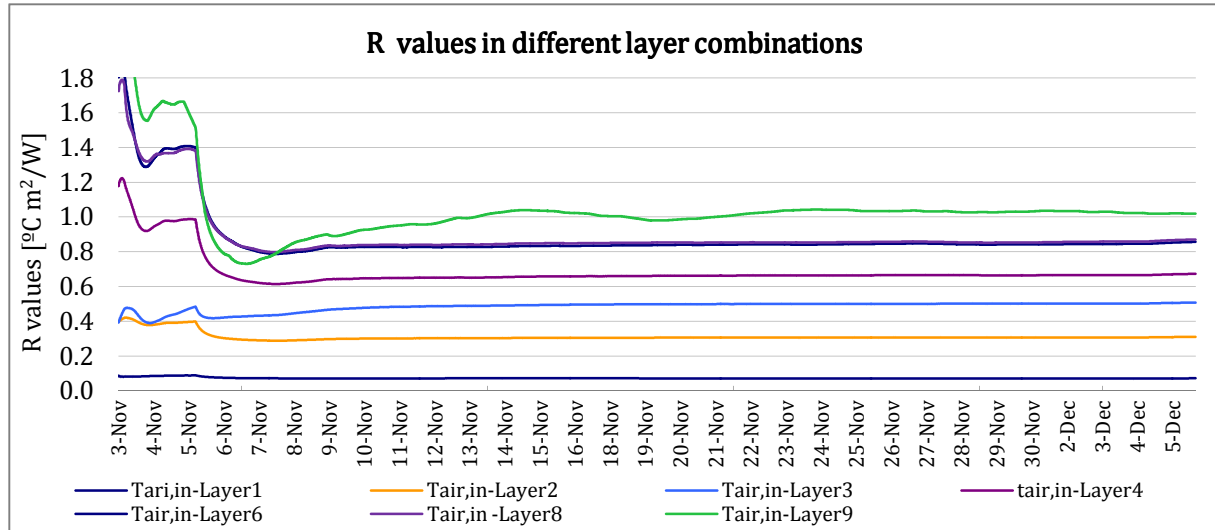


Fig. 5. 3. Valores de Resistencia térmica ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$) de las diferentes capas analizadas (noviembre 2014)

En la gráfica anterior se puede observar la evolución de los valores R calculados con el método de la media para la fachada vegetal. Se observan siete valores de R diferentes, uno para cada de una de las diferentes combinaciones de capas que componen la muestra caracterizando térmicamente cada una de las combinaciones de capa que componen la fachada vegetal.

4.2 Análisis de los resultados

Mediante el método de la media se han identificado las características térmicas de los diferentes elementos que componen este tipo de la fachada vegetal durante tres secuencias de muestreo realizadas.

Posteriormente se han comparado los resultados de una y otra secuencia para analizar los resultados de las diferentes observaciones. A continuación se ha expuesto una breve discusión sobre los resultados que pueden verse gráficamente en las Figuras 5.1 a 5.3, y numéricamente en las Tablas 5.4 a 5.6.

En todas las secuencias analizadas puede observarse una dispersión en los resultados de la resistencia térmica, sobre todo cuando se analiza el comienzo de la serie de datos los dos, tres primeros días. A medida que avanza la serie temporal, la dispersión de las

medidas disminuye, llegando a estabilizarse a partir del quinto día. Para períodos de medida más largos no se aprecia una mejora significativa de los resultados.

Realizando la comparación entre los resultados obtenidos en la época de invierno y de verano los resultados no muestran una diferencia significativa entre ellos.

La capa vegetal (Layer 8-9) muestra un aumento de la resistencia térmica de esta última capa a medida que transcurre el periodo de muestreo, debido probablemente al mayor desarrollo vegetativo y aumento de espesor de esta última capa vegetal.

Como resultado, señalar que la principal ventaja de este método es su simplicidad a la hora de ser aplicado, sin embargo, la obtención de resultados satisfactorios implica la utilización de períodos de integración grandes, lo que supone que se requiera de mucho tiempo de experimentación para estimar de una forma óptima los parámetros que lo caracterizan.

4.2.1 Comparación de secuencias de temperatura constante

Algunas conclusiones importantes se pueden obtener mediante la comparación de los resultados obtenidos de las tres secuencias de ensayo llevadas a cabo a temperatura constante. En la siguiente Tabla 5.7 se presenta la comparativa de los resultados más importantes de los ensayos realizados a temperatura constante en las diferentes combinaciones de capas analizadas.

Tabla: 5. 7. Comparación de los resultados obtenidos en tres secuencias de datos analizadas en las diferentes combinaciones de capas.

Model	Average Heat Flux [W/m ²]			Average ΔT [°C]			R [°C m ² /W]			Average Thermal level [°C]		
	Secuencia	XVII	XVIII	XX	XVII	XVIII	XX	XVII	XVIII	XX	XVII	XVIII
T air-in	30 °C	30 °C	35 °C	30 °C	30 °C	35 °C	30 °C	30 °C	35 °C	30 °C	30 °C	35 °C
Ly1-Ly2	15.41	8.99	23.00	4.94	2.16	5.53	0.32	0.24	0.24	25.85	26.75	30.25
Ly2-Ly3	16.76	8.27	23.04	6.05	2.15	6.70	0.36	0.26	0.29	19.75	23.89	24.00
Ly3-Ly4	23.64	9.07	24.12	1.42	2.54	3.86	0.06	0.28	0.16	16.02	22.18	19.63
Ly4-Ly6	19.01	8.81	22.56	3.62	1.85	4.29	0.19	0.21	0.19	14.99	21.47	17.90
Ly6-Ly8	-17.00	8.01	30.67	0.17	0.32	0.32	0.01	0.04	0.01	15.66	20.44	16.12
Ly8-Ly9	-16.27	6.22	6.70	1.79	0.62	0.87	0.11	0.10	0.13	16.61	19.84	16.07
Ly1-Ly4							0.74	0.78	0.69			
Ly1-Ly9							1.05	1.13	1.02			

Los resultados de la tabla 5.7 se pueden utilizar para comparar la resistencia térmica de las diferentes capas que componen la fachada vegetal en las diferentes secuencias de análisis realizadas a temperatura constante. La secuencia más fiable es la SEC XX (35°C) debido a que el gradiente de temperaturas entre el interior de la celda de ensayo y el ambiente exterior es mayor, lo que garantiza minimizar el error de medida.

La segunda secuencia se realizó durante el periodo estival (junio) mientras que las otras dos secuencias fueron tomadas en marzo y noviembre, respectivamente, debido a esto, el flujo de calor a través de la segunda muestra es casi la mitad que en las otras dos secuencias analizadas. En esta segunda secuencia analizada también se observa que el nivel térmico es superior a las otras dos secuencias realizadas.

La respuesta que presente la fachada vegetal debe ser lineal con respecto al flujo de calor, esto se comprueba mediante la comparación de la resistencia térmica de las secuencias ensayadas. El valor de las resistencias térmicas en las dos primeras secuencias se ha llevado a cabo bajo la misma temperatura constante (30 °C), mientras que la tercera secuencia se realizó a 35 °C.

La resistencia térmica calculada de la primera capa interior de mortero y ladrillo hueco doble sufre una desviación del 25 % entre la primera y segunda-tercera secuencias, mientras que la diferencia de temperatura es de unos 5 °C.

Las combinaciones de capas Layer4-Layer6 y Layer6-Layer8 y los resultados de la resistencia térmica se mantienen estables a pesar de que la temperatura de la segunda secuencia sea superior.

La capa exterior formada por la vegetación Layer8-Layer9 presenta una resistencia térmica estable en las tres secuencias, pero cabe señalar que el flujo de calor en la segunda y tercera secuencia es inferior al resto de capas.

Mediante este método la capa Layer6-8 no queda bien identificada debido a que los fenómenos de evapotranspiración que ocurren en esta son muy complejos, por lo que se puede concluir con que los valores de los parámetros físicos obtenidos son algo menores pero lógicos al compararlos con los obtenidos en la sección anterior (CTE).

5 Modelo RC - caja gris

Antes de diseñar cualquier modelo, es necesario organizar los resultados que se quieren obtener, y adquirir los datos que se utilizarán para el desarrollo de los mismos.

Los flujos de calor a través de las fachadas se basan en la temperatura de aire interior de la celda de ensayo que es calentado mediante la termorresistencia interna y, de manera indirecta por la irradiación solar (que calienta la superficie externa). Ese calor se pierde o gana hacia el ambiente exterior de manera variable a través de la fachada donde se encuentra la muestra, el resto de fachadas de la célula Paslink están muy aisladas.

Como se mencionó anteriormente, existen dos fuentes principales de entrada de calor. Por un lado, las ganancias solares que entran directamente a través de la fachada que contiene la muestra y las ganancias internas, originadas mediante la termorresistencia.

Del mismo modo, también hay una salida de calor, a través de la muestra. Estas pérdidas (o ganancias) son dependientes de la diferencia de temperatura (gradiente térmico) entre ambos lados (interior y exterior de la célula de ensayo) y de las características térmicas de los elementos que componen la muestra de fachada.

Además, la inercia térmica de los elementos constructivos (capacitancia) también desempeña un papel importante en el balance de energía. Por esta razón, el valor de la resistencia térmica (R) en estado estacionario no refleja con exactitud el comportamiento térmico dinámico de todas las capas que componen la solución constructiva.

Cuando la irradiación solar calienta la superficie externa de la pared, ya sea de la fachada ventilada o el módulo exterior de la fachada vegetal, el calor no pasa inmediatamente al aire interior, primero este se almacena en la capa o elemento constructivo y posteriormente será liberado, dependiendo de la capacitancia del elemento. Por lo tanto, si realizamos el muestreo en dos momentos diferentes del año, con las mismas entradas (radiación solar, temperatura exterior, ganancias internas...), durante un primer período, desarrollado durante el mes de julio, y un segundo periodo, desarrollado durante el mes de febrero, tendremos como resultado respuestas diferentes. La respuesta de la fachada en julio, es decir, después de una semana de altas temperaturas,

será totalmente diferente a la respuesta de la fachada en febrero, después de una semana de bajas temperaturas.

Por lo tanto, la temperatura del aire interior, así como el comportamiento térmico en general, es altamente dependiente, no sólo de las excitaciones en un momento dado, sino también de las condiciones exteriores en los momentos inmediatamente anteriores.

5.1 Definición e identificación del modelo RC

El modelo de caja gris ha sido desarrollado para representar el comportamiento térmico de una solución constructiva. El modelo de caja gris se establece basándose en una combinación de conocimientos físicos previos, estos se expresan mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales, que describen el modelo de la dinámica de calor del elemento constructivo. El modelo de la parte física está acoplado a la información obtenida mediante la observación directa durante la estimación de los parámetros [137].

Por lo tanto, la definición de modelos matemáticos térmicos RC consisten en representar los diferentes elementos que componen la fachada mediante resistencias y capacitancias. Una envolvente de múltiples capas se puede definir simplemente con dos resistencias térmicas, una capacitancia y un nodo interno [121]. Obviamente, incluyendo todas las capas de la pared para todas las superficies de la envolvente conduce a grandes redes RC, por lo que el nivel de detalle se establecerá por el autor en base a los objetivos del modelo y a la información disponible.

En cualquier modelo de RC (por ejemplo, la Fig. 5.4), el equilibrio térmico en cada nodo puede llevarse a cabo tal y como se muestra en la ecuación 26, donde P representa la suma de las potencias (flujos de calor) que afectan al nodo, T es la temperatura, t es el tiempo, y C es la capacitancia térmica.

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = P$$

Eq. 26

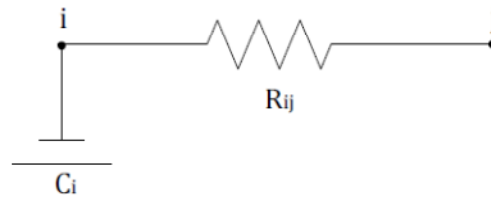


Fig. 5.4. Modelo RC formado por una Resistencia térmica y una capacitancia

En el caso de que un flujo de calor fluya desde otro nodo con diferente temperatura (por ejemplo la Fig. 5. 4), el flujo de calor a través de la resistencia térmica se puede calcular como:

$$q_{ij} = (T_i - T_j) \cdot H_{ij} \quad \text{Eq. 27}$$

$$H_{ij} = \frac{1}{R_{ij}} \quad \text{Eq. 28}$$

Por lo tanto:

$$C_i \cdot \frac{dT_i}{dt} = (T_i - T_j) \cdot H_{ij} \quad \text{Eq. 29}$$

En resumen, cualquier nodo del modelo definido puede verse afectado por al menos, tres tipos diferentes de flujos de calor: por un lado como consecuencia del flujo de la irradiación solar, por consecuencia del flujo de calor de conexión con un nodo que se encuentre a diferente temperatura, y por el flujo de calor originado directamente por la termorresistencia.

La irradiación solar tiene una fuerte influencia en el comportamiento y el rendimiento térmico de la fachada. Por consiguiente, debe tenerse en cuenta en el modelo matemático.

5.2 Modelo RC para un Muro Base de doble hoja

5.2.1 Modelado de los parámetros

5.2.1.1 Modelado de los parámetros de las capas del muro base

El enfoque de modelado RC para identificar los parámetros de transferencia de calor se puede utilizar para el conjunto del muro base (desde Layer1 hasta Layer4) o puede realizarse capa a capa es decir, desde la layer1 a layer2, layer2 a layer3 y layer3 a layer4.

5.2.1.1.1 Primera capa (LAYER1-LAYER2)

Esta primera capa (LAYER1-LAYER2) que compone el muro base se ha dividido en 4 nodos, como puede verse en la Fig. 5.5. Mediante este modelo se calculan e identifican los parámetros de transferencia de calor así como la capacidad térmica del material (mortero + ladrillo hueco doble) que compone esta primera capa.

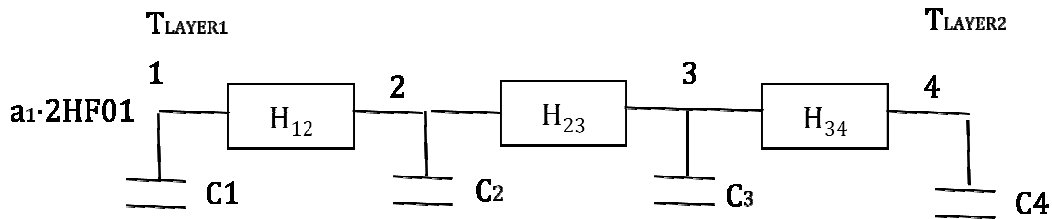


Fig. 5. 5. Modelo RC del muro base-. T_{LAYER1} y T_{LAYER2} son las señales de temperatura medidas de las LAYER1 y LAYER2. El a1 2HFT01 es el flujo de calor medido en la Layer1 (2HFT01). (Ver *CAPÍTULO 3* para obtener información sobre precisión y posición de los sensores)

En primer lugar y antes de iniciar cualquier hipótesis, se presentan las ecuaciones que rigen el proceso de transferencia de calor en el modelo representado en la Fig. 5.5 (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = (T_2 - T_1) \cdot H_{1-2} + a_1 \cdot q_1 \quad \text{Eq. 30}$$

$$C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = (T_1 - T_2) \cdot H_{1-2} + (T_3 - T_2) \cdot H_{2-3} \quad \text{Eq. 31}$$

$$C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = (T_2 - T_3) \cdot H_{2-3} + (T_4 - T_3) \cdot H_{3-4} \quad \text{Eq. 32}$$

$$C_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = (T_3 - T_4) \cdot H_{3-4} \quad \text{Eq. 33}$$

El modelo se utilizará asumiendo las siguientes entradas (input): q₁ (para este caso 1HFT01) y T₂ (T_{LAYER2}). Mientras que como salida (output) se tomará T₁ (temperatura de LAYER1). El software Lord utilizará estas entradas y salidas para los diferentes supuestos para conseguir la identificación de los parámetros (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_1 \cdot \frac{T_{1,s,k+1} - T_{1,s,k}}{\Delta t} = (T_{2,k} - T_{1,s,k}) \cdot H_{1-2} + a_1 \cdot q_{1,s,k} \quad \text{Eq. 34}$$

$$C_2 \cdot \frac{T_{2,k+1} - T_{2,k}}{\Delta t} = (T_{1,s,k} - T_{2,k}) \cdot H_{1-2} + (T_{3,k} - T_{2,k}) \cdot H_{2-3} \quad \text{Eq. 35}$$

$$C_3 \cdot \frac{T_{3,k+1} - T_{3,k}}{\Delta t} = (T_{2,k} - T_{3,k}) \cdot H_{2-3} + (T_{LAYER2,k} - T_{3,k}) \cdot H_{3-4} \quad \text{Eq. 36}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser reorganizadas: para ello las variables desconocidas de tiempo del periodo $k + 1$ se colocan en el lado izquierdo. Mientras que en el lado derecho se colocan las variables de los valores ya calculados en el tiempo k junto con los parámetros a estimar. Nótese que las variables q_1 y T_{LAYER2} son entradas para el modelo y que son conocidos para todos los intervalos de tiempo, ya que son valores medidos. El valor de apertura (a_1) es igual a 1 para los flujos de calor medidos.

$$T_{1,s,k+1} = T_{1,s,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot (T_{2,k} - T_{1,s,k}) \cdot H_{1-2} + \frac{\Delta t}{C_1} a_1 q_{1,s,k} \quad \text{Eq. 37}$$

$$T_{2,k+1} = (T_{1,s,k} - T_{2,k}) \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} \cdot \Delta t + (T_{3,k} - T_{2,k}) \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2} \cdot \Delta t + T_{2,k} \quad \text{Eq. 38}$$

$$T_{3,k+1} = (T_{2,k} - T_{3,k}) \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} \cdot \Delta t + (T_{LAYER2,k} - T_{3,k}) \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3} \cdot \Delta t + T_{3,k} \quad \text{Eq. 39}$$

Finalmente las ecuaciones anteriores se pueden escribir en notación matricial:

$$\begin{pmatrix} T_{1,k+1} \\ T_{2,k+1} \\ T_{3,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_1}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_1} & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} - \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2} \\ 0 & \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} - \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{1,s,k} \\ T_{2,k} \\ T_{3,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta t \cdot \frac{a_1}{C_1} q_{1,s,k} \\ 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3} \cdot T_{LAYER2,k} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 40}$$

Utilizando los datos de entrada para los intervalos de tiempo $k = 1, \dots, N$, el programa LORD calculará el resto de temperaturas. El software, una vez definidas las variables de salida (output), calcula los valores de los parámetros del sistema de las ecuaciones de la ecuación (Eq. 40) y la utiliza hasta que consigue minimizar la función objetivo.

En este caso quedaría representada de la siguiente forma:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{1,s,obs} - T_{1,s,calc}) \right)^2 \quad \text{Eq. 41}$$

Nota: Se pueden utilizar diferentes combinaciones de entrada (input) y salida (output) para el modelo e identificación de parámetros (resistencia térmica y capacitancia térmica).

Siguiendo el mismo procedimiento (modelo RC) empleado en esta sección, se calculan los parámetros de transferencia de calor de los diferentes componentes o capas que constituyen el muro base es decir, desde la LAYER2 a LAYER3 y de la LAYER3 a LAYER4. De esta manera, se consigue cuantificar el resto de los parámetros que caracterizan estos componentes.

5.2.1.2 Modelado de los parámetros del conjunto del muro base

Otra posibilidad de modelado RC para la identificación de los parámetros térmicos del muro base es la realización de este mediante el análisis del muro base en su conjunto ($T_{int} - T_{ext}$) como se puede ver en la Fig. 5.6. Este modelo es válido para identificar la capacidad térmica del propio muro base de doble hoja.

Por lo tanto, los dos modelos que se presentan en estas *secciones 4.2.1. y 4.2.2.* son validos para cuantificar e identificar los parámetros. El mejor modelo será aquel que aporte la mayor información con el menor número de parámetros.

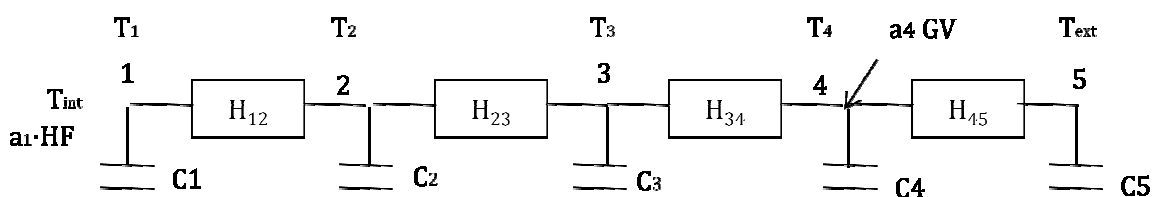


Fig. 5. 6. Modelo RC del muro base. TLAYER1 y TLAYER4 son las señales de temperatura medidas de las LAYER1 y LAYER4. El a1HF es el flujo de calor medido en la Layer1 (2HFT01). El Gv es la radiación global vertical. Text es la temperatura del aire exterior (2ATE01). (Ver Capítulo 3 para obtener información sobre precisión y posición de los sensores)

A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el proceso de transferencia de calor en el modelo representado en la Fig. 5.6 (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = (T_2 - T_1) \cdot H_{1-2} + a_1 \cdot q_1 \quad \text{Eq. 42}$$

$$C_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = (T_1 - T_2) \cdot H_{1-2} + (T_3 - T_2) \cdot H_{2-3} \quad \text{Eq. 43}$$

$$C_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = (T_2 - T_3) \cdot H_{2-3} + (T_4 - T_3) \cdot H_{3-4} \quad \text{Eq. 44}$$

$$C_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = (T_3 - T_4) \cdot H_{3-4} + (T_5 - T_4) \cdot H_{4-5} + a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 45}$$

$$C_5 \cdot \frac{dT_5}{dt} = (T_4 - T_5) \cdot H_{4-5} \quad \text{Eq. 46}$$

El modelo se utilizará asumiendo las siguientes entradas (input): q_1 (para este caso 1HFT01) y $T_5 = T_{\text{ext}} = 2\text{ATE01}$ y $G_v = 2\text{OGV01}$. Mientras que como salida (output) se tomará $T_1 = T_{i,s}$ (temperatura de LAYER1). El software Lord utilizará estas entradas y salidas para los diferentes supuestos para conseguir la identificación de los parámetros (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_1 \cdot \frac{T_{\text{layer1},k+1} - T_{\text{layer1},k}}{\Delta t} = (T_{2,k} - T_{\text{layer1},k}) \cdot H_{1-2} + a_1 \cdot q_{1,s,k} \quad \text{Eq. 47}$$

$$C_2 \cdot \frac{T_{2,k+1} - T_{2,k}}{\Delta t} = (T_{\text{layer1},k} - T_{2,k}) \cdot H_{1-2} + (T_{3,k} - T_{2,k}) \cdot H_{2-3} \quad \text{Eq. 48}$$

$$C_3 \cdot \frac{T_{3,k+1} - T_{3,k}}{\Delta t} = (T_{2,k} - T_{3,k}) \cdot H_{2-3} + (T_{4,k} - T_{3,k}) \cdot H_{3-4} \quad \text{Eq. 49}$$

$$C_4 \cdot \frac{T_{4,k+1} - T_{4,k}}{\Delta t} = (T_{3,k} - T_{4,k}) \cdot H_{3-4} + (T_{5,k} - T_{4,k}) \cdot H_{4-5} + a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 50}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser reorganizadas: para ello las variables desconocidas de tiempo del periodo $k + 1$ se colocan en el lado izquierdo. Mientras que en el lado derecho se colocan las variables de los valores ya calculados en el tiempo k junto con los parámetros a estimar. Nótese que las variables q_1 , G_v y T_{ext} son datos para el modelo y que son conocidos para todos los intervalos de tiempo, ya que son valores medidos. El valor de apertura (a_1) es igual a 1 para los flujos de calor medidos, pero (a_4)

no es igual a 1, solo una parte de la irradiación incidente es absorbida por la superficie exterior del muro base, por lo tanto deberá ser identificada.

$$T_{layer1,k+1} = T_{layer1,k} + \frac{\Delta t}{C_1} \cdot (T_{2,k} - T_{layer1,k}) \cdot H_{1-2} + \frac{\Delta t}{C_1} a_1 q_1 \quad \text{Eq. 51}$$

$$T_{2,k+1} = (T_{layer1,k} - T_{2,k}) \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} \cdot \Delta t + (T_{3,k} - T_{2,k}) \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2} \cdot \Delta t + T_{2,k} \quad \text{Eq. 52}$$

$$T_{3,k+1} = (T_{2,k} - T_{3,k}) \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} \cdot \Delta t + (T_{4,k} - T_{3,k}) \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3} \cdot \Delta t + T_{3,k} \quad \text{Eq. 53}$$

$$T_{4,k+1} = (T_{3,k} - T_{4,k}) \cdot \frac{H_{3-4}}{C_4} \cdot \Delta t + (T_{5,k} - T_{4,k}) \cdot \frac{H_{4-5}}{C_4} \cdot \Delta t + T_{4,k} + \frac{\Delta t}{C_4} \cdot a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 54}$$

Finalmente las ecuaciones anteriores se pueden escribir en notación matricial:

$$\begin{pmatrix} T_{layer1,k+1} \\ T_{2,k+1} \\ T_{3,k+1} \\ T_{4,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_1} & \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_1} & 0 & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{1-2}}{C_2} - \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_2} & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{2-3}}{C_3} - \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_3} & 0 \\ 0 & \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_4} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{3-4}}{C_4} - \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_4}\right) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{layer1,k} \\ T_{2,k} \\ T_{3,k} \\ T_{4,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta t \cdot \frac{a_1}{C_1} q_1 \\ 0 \\ 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_4} + \Delta t \cdot \frac{a_4}{C_4} G_v \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 55}$$

Utilizando los datos de entrada para los intervalos de tiempo $k = 1, \dots, N$, el software LORD calculará el resto de temperaturas. El software una vez definidas las variables de salida (output), calcula los valores de los parámetros del sistema de las ecuaciones de la ecuación. (Eq. 55) hasta que consigue minimizar la función objetivo. En este caso quedaría representada de la siguiente forma:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{layer1,obs} - T_{layer1,calc}) \right)^2 \quad \text{Eq. 56}$$

Se pueden utilizar diferentes combinaciones de entrada (input) y salida (output) para el modelo e identificación de parámetros (resistencia térmica, capacitancia térmica y apertura a_4). La apertura de a_4 nos dará el valor de la absorptividad efectiva de la

radiación solar global vertical en la capa externa superficial formada por ladrillo caravista.

5.2.2 Identificación de los parámetros

Para la obtención del modelo matemático se han utilizado los datos obtenidos durante la secuencia en la que se muestreó el muro base de doble hoja en solitario. El modelo se ha calculado en tres escenarios distintos. El primero comprende todo el periodo de ensayo del muro base de doble hoja, es decir, la secuencia I y la secuencia III mas el tiempo de estabilización entre ambos (del 21 junio al 15 de julio de 2012); el segundo periodo comprende la secuencia I (ROLBS); y el tercer periodo consta de la secuencia III (PRBS).

5.2.2.1 Identificación de las capas del muro base.

El muro base (descrito en el Capítulo 3 apartado 3.1) consiste en un cerramiento vertical de doble hoja constituido de interior a exterior por los siguientes materiales:

- Layer 1-Layer 2: tabique de ladrillo hueco doble de 6.4 cm de espesor y mortero de cemento con raseo fino de 1.5 cm de espesor
- Layer 2-Layer 3: cámara de aire de 10 cm de espesor
- Layer 3-Layer 4: ladrillo caravista a media asta de 10.8 cm

Los resultados de la identificación de los parámetros para los diferentes elementos constructivos que componen el muro base, pueden verse en la Tabla 5.8:

Tabla 5. 8. Resultados del modelo RC de muro base para las diferentes capas que lo componen

Modelo	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	Residual
Layer1-Layer2	3.78	0.26	153.74	0.18
Layer2-Layer3	2.66	0.37	0.00	0.19
Layer3-Layer4	8.42	0.12	65.40	0.81
∑Layer1-Layer4	1.33	0.75	219.14	

Como se observa en la Tabla 5.8. la primera capa que compone el muro base compuesto por mortero y ladrillo hueco doble, tiene una resistencia térmica de 0.26 °C m²/W. El valor de la segunda capa (cámara de aire) corresponde a una resistencia térmica de 0.37 °C m²/W. Por último, la capa compuesta por ladrillo caravista presenta un tercio de la capacidad de resistencia térmica de el resto de componentes.

El cálculo de la validación del modelo se presenta en la Fig. 5.7. La validación se realiza por medio de ajuste de la secuencia III y con el control de los residuos. Los errores en los sensores o cualquier otro tipo de no linealidad, como puede ser la dependencia de la temperatura puede darse durante la secuencia analizada, estos errores se observan en los residuos, la parte no ajustada de la secuencia.

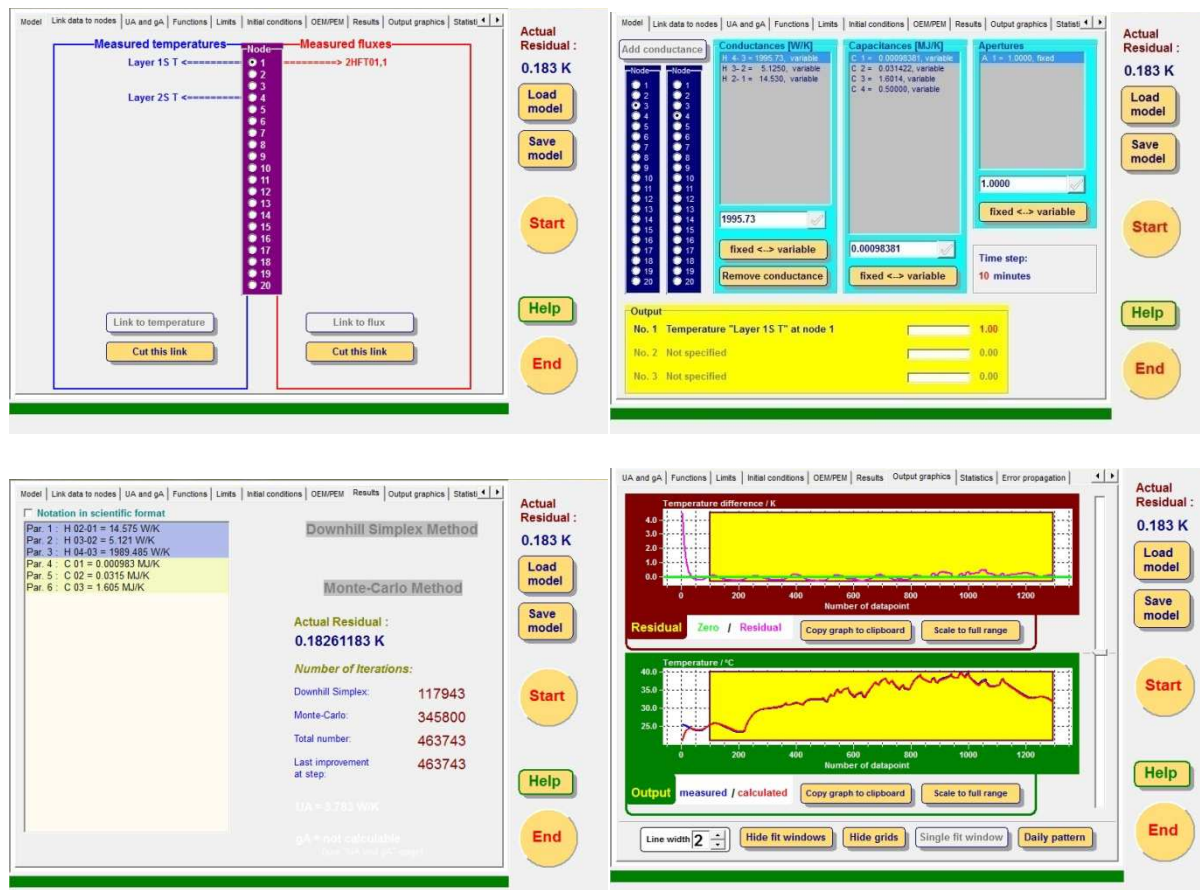


Fig. 5. 7. Resumen de la identificación del modelo matemático para la primera capa (Layer1) del muro base por medio del software LORD. La secuencia de datos corresponde a un periodo de PRBS. Las dos primeras imágenes dan la información del modelado. La tercera imagen da los resultados de la identificación junto con los residuales. La cuarta imagen gráfica la salida de temperatura calculada (línea roja) y la salida de temperatura medida (línea azul) junto a los residuales de temperatura, es decir la diferencia entre la salida calculada y la salida medida.

En la anterior identificación del modelo se observa que el error RMS de los residuales es de 0.18 °C, por lo tanto el error cometido está por debajo del error de precisión de las señales. Los resultados conseguidos mediante el programa LORD pueden considerarse correctos.

5.2.2.2 Identificación del conjunto del muro base

A continuación en la Tabla 5.9 se presentan los resultados de los parámetros térmicos del muro base en su conjunto es decir de la Layer1-Layer4 a lo largo de las diferentes secuencias de muestreo descrito en el Capítulo 4 apartado 3.

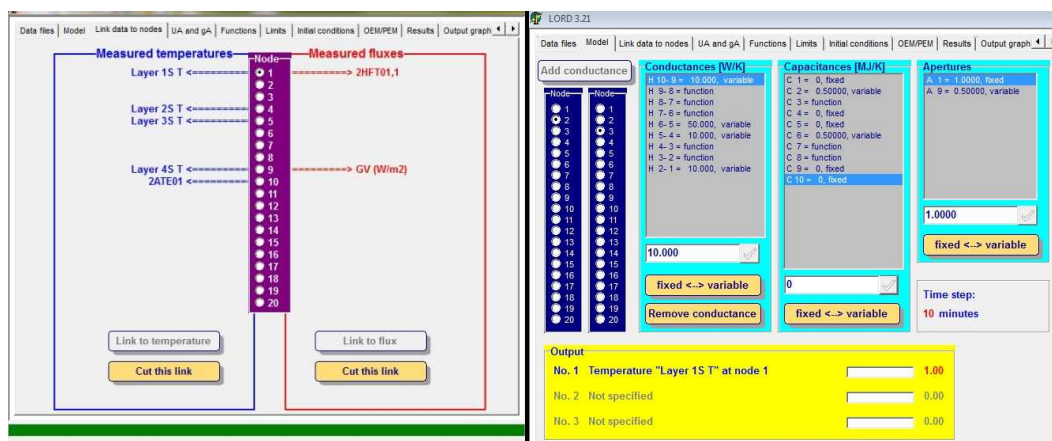
Tabla 5. 9. Resultados del modelo RC de muro base de doble hoja para las diferentes secuencias analizadas (Layer1-Layer4).

Modelo	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	a ₄	Residual
SEC I + SEC III	1.37	0.73	271	0.35	0.55
SEC I	1.35	0.74	240	0.37	0.34
SEC III	1.37	0.73	258	0.31	0.67
Average	1.36	0.73	256	0.34	

En la tabla 5.9 no se observan diferencias significativas entre los parámetros identificados en las diferentes secuencias de muestreo llevadas a cabo, durante las tres secuencias de cálculo los parámetros de resistencia térmica alcanza el mismo valor (0.74 °C m²/W).

El parámetro de apertura a₄ (0.34) representa el valor de la absorptividad efectiva de la radiación solar global vertical en la capa externa superficial del ladrillo caravista. El valor obtenido es menor al esperado, es decir queda por debajo de 0.66 que es valor que supuestamente tiene un ladrillo caravista rojo de esas características.

El cálculo de la validación del modelo se presenta en la Fig. 5.8. La validación se realiza por medio de ajuste de la secuencia III y con el control de los residuos.



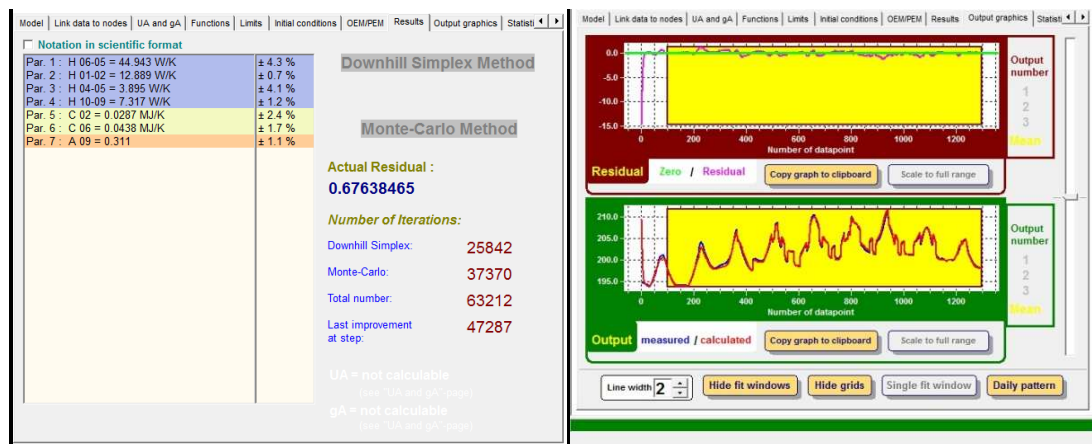


Fig. 5. 8. Resumen de la identificación del modelo matemático para el muro base realizado por medio del software LORD. La secuencia de datos incluye un periodo de PRBS. Arriba las dos imágenes da la información del modelado. Abajo a la izda. la imagen da los resultados de la identificación junto con los residuales. Abajo a la dcha. La imagen gráfica la salida calculada (línea roja) y la salida medida (línea azul), junto a los residuales, es decir la diferencia entre la salida calculada y la salida medida.

Para los dos tipos de identificación de parámetros se puede observar el buen comportamiento de la predicción y el buen ajuste de los residuales. En síntesis se puede observar como realizando la caracterización de los elementos por separado ($0.75 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$) o realizando la caracterización del muro base en su conjunto ($0.74 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$) el resultado obtenido es similar.

5.3 Modelo RC para una Fachada Ventilada

5.3.1 Modelado de los parámetros

Una vez identificado el modelo RC del muro base en el apartado anterior, se puede realizar el estudio de los parámetros que caracterizan la rehabilitación energética llevada sobre esta mediante una fachada ventilada. El enfoque de modelo RC para identificar el coeficiente global de transferencia de calor desde LAYER4 a la LAYER8 se puede ver en la Fig. 5.9. Este modelo también es válido para identificar la capacidad térmica de la solución constructiva específica para esta fachada ventilada.

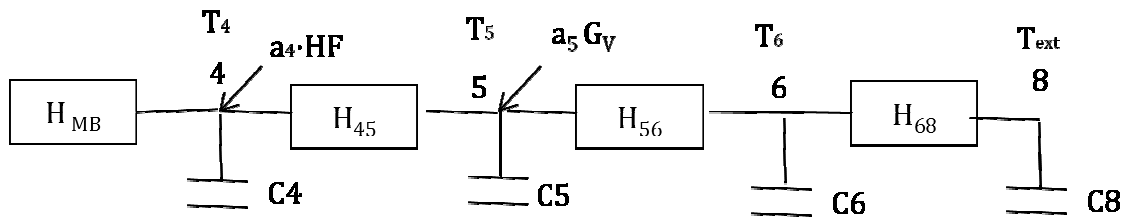


Fig. 5. 9. Modelo RC de la fachada ventilada-. T_4 y T_{ext} son las señales de temperatura medidas de las LAYER 4 y temperatura exterior de 2ATE01. El $a_4 \cdot HF$ es el flujo de calor medido en la Layer4 y G_v es la radiación vertical global. (Ver Capítulo 3) para obtener información sobre precisión y posición de los sensores)

A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el proceso de transferencia de calor en el modelo representado en la Fig. 5.9 (todas las unidades de la ecuación están en $[W/m^2]$).

$$C_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = (T_5 - T_4) \cdot H_{4-5} + a_4 \cdot q_4 \quad \text{Eq. 57}$$

$$C_5 \cdot \frac{dT_5}{dt} = (T_4 - T_5) \cdot H_{4-5} + (T_6 - T_5) \cdot H_{5-6} + a_5 \cdot G_v \quad \text{Eq. 58}$$

$$C_6 \cdot \frac{dT_6}{dt} = (T_5 - T_6) \cdot H_{5-6} + (T_8 - T_6) \cdot H_{6-8} \quad \text{Eq. 59}$$

$$C_8 \cdot \frac{dT_8}{dt} = (T_6 - T_8) \cdot H_{6-8} \quad \text{Eq. 60}$$

El modelo se utilizará asumiendo las siguientes entradas (input): q_4 (para este caso 1HFT04) y $T_8 = T_{ext} = 2ATE01$ y $G_v = 2OGV01$. Mientras que como salida (output) se tomará T_4 (temperatura de LAYER4). El software Lord utilizará estas entradas y salidas para los diferentes supuestos para conseguir la identificación de los parámetros (todas las unidades de la ecuación están en $[W /m^2]$).

$$C_4 \cdot \frac{T_{layer4,k+1} - T_{layer4,k}}{\Delta t} = (T_{5,k} - T_{layer4,k}) \cdot H_{4-5} + a_4 \cdot q_{layer4,k} \quad \text{Eq. 61}$$

$$C_5 \cdot \frac{T_{5,k+1} - T_{5,k}}{\Delta t} = (T_{layer4,k} - T_{5,k}) \cdot H_{4-5} + (T_{6,k} - T_{5,k}) \cdot H_{5-6} + a_5 \cdot G_v \quad \text{Eq. 62}$$

$$C_6 \cdot \frac{T_{6,k+1} - T_{6,k}}{\Delta t} = (T_{5,k} - T_{6,k}) \cdot H_{5-6} + (T_{8,k} - T_{6,k}) \cdot H_{5-6} \quad \text{Eq. 63}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser reorganizadas: para ello las variables desconocidas de tiempo del periodo $k + 1$ se colocan en el lado izquierdo. Mientras que en el lado derecho se colocan las variables de los valores ya calculados en el tiempo k

junto con los parámetros a estimar. Las variables q , G_v y T_8 son datos para el modelo y son conocidos para todos los intervalos de tiempo, ya que son valores medidos. El valor de apertura (a_4) es igual a 1 para los flujos de calor medidos, pero (a_5) no es igual a 1, solo una parte de la irradiación incidente es absorbida por la superficie exterior de la lana de roca, por lo tanto deberá ser identificada. Este valor de la apertura a_5 nos dará el valor de la absorptividad solar efectiva de la capa 5.

$$T_{layer4,k+1} = T_{layer4,k} + \frac{\Delta t}{C_4} \cdot (T_{5,k} - T_{layer4,k}) \cdot H_{4-5} + \frac{\Delta t}{C_4} a_4 q_4 \quad \text{Eq. 64}$$

$$T_{5,k+1} = (T_{layer4,k} - T_{5,k}) \cdot \frac{H_{4-5}}{C_5} \cdot \Delta t + (T_{6,k} - T_{5,k}) \cdot \frac{H_{5-6}}{C_5} \cdot \Delta t + T_{5,k} + \frac{\Delta t}{C_5} \cdot a_5 \cdot G_v \quad \text{Eq. 65}$$

$$T_{6,k+1} = (T_{6,k} - T_{5,k}) \cdot \frac{H_{5-6}}{C_6} \cdot \Delta t + (T_{8,k} - T_{6,k}) \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6} \cdot \Delta t + T_{6,k} \quad \text{Eq. 66}$$

Finalmente las ecuaciones anteriores se pueden escribir en notación matricial:

$$\begin{pmatrix} T_{layer4,k+1} \\ T_{5,k+1} \\ T_{6,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_4} & \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_4} & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_5} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{4-5}}{C_5} - \Delta t \cdot \frac{H_{5-6}}{C_5}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{5-6}}{C_5} \\ 0 & \Delta t \cdot \frac{H_{5-6}}{C_6} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{5-6}}{C_6} - \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{layer4,k} \\ T_{5,k} \\ T_{6,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta t \cdot \frac{a_4}{C_4} q_4 \\ \Delta t \cdot \frac{a_5}{C_5} G_v \\ \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 67}$$

Utilizando los datos de entrada para los intervalos de tiempo $k = 1, \dots, N$, el software LORD calculará el resto de temperaturas. El software una vez definidas las variables de salida (output), calcula los valores de los parámetros del sistema de las ecuaciones de la ecuación. (Eq. 68) hasta que consigue minimizar la función objetivo. En este caso quedaría representada de la siguiente forma:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{layer4,obs} - T_{layer4,calc}) \right)^2 \quad \text{Eq. 68}$$

Se pueden utilizar diferentes combinaciones de entrada (input) y salida (output) para el modelo e identificación de parámetros (resistencia térmica y capacitancia térmica).

5.3.2 Identificación de los parámetros

En la identificación de los parámetros de fachada ventilada se han utilizado los datos obtenidos durante la secuencia de datos obtenida en Agosto de 2012. Esta incluye tres situaciones distintas. El primero comprende todo el periodo de ensayo de la fachada ventilada, es decir, la secuencia II y la secuencia IV más el tiempo de estabilización entre ambos (del 1 de agosto al 31 de agosto de 2012). El segundo comprende la secuencia II (ROLBS), y el tercero la secuencia IV (PRBS).

La validación se realiza por medio de ajuste de toda la serie de datos y control de los residuos. Los errores en los sensores o cualquier otro tipo de no linealidad, como puede ser la dependencia de la temperatura puede darse durante la secuencia analizada, estos errores se observan en la parte no ajustada de los residuos.

5.3.2.1 Identificación de las capas de la fachada ventilada

A lo largo de esta sección se analizan en detalle los parámetros térmicos que caracterizan la fachada ventilada y sus diferentes capas bajo condiciones reales de ensayo. El objetivo ha sido estudiar el comportamiento de los diferentes elementos que componen la fachada ventilada sobre el muro base de doble hoja, compuesta por lana de roca, cámara de aire y aplacado cerámico.

Los resultados de la identificación de los parámetros para los diferentes elementos constructivos que componen la fachada ventilada pueden verse en la Tabla 5.10:

Tabla 5. 10. Resultados del modelo RC de la fachada ventilada para las diferentes capas que lo componen

Modelo	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	Residual
Layer1-Layer4	1.35	0.74	245	
Layer4-Layer5	0.63	1.59	235	0.65
Layer5-Layer6	9.10	0.11	0	
Layer6-Layer8	38.46	0.026	35	0.94
∑Layer1-Layer8	0.40	2.46	470	

Como se observa en la Tabla 5.10. el primer elemento después del muro base tiene una resistencia térmica muy elevada, 1.59 °C m²/W, este elemento constructivo, lana de roca de 5 cm, actúa como aislante en la fachada ventilada y aporta el aislamiento preciso que necesita el muro base en una hipotética rehabilitación de fachada. La siguiente capa, la

cámara de aire ventilada tiene una resistencia térmica de $0.11 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$, por último el acoplado cerámico presenta una resistencia térmica baja $0.026 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$.

Como consecuencia de los valores de los parámetros identificados en la fachada ventilada, se observa cómo la suma de los elementos integrantes de la fachada ventilada sobre el muro base le proporcionan características térmicas aislantes extras

Al comparar los datos obtenidos con la fachada ventilada con respecto a los obtenidos con los del muro base antes de la rehabilitación, la principal diferencia al incorporar este elemento radica en el aumento de la capacidad de aislamiento de la fachada ventilada gracias a los 5 cm de lana de roca y cámara de aire que le aportan una resistencia térmica extra de $1.70 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$, demostrando que la fachada ventilada resulta positiva en el aislamiento térmico de fachadas.

La medida de absorptividad solar efectiva aporta información sobre el efecto termoregulador de la fachada ventilada, ya que son los elementos constructivos característicos de cada fachada los que determinan el balance térmico de esta. Al realizarse la medida de este parámetro en la fachada ventilada se registró un valor de a_5 de 0.21. Comparando el valor de esta solución constructiva con el valor del muro base doble de partida 0.34 se obtiene un aumento de la capacidad de enfriamiento del 60%. Con lo que se comprueba que la fachada ventilada es beneficiosa para lograr el confort interior ya que su uso resulta positivo en el balance térmico de la fachada en verano.

5.4 Modelo RC para una Fachada Vegetal

5.4.1 Modelado de los parámetros

Una vez identificado el modelo RC del muro base se puede realizar el estudio de los parámetros que caracterizan la fachada vegetal. Siguiendo el mismo procedimiento empleado en secciones anteriores, se calculan los parámetros térmicos para el caso de fachada vegetal. El enfoque de modelo RC para identificar el coeficiente global de transferencia de calor desde LAYER4 a la LAYER9 se puede ver en la Fig. 5.10 Este modelo también es válido para identificar la capacidad térmica de la parte de la solución constructiva específica para esta fachada vegetal.

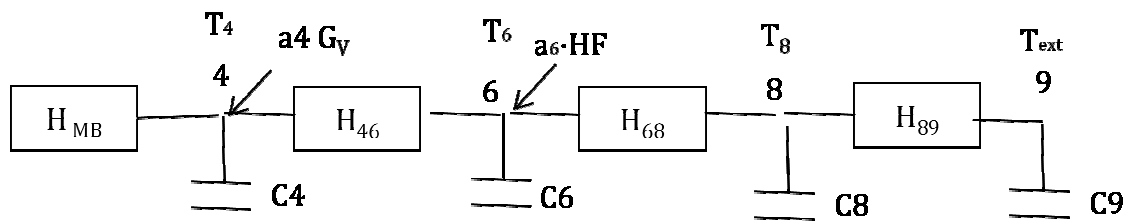


Fig. 5. 10. Modelo RC de la fachada vegetal-. TLAYER4 y Text son las señales de temperatura medidas de las LAYER4 y exterior 2ATE01. El a6 HF es el flujo de calor medido en la Layer6 y Gv es la radiación vertical global. (Ver Capítulo 3) para obtener información sobre precisión y posición de los sensores)

La realización del modelo se realiza de forma análoga a las secciones anteriores. En primer lugar, se presentan las ecuaciones que rigen el proceso de transferencia de calor en el modelo representado en la Fig. 5.10 (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = (T_6 - T_4) \cdot H_{4-6} + a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 69}$$

$$C_6 \cdot \frac{dT_6}{dt} = (T_4 - T_6) \cdot H_{4-6} + (T_8 - T_6) \cdot H_{6-8} + a_6 \cdot q_6 \quad \text{Eq. 70}$$

$$C_8 \cdot \frac{dT_8}{dt} = (T_6 - T_8) \cdot H_{6-8} + (T_9 - T_8) \cdot H_{8-9} \quad \text{Eq. 71}$$

$$C_9 \cdot \frac{dT_9}{dt} = (T_8 - T_9) \cdot H_{8-9} \quad \text{Eq. 72}$$

El modelo se utilizará asumiendo las siguientes entradas (input): q₆ (para este caso 1HFT06) y T₉ = T_{ext} = 2ATE01 y G_v = 2OGV01. Mientras que como salida (output) se tomará T₄ (temperatura de LAYER4). El software Lord utilizará estas entradas y salidas para los diferentes supuestos para conseguir la identificación de los parámetros (todas las unidades de la ecuación están en [W/m²]).

$$C_4 \cdot \frac{T_{layer4,k+1} - T_{layer4,k}}{\Delta t} = (T_{6,k} - T_{layer4,k}) \cdot H_{4-6} + a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 73}$$

$$C_6 \cdot \frac{T_{6,k+1} - T_{6,k}}{\Delta t} = (T_{layer4,k} - T_{6,k}) \cdot H_{4-6} + (T_{8,k} - T_{6,k}) \cdot H_{6-8} + a_6 \cdot q_{6,k} \quad \text{Eq. 74}$$

$$C_8 \cdot \frac{T_{8,k+1} - T_{8,k}}{\Delta t} = (T_{6,k} - T_{8,k}) \cdot H_{6-8} + (T_{9,k} - T_{8,k}) \cdot H_{8-9} \quad \text{Eq. 75}$$

Las ecuaciones anteriores pueden ser reorganizadas: para ello las variables desconocidas de tiempo del periodo k + 1 se colocan en el lado izquierdo. Mientras que

en el lado derecho se colocan las variables de los valores ya calculados en el tiempo k junto con los parámetros a estimar. Las variables q , G_v y T_9 son datos para el modelo y que son conocidos para todos los intervalos de tiempo, ya que son valores medidos. El valor de apertura (a_6) es igual a 1 para los flujos de calor medidos, pero (a_4) no es igual a 1, solo una parte de la irradiación incidente es absorbida por la superficie exterior del muro base, por lo tanto deberá ser identificada.

$$T_{layer4,k+1} = T_{layer4,k} + \frac{\Delta t}{C_4} \cdot (T_{6,k} - T_{layer4,k}) \cdot H_{4-6} + \frac{\Delta t}{C_4} \cdot a_4 \cdot G_v \quad \text{Eq. 76}$$

$$T_{6,k+1} = (T_{layer4,k} - T_{6,k}) \cdot \frac{H_{4-6}}{C_6} \cdot \Delta t + (T_{8,k} - T_{6,k}) \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6} \cdot \Delta t + T_{6,k} + \frac{\Delta t}{C_6} a_6 q_6 \quad \text{Eq. 77}$$

$$T_{8,k+1} = (T_{6,k} - T_{8,k}) \cdot \frac{H_{6-8}}{C_8} \cdot \Delta t + (T_{9,k} - T_{8,k}) \cdot \frac{H_{8-9}}{C_8} \cdot \Delta t + T_{8,k} \quad \text{Eq. 78}$$

Finalmente las ecuaciones anteriores se pueden escribir en notación matricial:

$$\begin{pmatrix} T_{layer4,k+1} \\ T_{6,k+1} \\ T_{8,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \Delta t \cdot \frac{H_{4-6}}{C_4} & \Delta t \cdot \frac{H_{4-6}}{C_4} & 0 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{4-6}}{C_6} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{4-6}}{C_6} - \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6}\right) & \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_6} \\ 0 & \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_8} & \left(1 - \Delta t \cdot \frac{H_{6-8}}{C_8} - \Delta t \cdot \frac{H_{8-9}}{C_8}\right) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_{layer4,k} \\ T_{6,k} \\ T_{8,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta t \cdot \frac{a_4}{C_4} G_v \\ \Delta t \cdot \frac{a_6}{C_6} q_6 \\ \Delta t \cdot \frac{H_{8-9}}{C_8} \end{pmatrix} \quad \text{Eq. 79}$$

Utilizando los datos de entrada para los intervalos de tiempo $k = 1, \dots, N$, el software LORD calculará el resto de temperaturas. El software una vez definidas las variables de salida (output), calcula los valores de los parámetros del sistema de las ecuaciones de la ecuación. (Eq. 80) hasta que consigue minimizar la función objetivo. En este caso quedaría representada de la siguiente forma:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|\varepsilon_k(\theta)\|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left((T_{layer4,obs} - T_{layer4,calc}) \right)^2 \quad \text{Eq. 80}$$

Se pueden utilizar diferentes combinaciones de entrada (input) y salida (output) para el modelo e identificación de parámetros (resistencia térmica y capacitancia térmica).

5.4.2 Identificación de los parámetros

En la identificación de los parámetros de fachada vegetal se han utilizado largas secuencias de datos obtenidos a la largo del periodo de ensayo. Esta incluye tres situaciones distintas. El primero comprende el periodo de ensayo de la fachada vegetal en la célula EGUZKI cuando la fachada no se encontrada completamente vegetada (40 %), la secuencia V y la secuencia XV más el tiempo de estabilización entre ambos (del 1 de enero al 03 de marzo de 2013). El segundo periodo comprende la secuencia IX (PRBS, del 28 de enero al 03 de febrero de 2014). El tercer periodo comprende la secuencia XI (PRBS, del 08 de julio al 16 de julio de 2014).

5.4.2.1 Identificación de las capas de la fachada vegetal

A lo largo de esta sección se analizan en detalle los parámetros térmicos que caracterizan la fachada vegetal y sus diferentes capas bajo situaciones reales de ensayo. El objetivo ha sido estudiar el comportamiento de la fachada vegetal instalada sobre el muro base de doble hoja, compuesta por cámara de aire, modulo vegetal y una última capa de vegetación.

Los resultados de la identificación de los parámetros para los diferentes elementos constructivos que componen la fachada vegetal para las diferentes secuencias de datos analizadas pueden verse a continuación. En la primera Tabla 5.11. se muestran los resultados de las primeras capas (Layer1-Layer4), es decir, los componentes que forman el muro base de doble hoja.

Tabla 5. 11. Resultados del modelo de muro base (LAYER1-LAYER4) para las diferentes secuencias a analizadas.

Periodo	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	Residual
SEC V + XV	1.27	0.79	185.30	1.07
SEC VI + VII + VIII	1.33	0.75	238.50	0.99
SEC X + XIII + XVI	1.27	0.79	181.10	0.66
SEC X + XIV + XVII	1.27	0.79	224.20	0.66
SEC XVII + XI + XIX	1.27	0.79	198.70	1.35
Average	1.28	0.78	205.56	0.94

Analizando la tabla anterior, se observa como la transmitancia térmica del muro base de doble hoja (Layer1-Layer4) varía entre 1.27 y 1.33 W/ °C m² a lo largo de diferentes periodos de ensayo realizados. El valor más elevado de transmitancia térmica lo presenta

el periodo formado por las secuencias VI + VII + VIII, periodo de verano de 2013, mientras que el resto de series corresponde a periodos no estivales.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros que componen el muro base Layer1 a la Layer4 para diferentes secuencias de datos. Se realiza el cálculo del resto de capas que componen la fachada vegetal desde la Layer4 a la Layer9. Los resultados de la identificación de los parámetros para los diferentes elementos constructivos que componen la fachada vegetal para las diferentes secuencias de datos analizadas pueden verse en la Tabla 5.12.

Tabla 5. 12. Resultados del modelo RC de la fachada vegetal para las diferentes capas que lo componen

Modelo	U [W/°C m ²]	R [°C m ² /W]	C [kJ/°C m ²]	Residual
Layer1-Layer4	1.28	0.78	205.56	0.94
Layer4-Layer6	10.00	0.10	0	
Layer6-Layer8	4.34	0.23	96.12	0.26
Layer8-Layer9	7.14	0.14	12.03	0.64
∑Layer1-Layer9	0.79	1.26	313.71	

En la tabla anterior se pueden observar los parámetros térmicos de las diferentes capas que componen la fachada vegetal. La cámara de aire (Layer4-Layer6) le aporta una resistencia térmica de 0.10 °C m²/W, el modulo vegetal 0.23 °C m²/W y por último la vegetación le añade 0.14 °C m²/W. Como consecuencia se observa el efecto positivo en el aislamiento de la envolvente gracias a la fachada vegetal, ya que la incorporación de este elemento constructivo mejora el aislamiento del muro base doble inicial.

Paralelamente a las medidas de los parámetros térmicos se ha analizado la absorptividad (a_4) de la fachada vegetal, este presenta un valor de 0.11, lo que supone una reducción del 68 % al compararla con la situación inicial del muro base. Esta característica podría ser una de las principales responsables en la refrigeración de la fachada. El valor de este parámetro evidencia que la fachada vegetal es beneficiosa para lograr el confort interior refrigerando la fachada exterior del edificio.

5.5 Análisis de los resultados

Se han llevado a cabo el análisis de la resistencia térmica de diferentes soluciones constructivas partiendo de un muro base de doble hoja, el cual se ha rehabilitado en fachada ventilada y posteriormente en fachada vegetal. Para ello se ha utilizado un modelo RC con el programa LORD a fin de verificar las características térmicas de estas dos diferentes soluciones constructivas sobre un mismo muro base de hoja doble como partida.

El análisis detallado de las resistencias térmicas a través de los diferentes elementos en LORD muestra que el valor total obtenido del muro base de doble hoja en su conjunto no presenta diferencias significativas entre los diferentes modelos en los que se ha realizado el análisis térmico. Es decir, los datos recogidos en los apartados anteriores muestran como durante todos los ensayos realizados para el muro base, ya sea mediante la caracterización de cada uno de sus elementos y posterior suma total o mediante la caracterización global de la solución analizada, en la determinación y caracterización térmica de la fachada ventilada y vegetal, el valor de resistencia térmica del muro base no presenta diferencias significativas con un valor de $0.76 \pm 0.03 \text{ } ^\circ\text{C m}^2/\text{W}$.

En la caracterización de la rehabilitación del muro base de hoja doble. Los valores máximos de aislamiento en la rehabilitación se consiguen mediante la instalación de una fachada ventilada cerámica con lana de roca de 5 cm como aislante térmico. Este elemento le aporta una resistencia térmica de $1.59 \text{ } ^\circ\text{C m}^2/\text{W}$ extra al muro base de partida. Lo que sumado a la cámara de aire ventilada y la resistencia de la propia placa cerámica consiguen que la fachada ventilada tenga una resistencia térmica de $2.46 \text{ } ^\circ\text{C m}^2/\text{W}$.

Por el otro lado, la segunda rehabilitación térmica que consistió en la construcción de la fachada vegetal sin ningún elemento aislante a parte del propio modulo vegetal que incluye el sustrato y las plantas. De esta forma se puede caracterizar de forma óptima los flujos de calor a través de los módulos y la propia vegetación. Por ello, los resultados obtenidos de esta solución de rehabilitación se encuentran muy por debajo de la primera solución, alcanzado valores de $0.47 \text{ } ^\circ\text{C m}^2/\text{W}$. Por último cabe señalar que añadiendo, al igual que en la fachada ventilada, 5 cm de lana de roca sobre el muro base, la fachada modular vegetal conseguiría elevar cuantitativamente la capacidad aislante.

Aumentar el confort térmico supone reducir la influencia de las temperaturas extremas exteriores tanto de verano como de invierno sobre la temperatura interior del edificio, reduciendo así las necesidades de energía con el fin de mantener la temperatura interior estable ya sea mediante refrigeración o calefacción. Los resultados obtenidos de absorptividad efectiva de las diferentes soluciones analizadas (ladrillo caravista 0.34, fachada ventilada 0.21 y fachada vegetal 0.11) demuestran que tanto las fachadas ventiladas como las fachadas vegetales pueden ser empleadas como estrategias de enfriamiento pasivo. En el caso de la fachada ventilada el porcentaje de disminución es de un 60% mientras que con la fachada vegetal se llega a porcentajes mayores, llegando a reducirlo al 68% respecto de la situación inicial.

El empleo de estas soluciones constructivas supondría un descenso de la temperatura de los edificios durante la época de calor, favoreciendo el confort de los usuarios y disminuyendo la demanda energética. En la época de frío por el contrario el efecto de enfriamiento pasivo sería negativo, pero se debe tener en cuenta que durante el invierno tanto la radiación solar como la temperatura son menores por lo que la capacidad evapotranspirativa de las plantas también se reduce. De esta comparación se desprende que es posible tener un mejor comportamiento energético de la fachada vegetal con la instalación de un aislante entre la fachada original y la fachada vegetal, lo que mejoraría su comportamiento térmico tanto en verano como en invierno.

6 Modelo CTSM

En esta sección se caracterizarán los parámetros de los componentes constructivos descritos en el Capítulo 3 aplicando métodos dinámicos de identificación de sistemas, con el objetivo de comprobar las mejoras que pueden aportar estos métodos de identificación, a la hora de poder caracterizar cada elemento constructivo respectivamente (muro base de doble hoja, fachada ventilada cerámica ligera y fachada vegetal modular).

El procedimiento de identificación de parámetros se llevó a cabo por medio del software CTSM. Se trata de un programa informático para realizar modelado mediante tiempo continuo estocástico. El programa fue desarrollado por el departamento de Modelización Informática y Matemática (IMM) de la Universidad Técnica de Dinamarca

(DTU) [134]. El programa estima los parámetros ajustando el modelo estadístico mediante la estimación de máxima verosimilitud (MLE). Por otro lado, como se ha comentado en la sección anterior, el software LORD, que también se desarrolló durante los proyectos PASLINK, se utiliza con el mismo fin, pero estima los parámetros por medio de método de mínimos cuadrados. Ambos permiten el modelado e identificación de sistemas térmicos, en particular, de los componentes o elementos constructivos [129].

El programa CTSM calcula los parámetros característicos (R y C). Para ello, necesita las características de algunos datos de entrada, es decir algunos datos deben ser proporcionados al software. Esos datos son los obtenidos en el período de observación, como son: la potencia, la temperatura interior o la irradiancia solar vertical global.

El desarrollo de este modelo matemático se basa en los datos que se recogieron durante varias secuencias de ensayos llevados a cabo desde junio de 2012 a diciembre de 2014 en celdas de ensayo PASLINK, sobre un muro base de doble hoja, una fachada ventilada y una fachada vegetal. El monitoreo de cada una de las secuencias que a continuación se caracterizan han sido descritos a fondo en el Capítulo 4.

6.1 Identificación de los parámetros

A continuación se presentará la técnica de identificación de sistemas a partir del uso de modelos en ecuaciones diferenciales estocásticas. Para ello se indican las bases de transmisión de calor para introducir a continuación las herramientas matemáticas del método dinámico las cuales permiten la identificación de los parámetros térmicos.

6.1.1 Sistema de ecuación del modelo

La temperatura superficial del muro puede ser calculada, bajo ciertas suposiciones, por medio de una ecuación diferencial ordinaria, Eq. 81 [144].

$$C_s \frac{dT_{se}}{dt} = -h_{se} A (T_{se} - T_e) - \frac{A (T_{se} - T_w)}{R_c} + \alpha A G_v \quad \text{Eq. 81}$$

Donde: C_s es la capacidad efectiva de la superficie del muro, T_{se} , T_e y T_w son las temperaturas de la superficie exterior del muro, ambiente exterior y en un punto interior del muro, respectivamente, h_{se} es el coeficiente de transmitancia térmica superficial exterior, α es la absortividad efectiva del muro, A es el área del muro, R_c es el

coeficiente de resistencia térmica entre la superficie del muro y un punto interior del mismo, y G_v es la irradiancia solar vertical global.

Para simplificar el uso de la Eq. 76 se introducen las siguientes relaciones de ecuaciones Eq. 77 y Eq. 78:

$$K = \frac{h_{se} + 1/R_c}{C_s} A \quad \text{Eq. 82}$$

$$T_\infty = \frac{h_{se}}{h_{se} + 1/R_c} T_e + \frac{1/R_c}{h_{se} + 1/R_c} T_w + \frac{\alpha}{h_{se} + 1/R_c} G_v \quad \text{Eq. 83}$$

Quedando la Eq. 81 de una forma más compacta como se muestra a continuación:

$$\frac{dT_{se}}{dt} + KT_{se} = KT_\infty \quad \text{Eq. 84}$$

cuya solución viene dada por la Eq.85:

$$T_{se} = (T_{s0} - T_\infty)e^{-kt} + T_\infty \quad \text{Eq. 85}$$

Donde T_{s0} es la temperatura inicial de la superficie.

6.2 Modelos SDE para un Muro de doble hoja

A continuación se presentan los dos modelos supuestos para obtener los parámetros térmicos necesarios para caracterizar el muro base de hoja doble basados en ecuaciones diferenciales estocásticas.

Se han analizado dos modelos:

- 5.2.1. El modelo 1 con un estado no medido
- 5.2.2. El modelo 2 con dos estados no medidos

En cuanto a aumentar la complejidad de los modelos estocásticos empleados, se estudió la posibilidad de incluir más estados para tratar de comprobar si la descripción del muro base podía ser más precisa aumentando la complejidad de su estudio. Pero los resultados no fueron buenos debido a que los modelos con un mayor número de estados no medidos no presentaban una mejora significativa en la estimación de parámetros, y sin embargo el cálculo y la identificación eran más complejos.

A continuación se indican las distintas variables y parámetros que forman parte de los modelos:

Variables medidas:

- T_e , T_i , T_{se} : son la temperatura exterior, la temperatura interior y la temperatura superficial exterior del muro respectivamente.
- Q_i , G_v son la densidad de flujo de calor a través de la superficie interior del muro y la irradiancia solar vertical global.

Variables de estado

- T , T_1 , T_2 son temperaturas en el interior del muro que no se han medido directamente.

Parámetros estimados:

- R_1 , R_2 , R_3 , h_{se} son coeficientes de resistencia térmica del muro y el coeficiente de convección superficial del muro, respectivamente.
- C_1 , C_2 son las capacidades térmicas efectivas de parte del muro.
- α es la absorptividad solar efectiva del muro.

6.2.1 Modelo de un estado no medido

En la siguiente figura (Fig. 5.11) se muestra de forma esquemática las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través del muro.

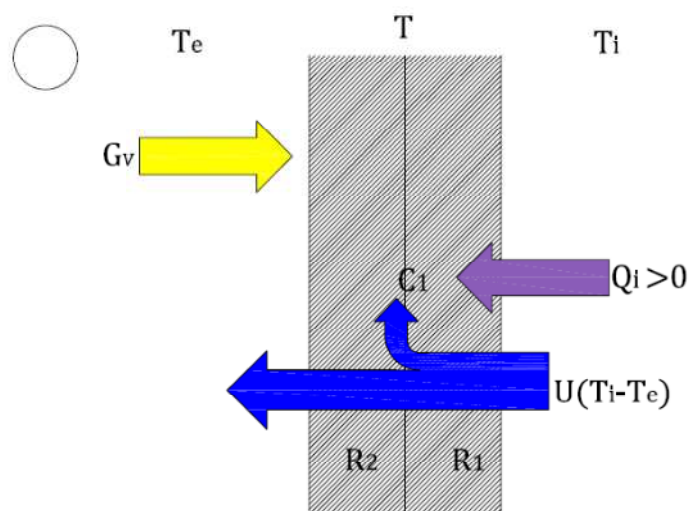


Fig. 5. 11. Modelo del flujo de calor del muro base de doble hoja considerando un estado interior no medido.

La ecuación de estado que describe el balance de energía viene dada por la siguiente ecuación Eq. 86:

$$dT = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_e - T) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T) + \frac{\alpha}{C_1 \cdot h_{se} \cdot R_2} G_v \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 86}$$

donde T es la variable de estado no medida.

La ecuación de observación viene dada por la Eq. 87:

$$Q_i = \frac{(T_i - T)}{R_1} + e_1 \quad \text{Eq. 87}$$

6.2.1.1 Identificación de los parámetros físicos

A partir de los modelos mostrados en la sección anterior pueden obtenerse los parámetros físicos necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico del muro base de hoja doble.

La capacidad efectiva del muro es obtenida mediante la expresión que puede verse en la Eq. 88:

$$C = \sum_i C_i A \quad \text{Eq. 88}$$

Donde C_i son las capacidades efectivas del muro correspondientes a cada estado estimado, y A es el área del muro.

El valor de la resistencia térmica R se obtiene a partir de la identificación de los parámetros obtenido en el modelo, como se muestra en la Eq. 89:

$$R = \sum_i R_i \quad \text{Eq. 89}$$

Donde R_i son las resistencias térmicas parciales estimadas para cada caso.

El valor de la transmitancia térmica (U) es la inversa de la resistencia térmica.

6.2.1.2 Estimación de los parámetros de un estado no medido

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos del muro pueden verse en la Tabla 5.13. En ella se muestran, para las dos secuencias de datos realizadas (SEC I y SEC III), los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), el coeficiente de convección (h_{se}) y la absorptividad efectiva (α) del muro base.

Tabla 5. 13. Resultados del modelo de un estado no medido del muro base para las diferentes secuencias analizadas.

Modelo	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]	U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]	C [$\text{kJ}/^{\circ}\text{C m}^2$]	h_{se} [$\text{W}/\text{m}^2 ^{\circ}\text{C}$]	α
SEC I	0.94 ± 0.016	1.06	247 ± 34	6.27 ± 2.34	0.72 ± 0.37
SEC III	0.97 ± 0.014	1.03	298 ± 15	6.25 ± 1.89	0.71 ± 0.43
Average	0.96 ± 0.015	1.04	273 ± 25	6.26 ± 2.11	0.72 ± 0.40

En la tabla anterior se muestran los resultados dinámicos del comportamiento térmico de un muro de hoja doble. Se pueden observar las estimaciones de los parámetros físicos que caracterizan este elemento constructivo, la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva del muro (C), junto a los errores de las mediciones. El parámetro de resistencia térmica se desvía un 20% de los valores estimados por otros métodos. A pesar de ello, los valores de los parámetros estimados coinciden en gran medida con los valores de los parámetros estimados mediante el método de la media y el programa LORD en lo que respecta al valor del coeficiente de convección combinado superficial y la capacidad efectiva del muro. La incertidumbre de las estimaciones está dentro de unos límites aceptables.

6.2.1.3 Análisis de residuos de un estado no medido

Uno de los criterios para validar los modelos es el análisis de los residuos conseguidos entre los valores medidos para el flujo de calor, Q_i , y los valores de la predicción un instante después proporcionados por el modelo matemático, ver Eq. 86.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si este cumple con las propiedades de ruido blanco, de esta forma se estima la bondad de ajuste del modelo matemático.

El resultado del análisis para el modelo 1 de un estado no medido, para las dos series de datos elegidas, se muestra en la siguiente Fig. 5.12.

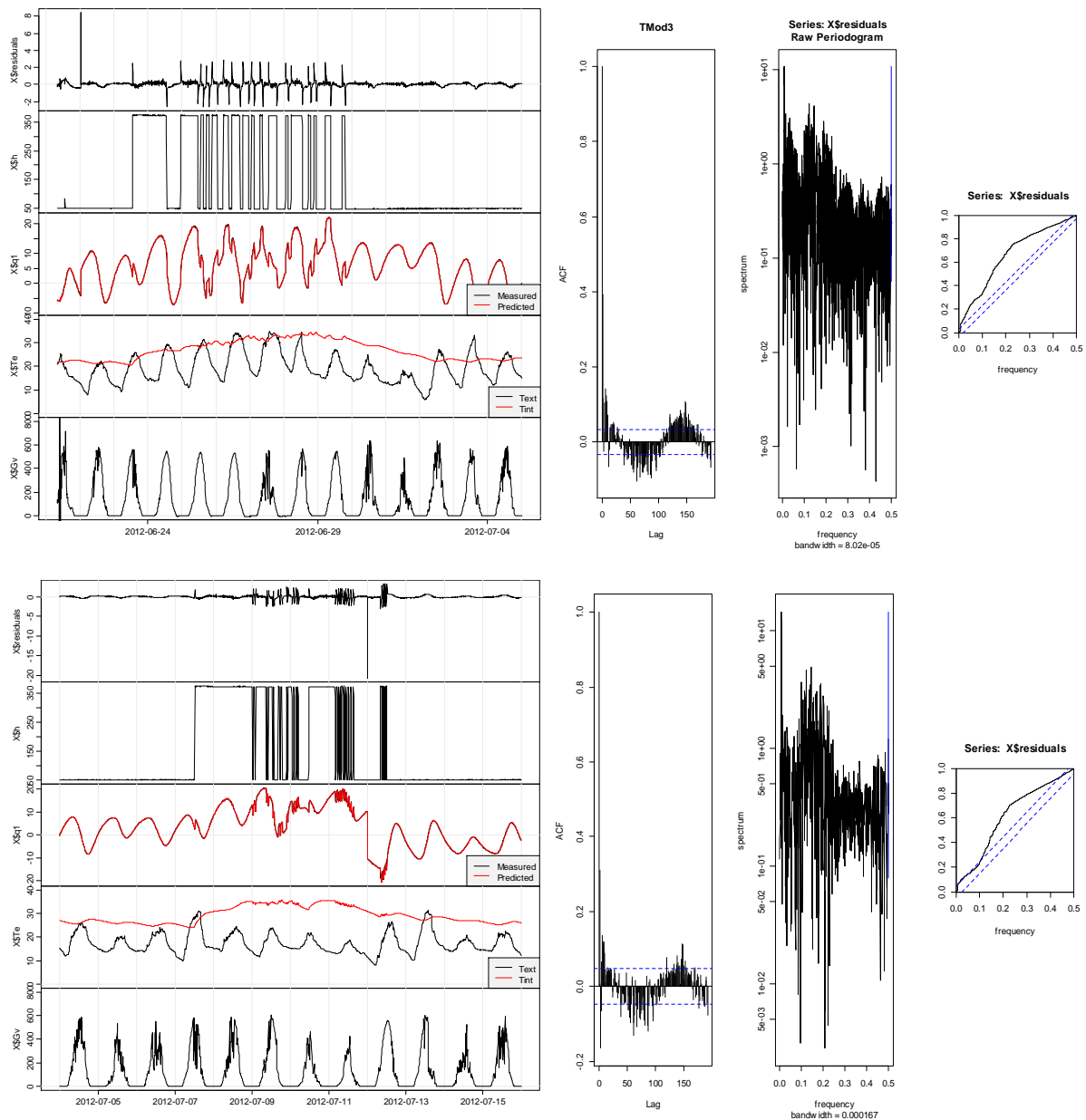


Fig. 5. 12. Autocorrelación y periódograma de los residuos para las series del modelo de un estado no medido. Arriba: secuencia I; Abajo: secuencia III.

En las figuras anteriores se observa la validación de los modelos mediante los test de comportamiento de ruido blanco de los residuos, ambas series de datos están muy próximos al rango de confianza establecido en el 95 %.

Como se ha dicho anteriormente los valores estimados de los parámetros están en el rango de los valores teóricos que han sido calculados en las secciones anteriores, dadas las propiedades físicas del muro ensayado bajo condiciones reales, lo que es un indicador de su consistencia.

6.2.2 Modelo de dos estados no medidos

Este modelo con dos estados no medidos es una ampliación del modelo anterior (modelo 1) con el objetivo de conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos del muro y fiabilidad del modelo, para ello se utiliza la misma metodología para ajustar el modelo añadiéndole un nuevo estado no medido.

Este nuevo modelo 2 con dos estados no medidos incorpora una variable de estado adicional, temperatura interior del muro, y una ecuación de observación asociada con la temperatura exterior.

La Figura 5.13 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor, a través del muro, en este segundo caso en el que tenemos dos variables de estado no medidas.

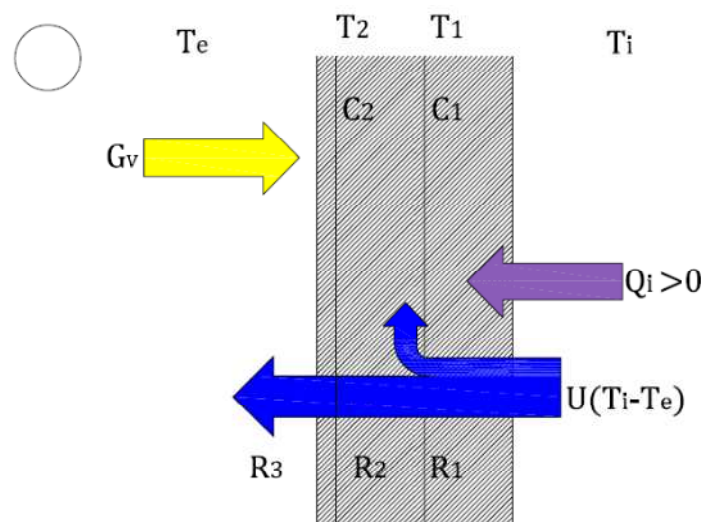


Fig. 5. 13. Modelo del flujo de calor del muro base de doble hoja considerando dos estados intermedios no medidos.

A partir del esquema de la Figura 5.13 se pueden desarrollar, las ecuaciones correspondientes para cada uno de los estados Eq. 90 y Eq. 91:

$$dT_1 = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_2 - T_1) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T_1) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 90}$$

$$dT_2 = \left[\frac{1}{C_2 \cdot R_3} (T_e - T_2) + \frac{1}{C_2 \cdot R_2} (T_1 - T_2) + \frac{\alpha}{C_2 \cdot h_{se} \cdot R_3} G_v \right] dt + \sigma_{22} d\omega_t \quad \text{Eq. 91}$$

donde T_1 y T_2 son los dos estados no medidos.

En este caso se dispondrá de dos ecuaciones de observación inicialmente Eq. 87 y Eq. 88:

$$Q_i = \frac{(T_i - T_1)}{R_1} + e_{11} \quad \text{Eq. 92}$$

$$T_{se} = a_1 T_e + a_2 T_2 + a_3 G_v + e_{22} \quad \text{Eq. 93}$$

6.2.2.1 Estimación de los parámetros de dos estados no medidos

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos del muro base con dos estados no medidos pueden verse en la Tabla 5.14. En ellas se muestran, para las dos secuencias de datos, los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), el coeficiente de convección (h_{se}) y la absorptividad solar efectiva (α).

Tabla 5. 14. Resultados del modelo de dos estado no medido del muro base para las diferentes secuencias a analizadas.

Modelo	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]	U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]	C [$\text{kJ}/^{\circ}\text{C m}^2$]	h_{se} [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$]	α
SEC I	0.75 ± 0.018	1.33	252 ± 43	6.68 ± 2.01	0.62 ± 0.37
SEC III	0.79 ± 0.015	1.26	291 ± 38	6.22 ± 2.35	0.70 ± 0.79
Average	0.77 ± 0.017	1.30	272 ± 41	6.45 ± 2.18	0.66 ± 0.58

La tabla 5.14 muestra los parámetros térmicos obtenidos para el modelo de dos estados no medidos. No se observan diferencias significativas en los resultados entre las dos secuencias estudiadas. Los valores estimados de los parámetros están dentro del rango de los valores teóricos que pueden ser calculados de forma aproximada para el muro, gracias al conocimiento que se tiene sobre las propiedades físicas de los materiales que lo conforman. La incertidumbre de las estimaciones está dentro de los límites aceptables, dada la naturaleza a escala real de los ensayos. Mediante este modelo se ha podido estudiar el comportamiento térmico de un muro de hoja doble.

6.2.2.2 Análisis de residuos de dos estados no medidos

La validación experimental del modelo se ha realizado a través de la comparación de los datos obtenidos de la simulación con los datos tomados a partir de los residuos. En este proceso se han utilizado la autocorrelación y el periódograma acumulado para comprobar si cumplen con las propiedades de ruido blanco y poder valorar así la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo de dos estados no medidos, para las dos series de datos, se muestra en la Fig. 5.14.

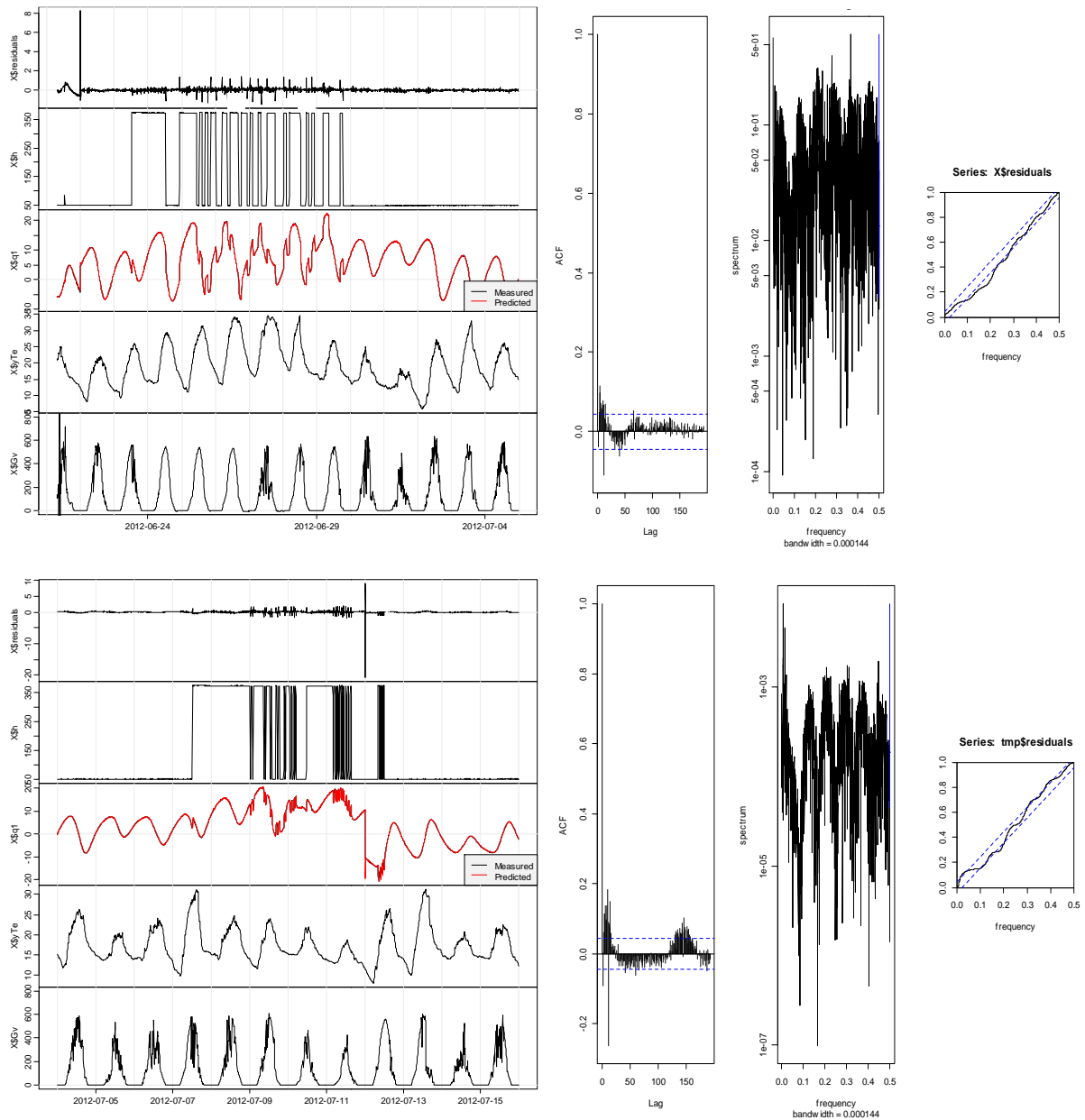


Fig. 5. 14. Autocorrelación y períodograma de los residuos para las series del modelo 2. Arriba: secuencia I; Abajo: secuencia III.

En las figuras anteriores se observa la validación de los modelos mediante los test de comportamiento de ruido blanco de los residuos, ambas series de datos están en el rango de confianza establecido en el 95 %.

Este segundo modelo de mayor complejidad, está formado por un conjunto de variables que incluye a todas las del modelo menor, por lo que estadísticamente supone una mejora en la estimación de los parámetros y de los residuos.

6.2.3 Test de máxima verosimilitud

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos 1 y 2, y una vez que se han realizado los test de análisis de residuos donde se ha comprobado su aproximación con el ruido blanco. Se realiza un test de máxima verosimilitud para comprobar estadísticamente si la utilización de modelos más complejos es adecuada cuantitativamente [137]. Los resultados se presentan en la Tabla 5.15:

Tabla 5.15. Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p.

Modelo	m1-m2
SEC I	0.00
SEC III	0.02

Donde se muestra el valor-p, de modo que cuando está por debajo del 5% (<0.05) para una serie de datos, el modelo de mayor complejidad, que está formado por un conjunto de variables que incluye a todas las del modelo menor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora en la estimación de los parámetros.

Los resultados mostrados en la Tabla 5.15 manifiestan como emplear dos estados no medidos mejora la estimación de los parámetros respecto a emplear un solo estado, por lo que utilizar el segundo modelo garantiza mejores resultados, por lo que será el modelo utilizado en las posteriores comparativas.

6.2.4 Análisis de los resultados

El análisis de residuos es una herramienta estadística que facilita la elección de modelos, pero no es en ningún caso una prueba positiva por si sola de que los parámetros obtenidos tengan un significado físico correcto, es decir, la consistencia física de los parámetros teniendo en cuenta sus propiedades materiales debe ser también considerada, y ante valores de los parámetros fuera de un rango aceptable, éstos no deben ser aceptados.

A lo largo de esta sección se han propuesto dos modelos para estimar, la resistencia térmica (R) y la capacidad efectiva (C) de un muro base de hoja doble. En concreto se han utilizado modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, de un estado, y de dos estados no medidos.

Las estimaciones se han llevado a cabo en dos series de 10 días de datos cada uno de ellos. Estos modelos se han empleado para modelar la temperatura superficial del muro y la absorptividad efectiva del mismo. El resultado de las estimaciones de los distintos parámetros ha mostrado que las estimaciones con un solo estado pueden ser consideradas suficientes. Sin embargo, la utilización de dos estados permite la modelización de la temperatura superficial del muro, lo que conlleva que se pueda realizar una caracterización más detallada y precisa del mismo.

Los valores de las resistencias estimadas concuerdan con los valores de los parámetros obtenidos mediante el método de la media, basado en promedios y con los obtenidos mediante el programa LORD. Lo cual supone un avance a la hora de caracterizar un muro doble ya que se reduce el tiempo de experimentación y además se obtiene otros parámetros como la capacidad efectiva del muro y el coeficiente de convección combinado.

6.3 Modelos SDE para una Fachada Ventilada

A continuación se presentan dos modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas para la obtención de los parámetros térmicos necesarios para caracterizar la fachada ventilada montada sobre el muro base de doble hoja.

Se han estudiado dos modelos:

- 5.3.1. Modelo 1: con un estado no medido
- 5.3.2. Modelo 2: con dos estados no medidos

A continuación se muestran las distintas variables y parámetros que forman parte de los modelos:

Variables medidas:

- T_{sic} , T_{se} , T_c , T_i , T_e : son la temperatura superficial en la parte interior de la plaqueta cerámica, la temperatura superficial exterior del muro recubierto por lana de roca, la temperatura media de aire en la cámara de aire, la temperatura de aire en el interior de la célula de ensayo y la temperatura exterior.
- Q_i , G_v : son la densidad de flujo de calor en la parte interior del muro y la irradiancia solar vertical global.

Variables de estado

- T, T_1, T_2 : son temperaturas en el interior del muro que no han sido medidas directamente.

Parámetros estimados:

- R_1, R_2, R_3, h_{se} : son coeficientes de resistencia térmica del muro y el coeficiente de convección superficial del muro.
- C_L, C_Z : son las capacidades térmicas efectivas del muro.
- α : es la absorptividad efectiva del muro.

6.3.1 Modelo de un estado no medido

La Figura 5.15 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través del muro.

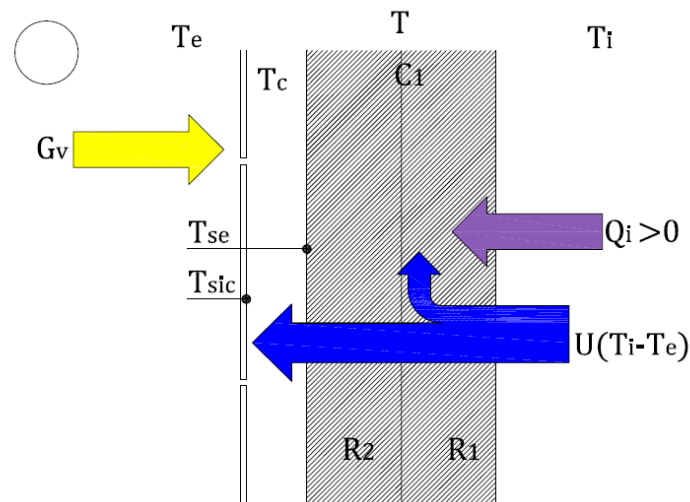


Fig. 5.15. Modelo del balance energético en la fachada ventilada sobre un muro de hoja doble considerando un estado interior no medido.

La ecuación de estado que describe el balance de energía será la Eq. 94.

$$dT = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_c - T) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T) + \frac{\alpha}{C_1 \cdot h_{se} \cdot R_2} G_v \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 94}$$

donde T es la variable no medida.

La ecuación de observación viene dada por la Eq. 95:

$$Q_i = \frac{(T_i - T)}{R_1} + e_1 \quad \text{Eq. 95}$$

6.3.1.1 Identificación de los parámetros físicos

A partir del modelo mostrado en la sección anterior pueden obtenerse algunos de los parámetros físicos necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico de la fachada ventilada

La capacidad efectiva, es obtenida mediante la expresión que puede verse en la Eq. 95:

$$C = \sum_i C_i A \quad \text{Eq. 96}$$

donde C_i son las capacidades efectivas de la fachada ventilada correspondientes a cada estado estimado, y A es el área.

El valor de la resistencia térmica (R) se obtiene a partir de la identificación de los parámetros obtenido en el modelo, como se muestra en la Eq. 97:

$$R = \sum_i R_i \quad \text{Eq. 97}$$

donde R_i son las resistencias térmicas parciales estimadas a partir de cada modelo, para cada caso.

El valor de la transmitancia térmica (U) es la inversa de la resistencia térmica.

6.3.1.2 Estimación de los parámetros de un estado no medido

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos de la fachada ventilada pueden verse en la Tabla 5.16. En ellas se muestran, para las dos secuencias de datos, los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), el coeficiente de convección combinado (h_{se}) y la absorptividad efectiva (α).

Tabla 5. 16. Resultados del modelo de un estado no medido de la fachada ventilada para las diferentes secuencias analizadas.

Modelo	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]	U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]	C [$\text{kJ}/^{\circ}\text{C m}^2$]	hse [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$]	α
SEC II	2.77 ± 0.28	0.36	265 ± 48	18.35 ± 1.16	0.22 ± 0.015
SEC IV	2.63 ± 0.17	0.38	289 ± 15	19.68 ± 1.25	0.26 ± 0.017
Average	2.70 ± 0.23	0.37	277 ± 32	19.02 ± 1.21	0.24 ± 0.016

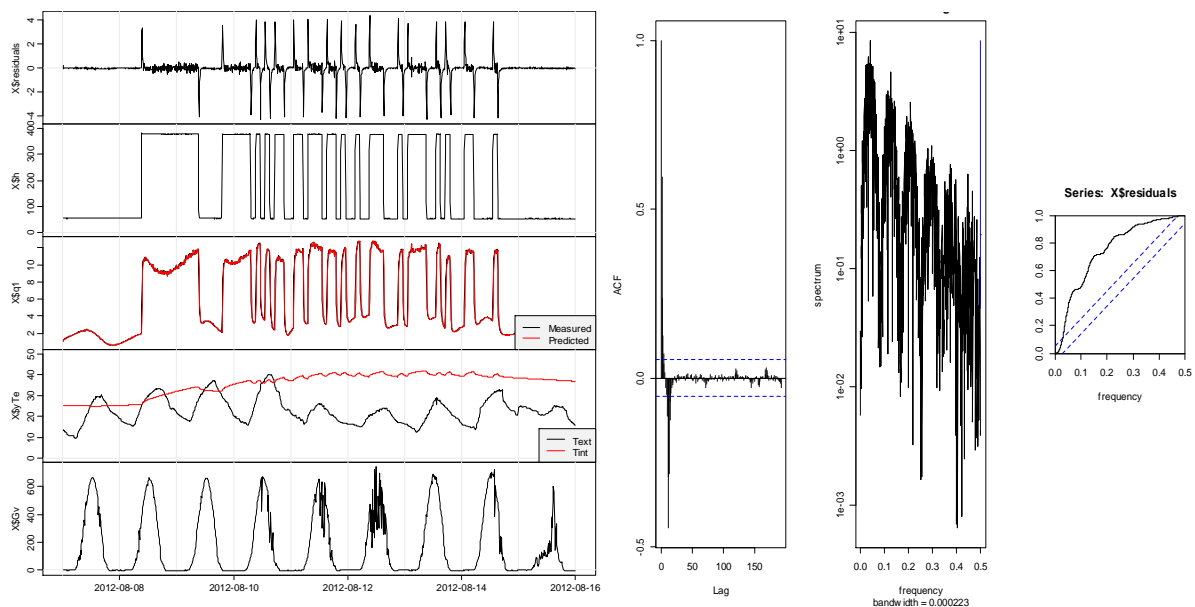
En la tabla anterior se muestran los valores de los parámetros físicos que caracterizan la fachada ventilada así como los valores medios de cada uno de ellos, para las dos series de datos analizadas. No se observan diferencia significativa entre los resultados obtenidos con las dos series de datos realizados. Los valores de los parámetros estimados están dentro del rango de los valores que han sido calculados en el apartado anterior.

6.3.1.3 Análisis de residuos de un estado no medido

Uno de los criterios para estudiar la validez del modelo es el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor, Q_i y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionados por el modelo matemático.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, de esta forma se valora la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo 1, para todas las series de datos, se muestra en la siguiente Fig. 5.16.



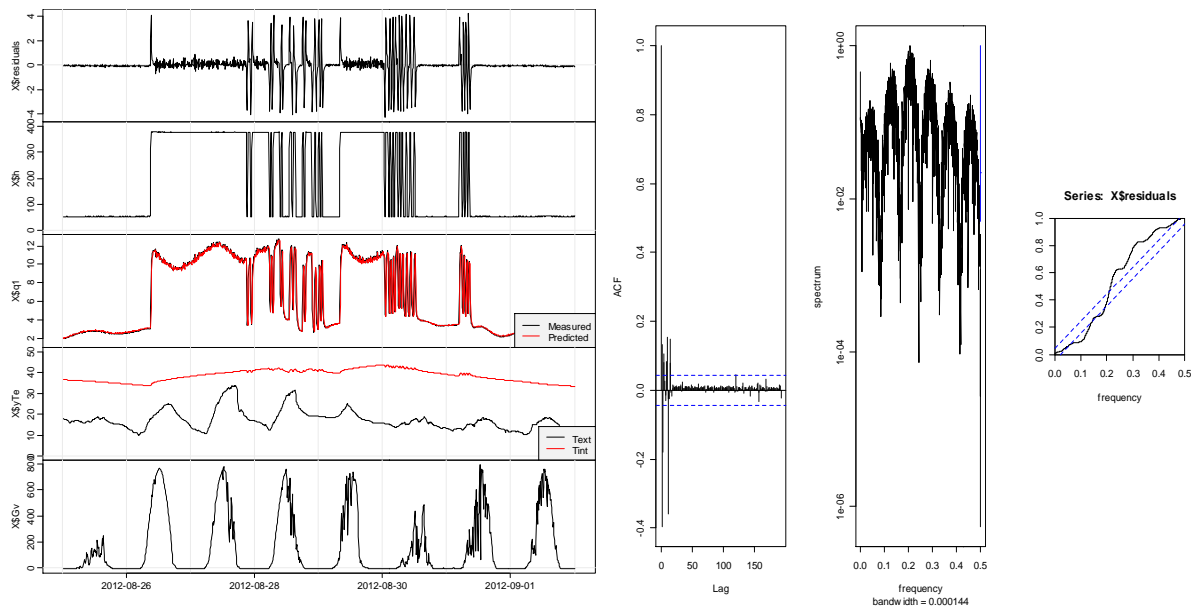


Fig. 5. 16. Autocorrelación y períodograma de los residuos para las series del modelo 1. Arriba: secuencia IV; Abajo: secuencia II.

Las dos series de estimaciones se han llevado a cabo para un período de tiempo de diez días, para facilitar su análisis y disponer de suficientes datos para poder evaluar la fachada ventilada sobre muro de doble hoja. Para poder validar y comprobar la robustez de los resultados se han analizado dos series diferentes de datos, lo que permite poder contrastar la diferencia entre estimaciones realizadas en condiciones de ensayo reales diferentes entre sí.

La validación del modelo mediante el test de los residuales muestra que los residuos tienen un comportamiento similar a ruido blanco para ambas series de datos o al menos una gran parte de los resultados estaban dentro o muy próximos al rango establecido por los límites de confianza establecidos en el 95%.

6.3.2 Modelo de dos estados no medidos

El modelo 2 es una ampliación a dos estados del modelo 1, este modelo permite modelar la temperatura superficial exterior. Introducir un segundo estado no medido, tiene como objeto conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos de la fachada ventilada.

La Figura 5.17 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través de la fachada en el caso de suponer que tenemos dos variables de estado no medidas.

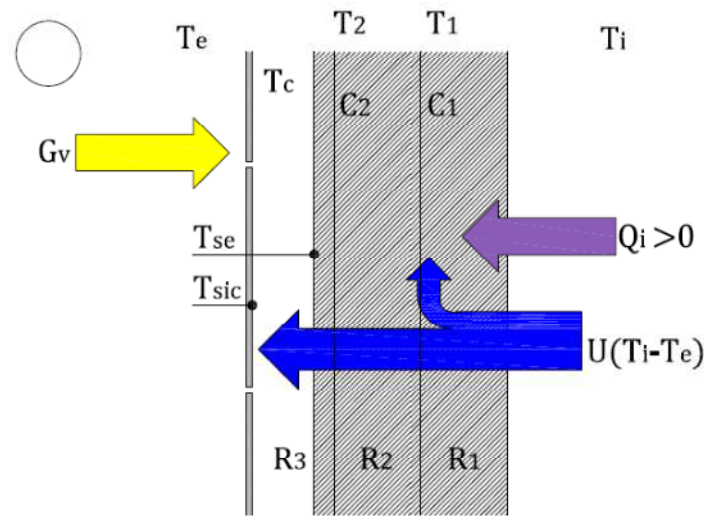


Fig. 5. 17. Modelo del balance energético en la fachada ventilada sobre un muro de hoja doble con dos estados no medidos

A partir del esquema de la Figura 5.17 se pueden desarrollar, las ecuaciones correspondientes para cada uno de los estados Eq. 98 y Eq. 99:

$$dT_1 = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_2 - T_1) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T_1) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 98}$$

$$dT_2 = \left[\frac{1}{C_2 \cdot R_3} (T_c - T_2) + \frac{1}{C_2 \cdot R_2} (T_1 - T_2) + \frac{\alpha}{C_2 \cdot h_{se} \cdot R_3} G_v \right] dt + \sigma_{22} d\omega_t \quad \text{Eq. 99}$$

donde \$T_1\$ y \$T_2\$ son los dos estados no medidos. La nueva variable de estado es una temperatura interior del muro base.

De esta manera, la variable de estado adicional (\$T_2\$) queda asociada a una temperatura cercana a la superficie del muro, pero situada en el interior del mismo.

En este caso se dispondrá de dos ecuaciones de observación inicialmente Eq. 100 y Eq. 101:

$$Q_i = \frac{(T_i - T)}{R_1} + e_{11} \quad \text{Eq. 100}$$

$$T_{se} = a_1 T_c + a_2 T_2 + a_3 (\sigma T_{sic}^4 - \sigma T_{se}^4) + e_{22} \quad \text{Eq. 101}$$

6.3.2.1 Estimación de los parámetros de dos estados no medidos

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos de la fachada ventilada con dos estados no medidos pueden verse en la Tabla 5.17. En ellas se muestran, para todas las secuencias de datos, los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), coeficiente de convección combinado (h_{se}) y absorptividad efectiva (α) de la fachada ventilada sobre el muro de hoja doble.

Tabla 5. 17. Resultados del modelo de Dos estado no medido de fachada ventilada para las diferentes secuencias a analizadas.

Modelo	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]	U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]	C [$\text{kJ}/^{\circ}\text{C m}^2$]	h_{se} [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$]	α
SEC II	2.41 ± 0.31	0.42	273 ± 58	16.75 ± 2.32	0.40 ± 0.087
SEC IV	2.44 ± 0.42	0.41	242 ± 67	16.32 ± 2.44	0.36 ± 0.039
Average	2.43 ± 0.37	0.41	256 ± 63	16.54 ± 2.38	0.38 ± 0.063

Los valores de la resistencia térmica (R), transmitancia térmica (U), y capacidad térmica (C) pueden observarse en la tabla anterior. En ella se han añadido los valores medios, para las dos series de datos. No se observan diferencia significativa entre los resultados obtenidos con las dos series de datos realizados. Los valores de los parámetros estimados están dentro del rango de los valores que han sido calculados en el apartado anterior.

6.3.2.2 Análisis de residuos de dos estados no medidos

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el periódograma acumulado se comprueba la validez del modelo comprobando para ello si cumplen con las propiedades de ruido blanco.

El resultado del análisis para el modelo de dos estados no medidos, para todas las series de datos, se muestra en las Fig. 5.18.

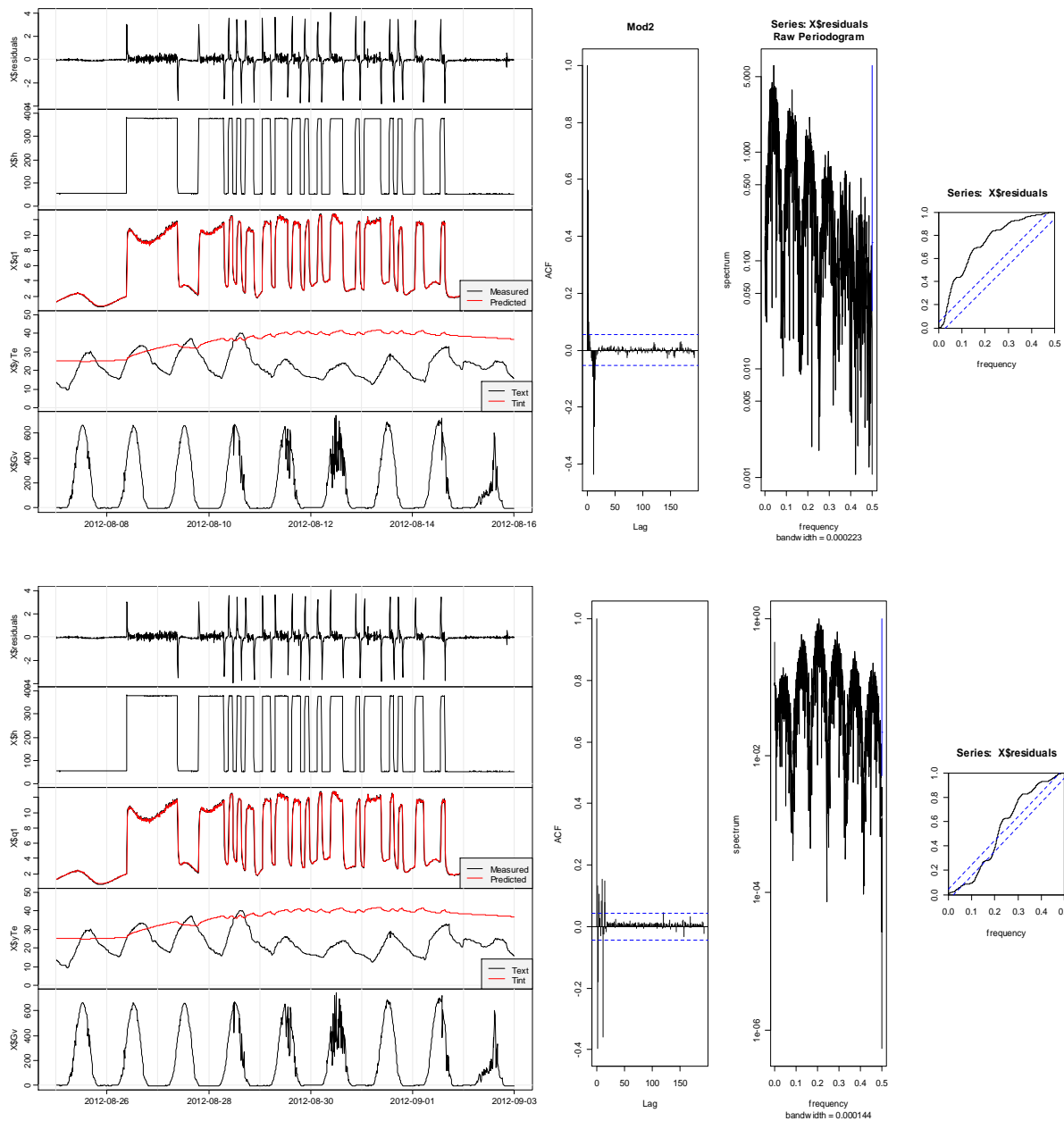


Fig. 5. 18. Autocorrelación y períodograma de los residuos para las series del modelo 2 Arriba: secuencia IV; Abajo: secuencia II.

Puede apreciarse que el modelado de la temperatura superficial presenta problemas para bajas frecuencias. Estos problemas pueden ser debidos al balance de energía solar, ya que sus variaciones diarias día-noche son las que provocan la acumulación de errores en el modelo en eso intervalos de tiempo. Este efecto podría corregirse si se realizarán series de datos de un período de tiempo de menos de diez días. Debido a que el principal problema ocurre con la variación de la radiación solar que afecta al sistema. Esta variable meteorológica, presenta una alta variabilidad y es de difícil predicción. No obstante, la

estimación de los parámetros emite valores que están dentro de los rangos esperados y son coherentes con los obtenidos previamente.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el análisis de residuos es una herramienta estadística que facilita la elección de modelos, pero que no es ningún caso una prueba positiva por si sola de que los parámetros obtenidos tengan un significado físico correcto. La consistencia física de los parámetros teniendo en cuenta sus propiedades materiales tiene que ser considerada, y ante valores de los parámetros fuera de un rango aceptable, éstos deben ser rechazados.

6.3.3 Test de máxima verosimilitud

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos de uno y dos estados no medidos, y una vez que se han realizado los test de análisis de residuos para comprobar su semejanza con un ruido blanco. Se procedió a realizar un test de máxima verosimilitud para evaluar la significancia estadística de los resultados y para comprobar si la utilización de modelos más complejos (dos estados no medidos) implicaba mejora en la obtención de los parámetros o se incurría, entre otros, en un problema de sobreparametrización. Los resultados se presentan en la Tabla 5.18:

Tabla 5.18. Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p.

Modelo	m1-m2
SEC II	0.00
SEC IV	0.04

En la tabla anterior se muestra el valor-p, cuando este es menor a 0.05 (5%), el modelo de mayor complejidad que está formado por un conjunto de variables mayor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora sobre el modelo menor, que tiene un número de variables inferior. Los resultados de la Tabla 5.18 muestran como el modelo con dos estados mejoran el de un solo estado por lo que será el modelo utilizado en las posteriores comparativas.

6.3.4 Análisis de los resultados

En esta sección se ha llevado a cabo, el estudio del comportamiento térmico dinámico de un muro doble convertido en fachada ventilada tras realizar un acoplamiento de aislamiento (lana de roca) y hoja cerámica exterior. Con el objetivo de realizar estimaciones sobre los parámetros físicos que lo caracterizan y poder evaluar las variaciones respecto a su estado inicial, cuando se trataba de un muro doble, previo a la colocación del aislante y la hoja cerámica.

Como ya es sabido, la resistencia térmica total es el sumatorio de las resistencias térmicas de las capas de muro base y las resistencias superficiales de la fachada ventilada, a las cuales se le suma la resistencia térmica de la capa aislante colocada entre ambas. Por lo que como cabía esperar la resistencia térmica ha aumentado de $0.77 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$ del muro base a $2.43 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$ de la fachada ventilada, en gran medida gracias a la capa aislante constituida por lana de roca.

En lo que respecta a los valores obtenidos de absorptividad solar efectiva, se observa que la utilización de fachada ventilada mejora en un 40 % la capacidad refrigerante de la fachada con un aumento significativo en el coeficiente de convección.

Una vez llevados a cabo los diferentes modelos de estudio dinámico en una fachada ventilada y teniendo en cuenta los resultados obtenidos, puede concluirse que la utilización de un modelo de dos estados no medidos mejora de forma significativa las estimaciones obtenidas por el modelo de un solo estado no medido. La incertidumbre de las estimaciones está dentro de unos límites aceptables dada la naturaleza a escala real de los ensayos.

A continuación tabla 5.19 se presentan los datos registrados de la temperatura exterior media y la temperatura media de la cámara de aire a lo largo de las secuencias ensayadas.

Tabla 5.19. Temperatura media exterior y temperatura media en la cámara de aire durante las secuencias ensayadas

Modelo	Te media [$^{\circ}\text{C}$]	Tc media [$^{\circ}\text{C}$]
SEC II	18.4 ± 5.2	22.4 ± 6.4
SEC IV	23.8 ± 6.7	26.6 ± 7.5

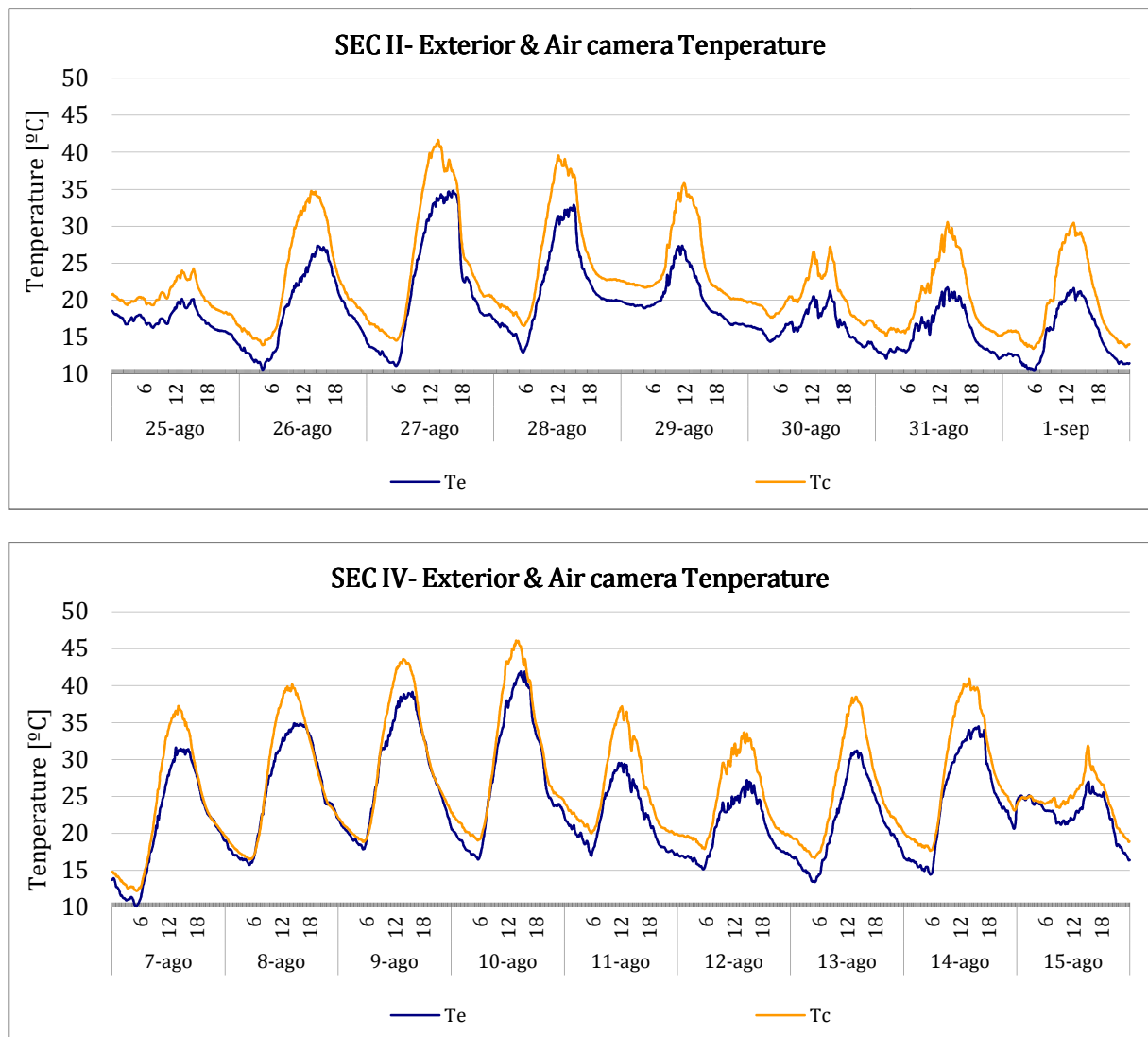


Fig. 5. 19. Evolución de la temperatura exterior y temperatura de la cámara de aire. Arriba Secuencia II . Abajo Secuencia IV

Teniendo en cuenta los datos de temperatura media exterior y de temperatura media de la cámara de aire obtenida, se observa que la diferencia entre ambas temperaturas es del orden del 10 %. Por lo que sería viable la utilización de la temperatura exterior en lugar de la temperatura media del aire de la cámara de aire para la realización de la simulación de la fachada. La utilización de la temperatura exterior, teniendo en cuenta el error cometido, podría facilitar la comparativa con otro tipo de modelos y su simulación con datos históricos meteorológicos de otras regiones y poder extrapolar así, estos resultados a otros casos con condiciones meteorológicas diferentes.

6.4 Modelos SDE para una Fachada Vegetal

A continuación vuelven a presentarse los modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas utilizadas para la obtención de los parámetros térmicos necesarios para caracterizar fachada vegetal instalada sobre el muro base de hoja doble.

Se han estudiado dos modelos:

- 5.4.1. El modelo 1 con un estado no medido
- 5.4.2. El modelo 2 con dos estados no medidos

A continuación se muestran las distintas variables y parámetros que forman parte de los modelos:

Variables medidas:

- T_{vg} , T_{se} , T_G , T_i , T_e : son la temperatura superficial en la parte interior del módulo vegetal, la temperatura superficial exterior del ladrillo caravista en el muro base, la temperatura de aire en la cámara de aire, la temperatura de aire en el interior de la célula de ensayo y la temperatura exterior, respectivamente.
- Q_i , G_v : son la densidad de flujo de calor en la parte interior del muro y la irradiancia solar vertical global, respectivamente.

Variables de estado

- T , T_1 , T_2 : son temperaturas en el interior del muro que no han sido medidas directamente.

Parámetros estimados:

- R_1 , R_2 , R_3 , h_{se} : son coeficientes de transmitancia térmica del muro y el coeficiente convección combinado (convección más evapotranspiración) del muro, respectivamente.
- C_1 , C_2 : son las capacidades térmicas efectivas del muro.
- α : es la absorptividad solar efectiva del muro.

6.4.1 Modelo de un estado no medido

La Figura 5.20 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través de la fachada vegetal.

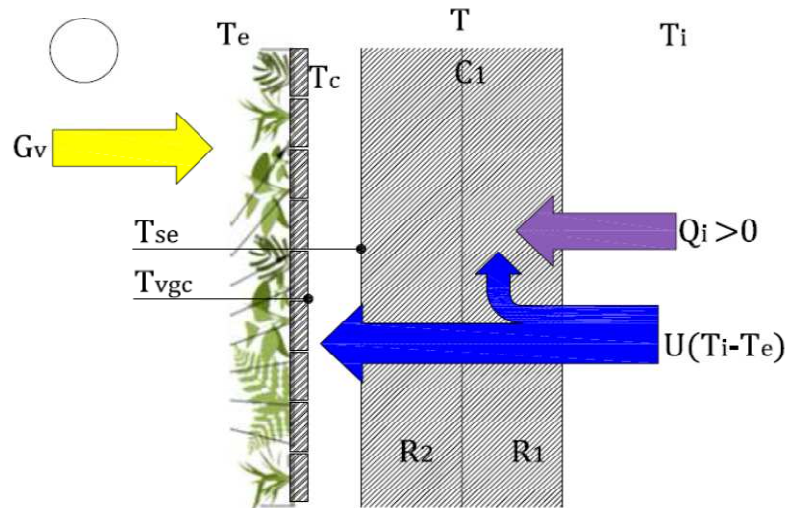


Fig. 5. 20. Modelo del balance energético en la fachada vegetal sobre un muro de hoja doble considerando un estado interior no medido.

La ecuación de estado que describe el balance de energía será la Eq. 102.

$$dT = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_c - T) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T) + \frac{\alpha}{C_1 \cdot h_{se} \cdot R_2} G_v \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 102}$$

donde T es la variable no medida.

La ecuación de observación viene dada por la Eq. 103:

$$Q_i = \frac{(T_i - T)}{R_1} + e_1 \quad \text{Eq. 103}$$

6.4.1.1 Identificación de los parámetros físicos

A partir del modelo mostrado en la sección anterior pueden obtenerse algunos de los parámetros físicos necesarios para describir y caracterizar el comportamiento térmico de la fachada vegetal.

La capacidad efectiva es obtenida mediante la expresión que puede verse en la Eq. 99:

$$C = \sum_i C_i A \quad \text{Eq. 104}$$

donde C_i son las capacidades efectivas de la fachada ventilada correspondientes a cada estado estimado, y A es el área.

El valor de la resistencia térmica R se obtiene a partir de la identificación de los parámetros obtenido en el modelo, como se muestra en la Eq. 105:

$$R = \sum_i R_i \quad \text{Eq. 105}$$

donde R_i son las resistencias térmicas parciales estimadas a partir de cada modelo, para cada caso.

El valor de la transmitancia térmica U se obtiene mediante la inversa de la resistencia térmica.

6.4.1.2 Estimación de los parámetros de un estado no medido

A lo largo de este apartado se ha llevado a cabo, el estudio dinámico del comportamiento térmico de un muro doble convertido en una fachada vegetal mediante el acoplamiento de módulos vegetales prevegetados, y así poder obtener las estimaciones sobre los parámetros físicos que lo caracterizan y poder ver las variaciones respecto a su estado inicial.

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos de la fachada vegetal pueden verse en la Tabla 5.20. En ellas se muestran, para todas las secuencias de datos, los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), coeficiente de convección combinado (h_{se}) y absorptividad efectiva del muro (α).

Tabla 5. 20. Resultados del modelo de un estado no medido de la fachada vegetal para las diferentes secuencias a analizadas.

Modelo	R [°C m ² /W]	U [W/°C m ²]	C [kJ/°C m ²]	h _{se} [W/m ² °C]	α
SEC V	1.42±0.11	0.70	294±35	343±1.8	0.015±0.02
SEC IX	1.45±0.06	0.69	254±43	295±0.2	0.019±0.03
SEC XI	1.39±0.04	0.72	299±22	98±4.1	0.045±0.02
SEC XII	1.45±0.03	0.69	312±78	287±0.6	0.017±0.06
Average*	1.44±0.06	0.70	287±52	308±0.86	0.017±0.02

Los datos Average* no tienen en cuenta la secuencia tomada durante la época de verano (SEC XI).

Se han utilizado los mismos modelos que se utilizaron en el apartado anterior (5.3.1. fachada ventilada), variando en estos solo las variables que diferían por el cambio de configuración del sistema experimental. Los datos obtenidos muestran consistencia entre las diferentes series analizadas así como concordancia con los valores obtenidos en la sección anterior.

La transferencia de calor en la fachada vegetal se determina al sumar las contribuciones de dos mecanismos de transferencia de calor que tiene lugar, la convección y la evapotranspiración. Los dos mecanismos son diferentes y se realizan independientemente pero no resulta fácil separarlos, debido a que ocurren de manera simultánea. Con el objeto de hacer los cálculos más sencillos se ha calculado el coeficiente de convección combinado donde se incluyen los efectos simultáneos de la convección y la evapotranspiración.

En los datos se puede observar que el valor del coeficiente de convección combinado (convección más evapotranspiración) presenta valores de $300 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ en las secuencias tomadas en periodos de invierno sin embargo este valor se reduce hasta $98 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ en el periodo de verano.

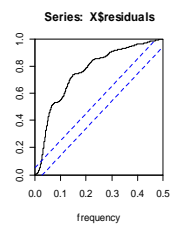
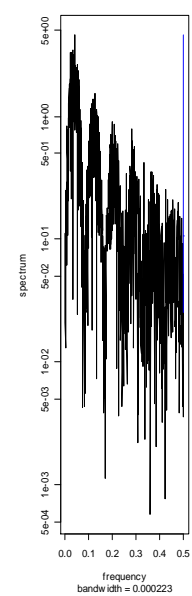
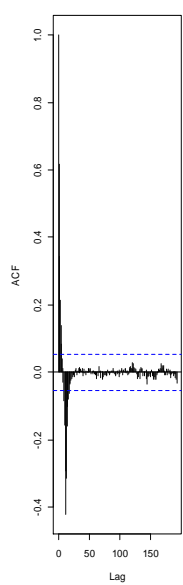
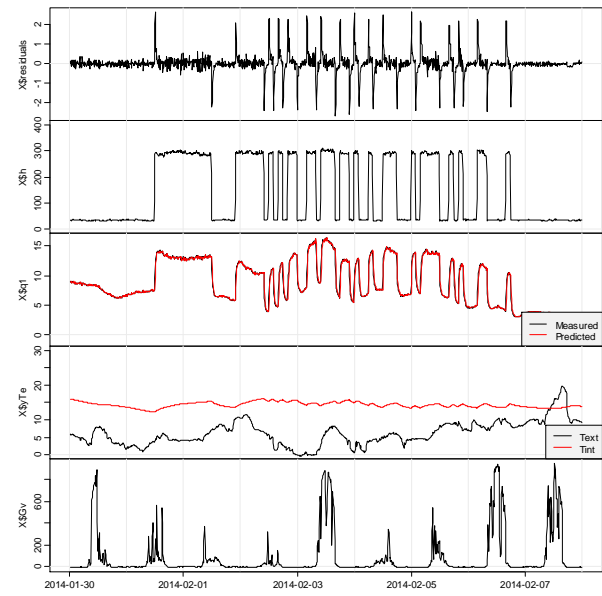
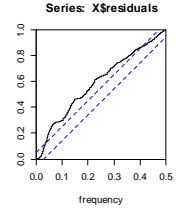
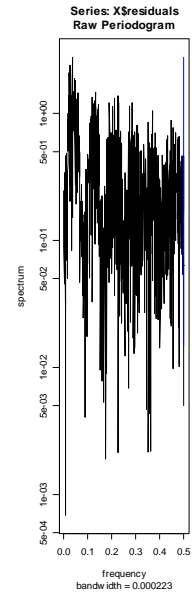
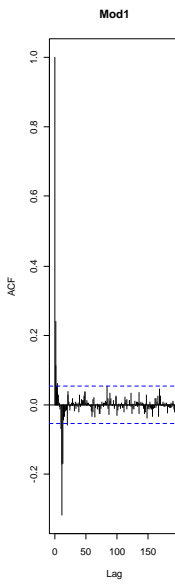
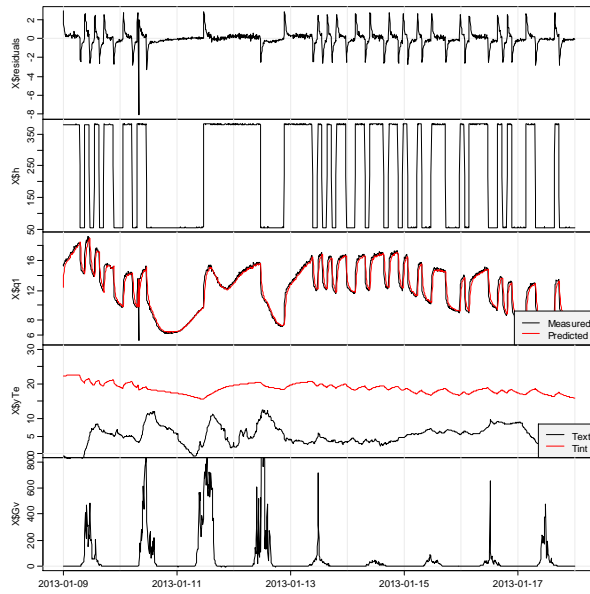
El valor de absorptividad solar efectiva en el caso de la fachada vegetal es muy bajo (0.017) lo que confirma la gran capacidad de refrigeración de la fachada vegetal.

6.4.1.3 Análisis de residuos de un estado no medido

Uno de los criterios para estudiar la validez del modelo es el análisis de los residuos resultantes entre los valores medidos para la densidad de flujo de calor, Q_i , y los valores de la predicción un paso en adelante proporcionados por el modelo matemático.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el periódograma acumulado se comprueba si cumplen con las propiedades de un ruido blanco, de esta forma se valora la bondad del modelo.

El resultado del análisis para el modelo 1, para todas las series de datos, se muestra en la siguiente Fig. 5.21.



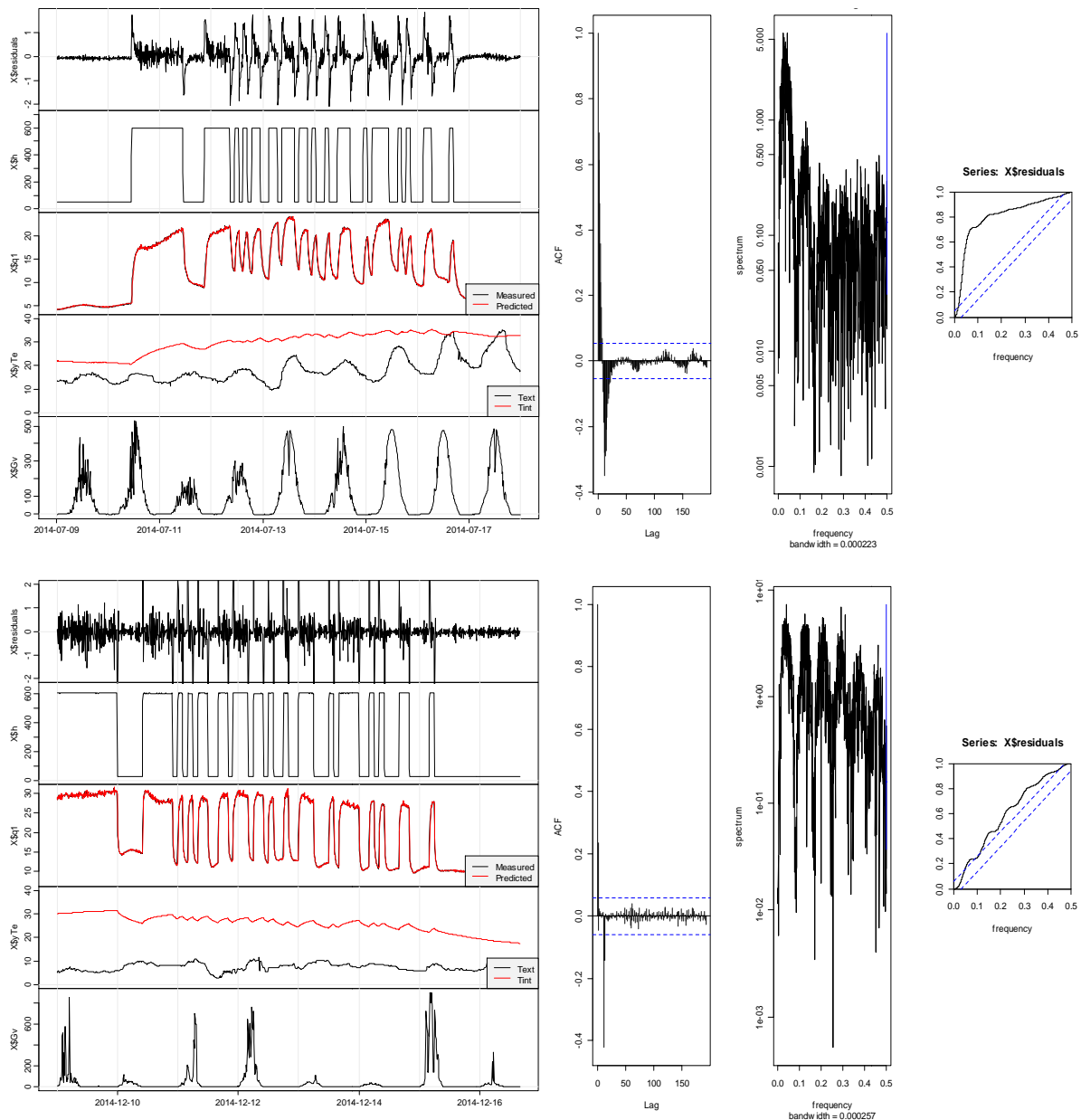


Fig. 5. 21. Autocorrelación y períodograma de los residuos para las series del modelo 1. De Arriba abajo: secuencia V, IX, XI, XII

En las series puede apreciarse que la temperatura presenta problemas para bajas frecuencias. Estos problemas parecen estar debidos a la irradiancia solar, ya que son sus variaciones diarias las que provocan la acumulación de errores en el modelo, o podría ser debido a otra variable o efecto que no esté bien modelada y que también se muestre con una frecuencia diaria.

Para poder corregir este efecto se deberían estudiar series de datos con un menor intervalo de tiempo, es decir, con uno, dos o tres días. Sin embargo, la estimación de los

parámetros emite valores que están dentro de los rangos esperados y son coherentes con los obtenidos previamente.

6.4.2 Modelo de dos estado no medidos

El modelo 2 es una ampliación a dos estados del modelo 1, este modelo permite modelar la densidad de flujo de calor. Introducir un segundo estado no medido, tiene como objeto conseguir una mejor estimación de los parámetros térmicos de la fachada vegetal.

La Figura 5.22 muestra las variables que intervienen en el balance de energía en forma de calor a través de la fachada en el caso de suponer que tenemos dos variables de estado no medidas.

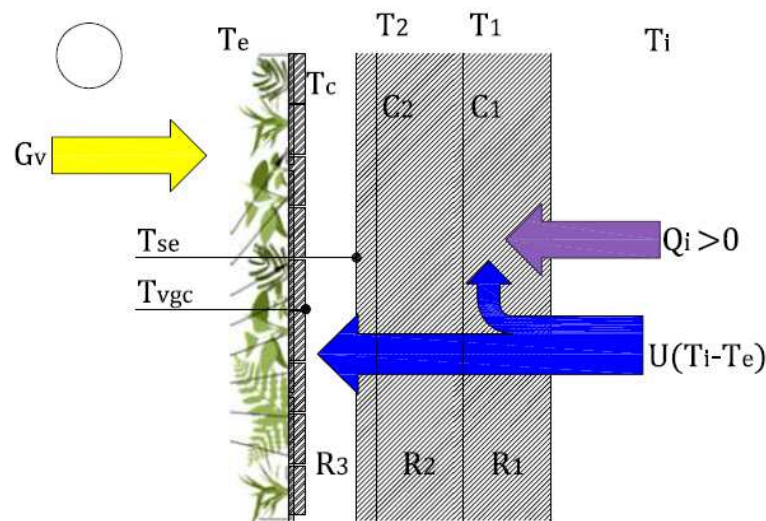


Fig. 5. 22. Modelo del balance energético en la fachada vegetal sobre un muro de hoja doble con dos estados no medidos

A partir del esquema de la Figura 5.21 se pueden desarrollar, las ecuaciones correspondientes para cada uno de los estados Eq. 106 y Eq. 107:

$$dT_1 = \left[\frac{1}{C_1 \cdot R_2} (T_2 - T_1) + \frac{1}{C_1 \cdot R_1} (T_i - T_1) \right] dt + \sigma_{11} d\omega_t \quad \text{Eq. 106}$$

$$dT_2 = \left[\frac{1}{C_2 \cdot R_3} (T_c - T_2) + \frac{1}{C_2 \cdot R_2} (T_1 - T_2) + \frac{\alpha}{C_2 \cdot h_{se} \cdot R_3} G_v \right] dt + \sigma_{22} d\omega_t \quad \text{Eq. 107}$$

donde T_1 y T_2 son los dos estados no medidos. La nueva variable de estado es una temperatura interior del muro base. De esta manera, la variable de estado adicional (T_2) queda asociada a una temperatura cercana a la superficie del muro, pero situada en el interior del mismo.

En este caso se dispondrá de dos ecuaciones de observación Eq. 108 y Eq. 109:

$$Q_i = \frac{(T_i - T)}{R_1} + e_{11} \quad \text{Eq. 108}$$

$$T_{se} = a_1 T_c + a_2 T_2 + e_{22} \quad \text{Eq. 109}$$

En este segundo modelo se emplea una segunda ecuación. Es en estas ecuaciones de observación donde se encuentra la principal diferencia entre ambos modelos.

6.4.2.1 Estimación de los parámetros de dos estados no medidos

Los resultados del modelo utilizado para calcular los parámetros característicos de la fachada vegetal con dos estados no medidos pueden verse en la Tabla 5.21. En ellas se muestran, para todas las secuencias de datos, los valores de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), coeficiente de convección combinado (h_{se}) y absorptividad efectiva del muro (α).

Tabla 5. 21. Resultados del modelo de Dos estado no medido de fachada vegetal para las diferentes secuencias a analizadas.

Modelo	R [°C m ² /W]	U [W/°C m ²]	C [kJ/°C m ²]	hse [W/m ² °C]	α
SEC V	1.47±0.045	0.68	366±36	486±31	0.10±0.060
SEC IX	1.54±0.032	0.65	305±20	546±23	0.10±0.019
SEC XI	1.48±0.013	0.67	309±24	135±20	0.11±0.017
SEC XII	1.57±0.017	0.64	306±18	458±46	0.10±0.016
Average*	1.52±0.031	0.66	326±25	497±33	0.10±0.031

Los datos Average* no tienen en cuenta la secuencia tomada durante la época de verano (SEC XI).

A lo largo de esta sección se han utilizado los mismos modelos que se utilizaron en el apartado anterior (5.3.2 fachada ventilada), variando en estos solo las variables que diferían por el cambio de configuración del sistema experimental. De esta forma se han obtenido la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva del muro (C).

Los resultados muestran consistencia entre las diferentes series analizadas así como concordancia con los valores obtenidos en la sección anterior. Cabe resaltar el valor del coeficiente de convección combinado que presenta valores de 500 W/m² °C para las secuencias tomadas en periodos de invierno sin embargo este valor se reduce hasta 135 W/m² °C en el periodo de verano. El valor de absorptividad solar efectiva en el caso de la fachada vegetal es muy bajo 0.10 lo que muestra su alta capacidad de refrigeración.

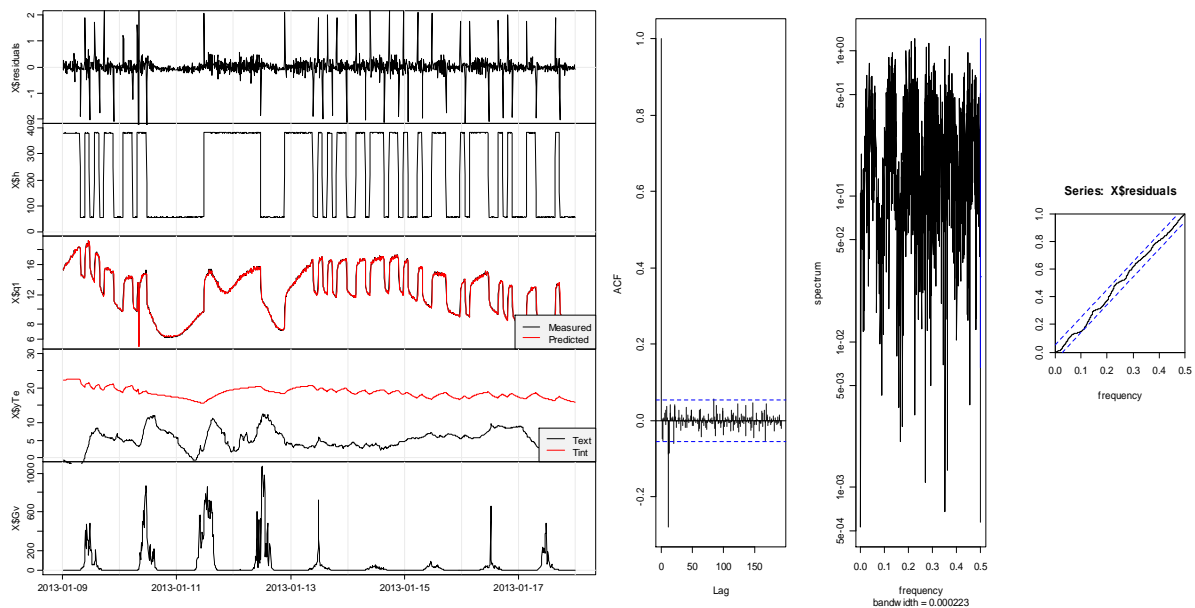
Los datos obtenidos presentan consistencia entre las diferentes series analizadas así como concordancia con los valores de los parámetros estimados concuerdan con los valores de los parámetros obtenidos mediante el método de la media, basado en promedios y con los obtenidos mediante el programa LORD.

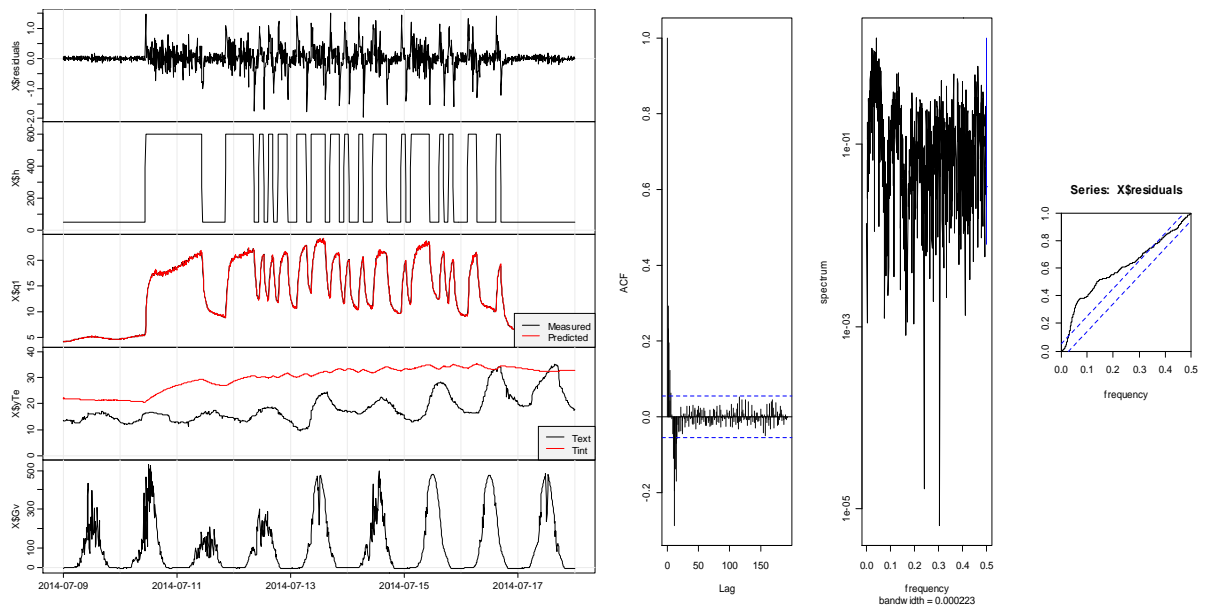
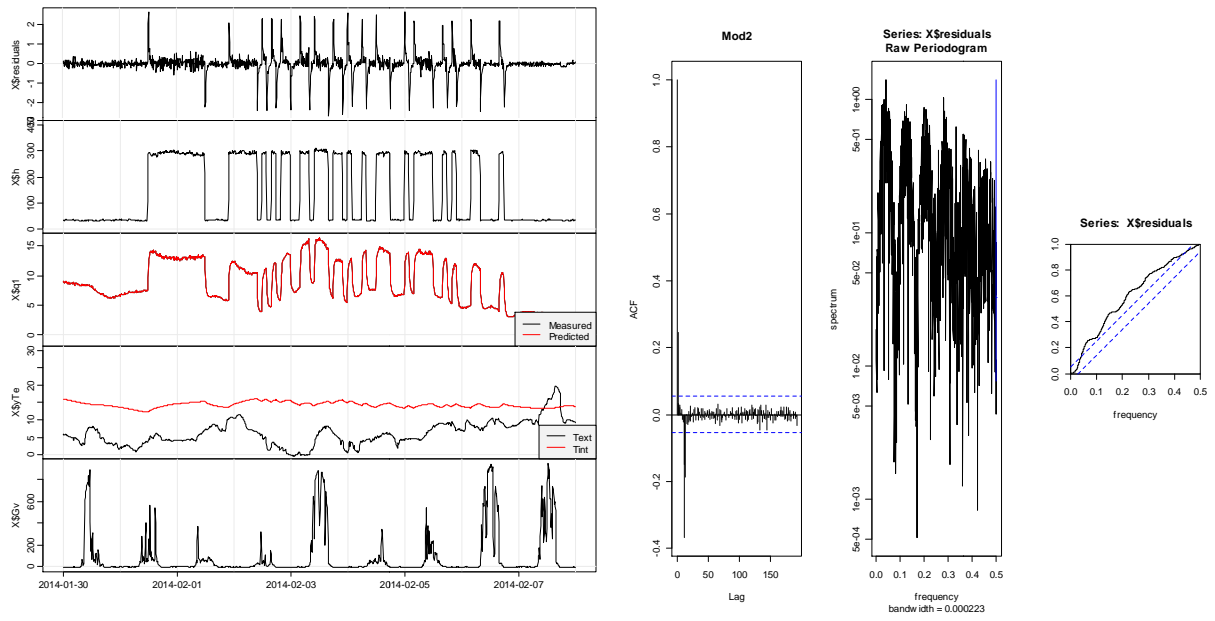
6.4.2.2 Análisis de residuos de dos estados no medidos

El análisis de los residuos se ha utilizado como criterio para estudiar la validez de los parámetros. Este análisis de los residuos resultantes es la relación entre los valores medidos, y los valores de la predicción un paso adelante proporcionado por el modelo matemático.

A partir de los residuos, utilizando la autocorrelación y el períodograma acumulado, se comprueba la validez del modelo. Para realizarlo se analiza si los parámetros cumplen con las propiedades de ruido blanco.

El resultado del análisis para el modelo de dos estados no medidos, para las series de datos, se muestra en la Fig. 5.23.





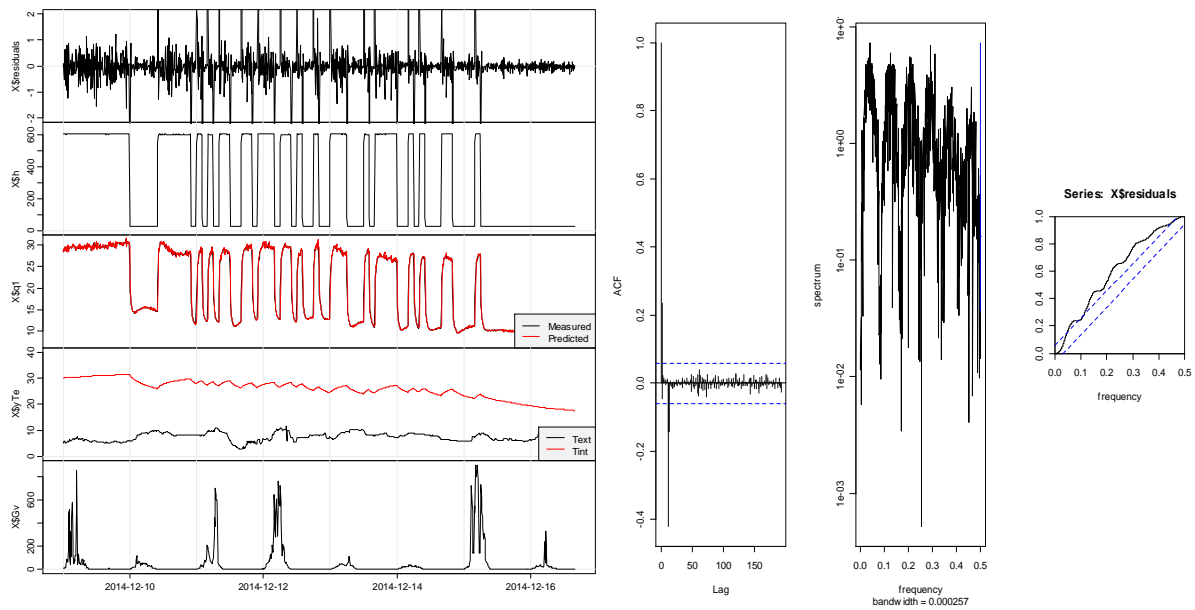


Fig. 5. 23. Autocorrelación y períodograma de los residuos para las series del modelo 2. De Arriba abajo: secuencia V, IX, XI, XII

La validación del modelo mediante el test de los residuales muestra que los residuos tiene un comportamiento similar a ruido blanco para todas las series de datos ya que una gran parte de los resultados se encuentra dentro del rango establecido por los límites de confianza establecidos en el 95%.

Por lo que la estimación de los valores de los parámetros obtiene resultados dentro de los rangos esperados y son coherentes con los obtenidos previamente.

6.4.3 Test de máxima verosimilitud

Una vez estimados los parámetros utilizando los modelos de uno y dos estados no medidos, y una vez que se han realizado los test de análisis de residuos para comprobar su semejanza con ruido blanco. Se realizó un test de máxima verosimilitud para evaluar la significancia estadística, y comprobar si la utilización de modelos más complejos (dos estados no medidos) implicaba mejora en la obtención de los parámetros. Los resultados se presentan en la Tabla 5.22:

Tabla 5.22. Resultados del test de máxima verosimilitud, valor-p.

Modelo	m1-m2
SEC V	0.04
SEC IX	0.02
SEC XI	0.01
SEC XII	0.02

En la tabla anterior se muestra el valor-p, cuando este es menor a 0.05 (5%), en una serie de datos, el modelo de mayor complejidad que está formado por un conjunto de variables mayor, puede decirse que estadísticamente supone una mejora sobre el modelo menor, que tiene un número de variables inferior.

Para las series calculadas, los resultados de la Tabla 5.22 muestran como los modelos con dos estados mejoran el de un solo estado, por lo que el modelo con el que conseguimos estimar de una forma más robusta los parámetros térmicos será esta. No obstante, el modelo puede ser implementado en futuros estudios con la temperatura exterior, tal y como se justificará más adelante.

6.4.4 Análisis de los resultados

En esta última sección se han utilizado los mismos modelos matemáticos que se utilizaron en las secciones anteriores, muro base y fachada ventilada, variando en estos solo las variables que se modificaban por el cambio de configuración del sistema experimental, de fachada vegetal a fachada ventilada. Mediante la utilización de estos modelos se han obtenido los valores de la resistencia térmica (R), capacidad efectiva del muro (C), coeficiente de convección combinado (h_{se}) y absorptividad efectiva (α). Para ello, se han utilizado dos modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, uno de un estado, y otro de dos estados no medidos.

Observando los resultados obtenidos con los diferentes modelos para el caso de la fachada vegetal, puede afirmarse que la utilización de un modelo de dos estados no medidos mejora de forma estadísticamente significativa las estimaciones obtenidas por el modelo de un solo estado no medido. No obstante, el análisis de los residuos revela la necesidad de investigar y buscar más en profundidad alternativas que expliquen mejor este cerramiento, o para conseguir modelos que mejoren los resultados obtenidos pudiéndolo implementar en futuros estudios con la temperatura exterior lo que facilitaría la simulación y posterior comparación con otros cerramientos.

El valor de la resistencia térmica (R) ha mejorado significativamente respecto a los valores iniciales del muro doble ($0.77 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$) inicial gracias al acoplamiento de la fachada vegetal ($1.52 \text{ }^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$) pero estos valores están muy alejados de los valores de resistencia térmica obtenidos mediante la rehabilitación mediante fachada ventilada

($2.43 \text{ }^\circ\text{C m}^2/\text{W}$). La incertidumbre de las estimaciones obtenidas están dentro de unos límites aceptables dada la naturaleza a escala real de los ensayos.

El valor del coeficiente de convección combinado (convección más evapotranspiración) presenta valores de $500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ en las secuencias tomadas en periodos de invierno sin embargo este valor se reduce hasta $135 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ en el periodo de verano.

El valor de absorptividad solar efectiva en el caso de la fachada vegetal es muy bajo (0.010) lo que confirma la gran capacidad de refrigeración de la fachada vegetal.

También se observa que hay variación en la estimación de los parámetros entre los modelos de uno y dos estados no medidos, de manera que debe ser analizado más profundamente e investigado más detalladamente en futuros estudios, a pesar de ello el modelo con el que conseguimos estimar los parámetros térmicos de una forma más robusta estadísticamente es el modelo de dos estados no medidos, por lo que será este modelo el utilizado en las posteriores comparativas.

A continuación tabla 5.23 se presentan los datos registrados de la temperatura exterior media y de la temperatura media de la cámara de aire a lo largo de las secuencias ensayadas.

Tabla 5.23. Temperatura media exterior y temperatura media en la cámara de aire durante las secuencias ensayadas

Modelo	Te media [$^\circ\text{C}$]	Tc media [$^\circ\text{C}$]
SEC V	4.87 ± 2.92	6.30 ± 2.49
SEC IX	6.21 ± 3.70	7.14 ± 2.85
SEC XI	19.57 ± 6.10	20.60 ± 4.53
SEC XII	7.34 ± 1.23	8.99 ± 0.81

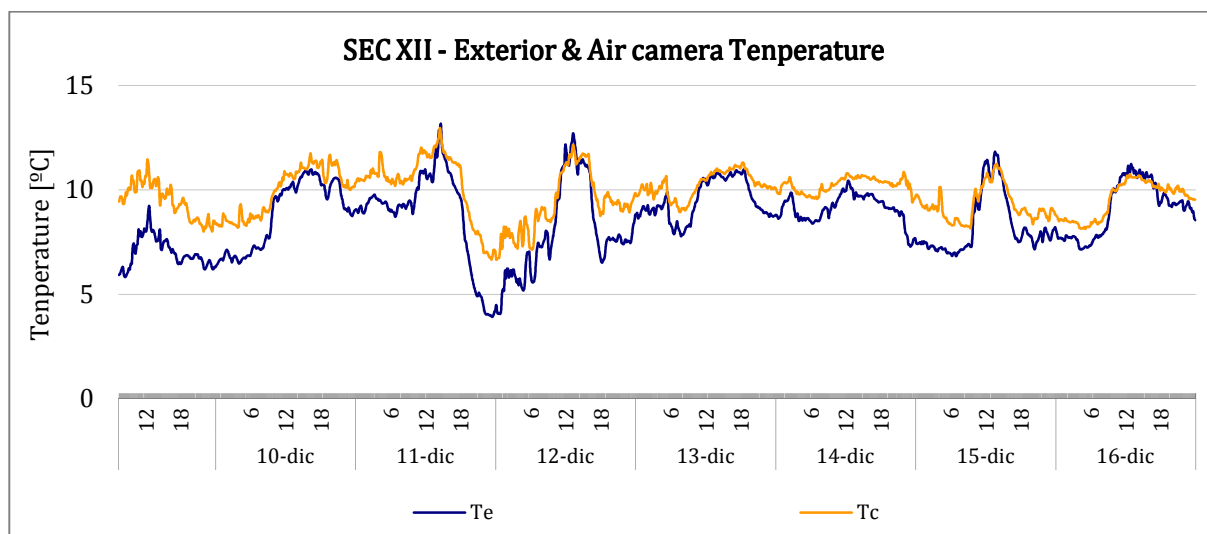


Fig. 5. 24. Evolución de la temperatura exterior y temperatura de la cámara de aire. Desde arriba Secuencia V-IX-XI y XII

Al realizar la comparativa entre la temperatura media exterior y la temperatura media de la cámara de aire a lo largo de las secuencias de ensayo realizadas, se comprueba que la diferencia entre ambas es de 1 °C. Teniendo en cuenta que la diferencia entre la temperatura interior de la celda de ensayo y la temperatura exterior tiene un gradiente medio de 15 °C, el error que cometeríamos al utilizar la temperatura exterior en lugar de la temperatura de la cámara de aire sería del orden del 6.7 %.

Las gráficas muestran cómo la temperatura exterior y la temperatura de la cámara de aire se mantienen prácticamente iguales durante el tiempo muestreado excepto la secuencia XI, la cual fue realizada durante el periodo estival (julio). En esta secuencia se puede observar que la temperatura exterior presenta más gradiente día/noche que la temperatura de la cámara debido a que radiación solar en esa época del año es máxima al igual que la temperaturas que alcanza el ambiente exterior.

Por todo lo anteriormente citado, la utilización de la temperatura exterior en lugar de la temperatura de la cámara aire, sería posible asumiendo el error cometido, lo cual facilitaría la simulación de la fachada vegetal y su posterior comparativa con otro tipo de elementos constructivos o con fachadas vegetales de regiones o climas diferentes.

Por último, cabe destacar que las condiciones particulares de cada caso de estudio clima del lugar, período de medición, orientación de la fachada, tipo de sistema vegetal utilizado y características y desarrollo de vegetación y substrato, son factores

determinantes a la hora de poder extrapolar los resultados a otros casos con condiciones diferentes.

6.5 Resultados

A continuación se presentan a modo de resumen los resultados de los diferentes modelos utilizados para calcular los parámetros característicos del muro base (MB), de la fachada ventilada (FVT) y de la fachada vegetal (FVG). En la tabla 5.24 se muestran los valores medios de la resistencia térmica (R), la transmitancia térmica (U), la capacidad efectiva (C), coeficiente de convección (h_{se}) y absorptividad solar efectiva (α).

Tabla 5. 24. Resultados de los valores medios de los resultados de los diferentes modelos utilizados para calcular los parámetros de resistencia térmica (R), transmitancia térmica (U), capacidad efectiva (C), coeficiente de convección combinado (h_{se}) y absorptividad efectiva del muro (α), en el muro base (MB), en la fachada ventilada (FVT) y en la fachada vegetal (FVG)

Modelo	R [$^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$]			U [$\text{W}/^{\circ}\text{C m}^2$]			c [$\text{kJ}/^{\circ}\text{C m}^2$]			α			h_{se} [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$]		
	MB	FVT	FVG	MB	FVT	FVG	MB	FVT	FVG	MB	FVT	FVG	MB	FVT	FVG
CTE	0.75	2.10	1.20	1.33	0.48	0.83	249	256	364						
MEDIA	0.74	-	1.06	1.36	-	0.94									
LORD	0.73	2.46	1.26	1.36	0.40	0.79	256	470	313	0.34	0.21	0.11			
CTSM 2 estados	0.77	2.43	1.52	1.30	0.41	0.66	272	256	326	0.66	0.38	0.10	6.45	16.54	497

Se ha utilizado el código técnico de la edificación, el método de la media y dos programas informáticos LORD y CTSM para calcular las características térmicas de un muro base de hoja doble y su posterior rehabilitación mediante fachada ventilada de hoja cerámica y mediante fachada vegetal modular.

Los datos obtenidos presentan consistencia entre los diferentes modelos analizados ya que los valores de los parámetros estimados mediante en código técnico de la edificación concuerdan con los valores obtenidos mediante diferentes métodos, como es el método de la media, basado en promedios, el programa LORD y el programa CTSM con dos estados no medidos.

El código técnico de la edificación, es una estimación y está pensado para las fases de diseño de un proyecto y obtener resultados a modo comparativo de funcionamiento y aproximación de los resultados. Por lo que resulta válido y útil para la caracterización de

los parámetros térmicos (resistencia térmica, transmitancia térmica y capacidad efectiva) de las fachadas a estudio.

El método de la media, es un método estacionario basado en promedios. Es una técnica de análisis sencillo que proporciona información cuantitativa y cualitativa sobre los datos medidos y por lo tanto es muy útil como un primer paso en el proceso de análisis de datos. La desventaja de la aplicación de este método reside en el largo periodo de recopilación de los datos necesarios para poder obtener resultados precisos. Debido a ello, solo ha sido posible realizarlo sobre tres de las secuencias de la fachada vegetal. Otra desventaja de este método es que solo es capaz de cuantificar el parámetro de resistencia térmica.

Al observar los valores obtenidos mediante el método de la media y compararlo con el resto de metodologías empleados se observa que este método caracteriza bien el muro base de hoja doble. Sin embargo, a la hora de caracterizar el modulo vegetal los datos obtenidos son un 20 % menores que el resto de técnicas, debido que no es capaz de determinar adecuadamente la resistencia térmica del modulo vegetal.

Aunque el programa LORD es capaz de calcular todos los datos salvo el coeficiente de convección, se ha podido observar que no es muy robusto en el cálculo de la capacidad efectiva así como en el coeficiente de absortividad efectivo, donde presenta datos un 50 % inferior a los obtenidos con el programa CTSM.

Por último, el programa CTSM es apropiado para el cálculo preciso de todos los parámetros térmicos, tanto para el muro base de hoja doble como para las dos fachadas rehabilitadas, por lo tanto cabe señalar que es el programa más robusto. A parte de ello, es más rápido que el resto de programas lo cual supone un avance a la hora de caracterizar una fachada ya que se reduce el tiempo de experimentación y además se obtiene parámetros como la capacidad efectiva del muro y el coeficiente de convección.

No obstante, al realizar el análisis de los residuos revela la necesidad de investigar y buscar más en profundidad alternativas que expliquen mejor los cerramientos ventilados para conseguir modelos que mejoren los resultados obtenidos pudiéndolo implementar en futuros estudios con la temperatura exterior lo que facilitaría su uso, simulación y comparación con otros tipos de cerramientos.

Por tanto, para muros de doble hoja todos los programas presentan un buen comportamiento y las variaciones en los datos obtenidos son de pequeña magnitud y poco significativos, por lo que todos los programas pueden considerarse válidos, para su caracterización térmica. Para el caso del estudio de fachadas ventiladas o vegetadas, es decir con características térmicas especiales el programa CTSM muestra un mejor comportamiento que el programa LORD.

Analizando los valores obtenidos para el caso de las épocas de verano es decir, cuando el interés del confort reside en la refrigeración de la capa externa de la fachada ya que la radiación alcanza máximos así como las temperaturas exteriores. El efecto de la reducción del coeficiente de absortividad efectivo del muro produce la reducción de las temperaturas en la fachada con vegetación, lo que genera un el efecto positivo sobre las fachadas recubiertas con plantas lo que las convierte en adecuados dispositivos pasivos de reducción de temperatura.

Por el otro lado, durante la época de invierno las fachadas vegetales no son eficaces para reducir la demanda de calefacción ya que mediante la constante evapotranspiración de las plantas, más reducida que en periodos de verano, provoca la reducción de la temperatura de la capa externa de la fachada. Por lo tanto, en el caso de que una envolvente quiera ser renovada para reducir las pérdidas de calor sería recomendable añadir una capa de aislamiento sobre el muro base previa al sistema vegetal.

A continuación (Fig 5.25) se presenta de forma gráfica las características térmicas que caracterizan la situación inicial del muro base de doble hoja y las características posteriores a la rehabilitación energética mediante el uso de fachada ventilada cerámica y fachada vegetal modular.

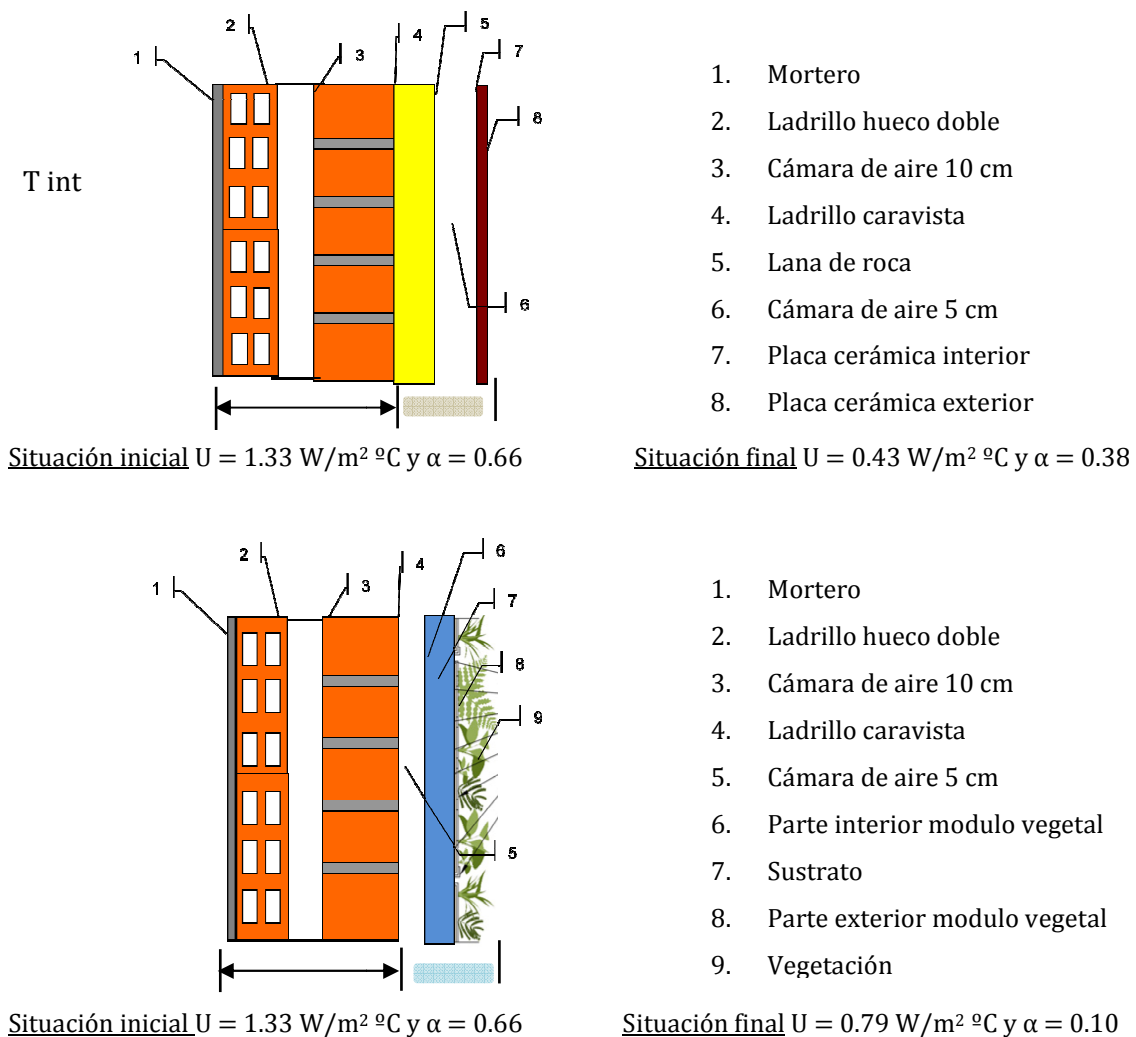


Fig. 5. 25. Características térmicas de la situación inicial del muro base de hoja doble y características térmicas posteriores a la rehabilitación con fachada ventilada cerámica arriba y con fachada vegetal abajo

En la figura anterior se puede observar el efecto positivo tanto de la rehabilitación mediante fachada ventilada cerámica como mediante fachada vegetal. En ambos casos las características térmicas presentan mejoras, en el primer caso mediante fachada ventilada cerámica pasamos de valores de transmitancia térmica del muro base de $1.33 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ y de absortividad efectiva de 0.66 a valores de transmitancia térmica de $0.43 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (aumento de la capacidad aislante del 68%) y absortividad efectiva del muro de 0.38 (aumento de la capacidad refrigerativa del 42%). En el caso de la fachada vegetal los valores de transmitancia térmica son de $0.79 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (aumento de la capacidad aislante del 41%) y de absortividad efectiva del muro es de 0.10 (aumento de la capacidad refrigerativa del 85%).

7 Análisis Termográfico

7.1 Introducción

En la actualidad la termografía está siendo ampliamente utilizada para la inspección de edificios urbanos, viviendas y oficinas, trabajos centrados en la inspección de instalaciones, de acabados y de aislamiento térmico.

Todos los materiales tienen la capacidad de absorber radiación infrarroja aumentando su temperatura, asimismo todos los materiales con una temperatura superior al cero absoluto emiten energía infrarroja. La termografía es una técnica que aprovecha la radiación emitida por la superficie de un cuerpo como variable termométrica. Esta radiación se explica mediante la Ley de Stefan-Boltzmann Eq. 110 y es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto [145]

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{Eq. 110}$$

Donde E es la energía radiante del cuerpo (W/m^2), ε es la emisividad (valor entre 0 y 1), σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.7 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$) y T es la temperatura absoluta del objeto (K).

Es difícil relacionar el análisis de la temperatura con el mundo vegetal, aún cuando es posible medir la temperatura de la superficie de las hojas mediante la detección de la radiación infrarroja. El calor desprendido por el metabolismo vegetal tiene un papel secundario en la temperatura de los vegetales, con una excepción: las flores de las plantas “termogénicas”, la mayoría pertenecientes a la *familia Araceae*, que pueden controlar su temperatura mediante el control de la respiración. Los cambios en la temperatura de las hojas en plantas no termogénicas resultan, principalmente, de alteraciones en la transpiración y dependen, de la conductancia estomática [146].

La transpiración en las plantas es un proceso regulado para evitar las pérdidas excesivas de agua, al tiempo que maximiza el intercambio de gases necesario para la fotosíntesis. La regulación se lleva a cabo en las células de los estomas, cuando están abiertos, en la evaporación de agua, se consume gran cantidad de calor y tiene como consecuencia la refrigeración de los tejidos y por consiguiente un descenso en la temperatura de la superficie foliar. Por el contrario, cuando los estomas se cierran, ya sea durante la noche

o ante situaciones de estrés como la falta de agua, la temperatura de la hoja aumenta debido a la falta de transpiración. La correlación entre temperatura de la superficie foliar y transpiración, así como entre temperatura y conductancia estomática ha sido analizada por diversos autores.

Chaerle *et al.* en 1999 [147] mostró mediante medidas simultáneas de porometría y termografía, cambios paralelos en la temperatura y transpiración de la hoja y en 2001 [148] mediante el empleo de un gas estableció que los cambios en la temperatura de las hojas tras sufrir muerte celular están precedidos por el cierre estomático del tejido colapsado.

Lindenthal *et al.* (2005) [149] y Oerke *et al.* (2006) [150], demostraron que la termografía de imagen tiene suficiente resolución como para proporcionar información sobre la variabilidad de la conductancia estomática a lo largo de la superficie de una hoja de *Phaseolus vulgaris*. Del mismo modo, Jones (2004) [151] subraya que los avances de la termografía la capacitan para el estudio de los cambios en la conductancia estomática, y señala que la termografía ha demostrado ser un método para el análisis cuantitativo de la información fisiológica vegetal.

7.2 Aplicaciones de la imagen termográfica

Las técnicas de imagen termográfico proporcionan una gran cantidad de información cualitativa que se puede implementar con las medidas de temperatura puntuales. Su gran poder resolutivo permite mostrar el valor que un determinado parámetro presenta en todos los puntos de la superficie de una hoja, de plantas totales, o de fachadas o muros completos. De esta forma, podemos visualizar gradientes o cambios locales de temperatura.

Las aplicaciones más extendidas de la termografía se encuentran en el ámbito de la medicina y en el sector militar. En el campo de la biología vegetal, las aplicaciones de las imágenes termográficas están desarrolladas con los siguientes objetivos:

- Detección de las alteraciones ocasionadas por patógenos, debido a que se produce un aumento de temperatura en las lesiones producidas por insectos o por bacterias, debido a la desecación que sufren los tejidos tras ser atacados [152].

- Detección de anomalías en el ascenso de la savia en leñosas, debido a que esta técnica permite la visualización de las variaciones térmicas a lo largo de los vasos de los árboles en tiempo real [153].
- Permiten la monitorización del control de calidad en postcosecha de las frutas y los vegetales de forma no destructiva. Un ejemplo de este caso es el control de la temperatura de la superficie de las naranjas valencianas durante el proceso de secado, permitiendo así determinar el momento en el que el proceso ha acabado sin alterar la calidad del fruto [154].
- Tolerancia a la congelación de los cultivos. El congelamiento produce daños económicos en cultivos y también limita la distribución de estos. Las imágenes termográficas proporcionan una descripción del daño ocasionado en tiempo real, indicando dónde se inicia y cómo avanza el hielo [155], [156].
- La teledetección es un método de adquisición e interpretación de las medidas realizadas sobre un objeto sin contacto físico entre éste y el equipo de medida. La mayoría de los cultivos son altamente sensibles a los pequeños cambios en la disponibilidad de agua, teniendo éstos gran impacto en la productividad y en la calidad de las cosechas [157]. La termografía de imagen ha demostrado su eficacia en este terreno, ya que la temperatura de los cultivos es un poderoso indicador del estado hídrico de las plantas y una herramienta potente para proporcionar información sobre el uso del agua en agricultura, permitiendo desarrollar regímenes de riego apropiados
- Comportamiento energético de cubiertas. En Grecia, Niachou *et al.* en 2001 [158] llevó a cabo una investigación basada en registrar temperaturas superficiales de cubierta convencional y ajardinada y del aire durante el mes de Agosto. Las temperaturas de las hojas, medidas a través de la cámara termográfica oscilaban entre los 26 °C y los 38 °C. El confort térmico de la habitación bajo la cubierta vegetal mejoraba 2 °C en comparación con la habitación bajo la cubierta convencional. La simulación mostró que durante el día, las temperaturas interiores en la habitación bajo cubierta ajardinada eran inferiores a las registradas en la habitación bajo cubierta convencional. El ahorro energético de una cubierta vegetal

obtenido en comparación con un cerramiento convencional sin aislamiento fue del 37 %.

7.3 Análisis termográfico de fachada vegetal

7.3.1 Características técnicas

La cámara termográfica empleada en la realización de la presente tesis doctoral, es el Modelo Therma CAM P60 de la marca FLIR SYSTEMS que posee las siguientes características: distancia focal 0.3 m, resolución espacial de 1.3 mrad, sensibilidad térmica de 0.06 °C a 30 °C, imagen de 320 x 240 píxeles y rango espectral 7.5 - 13 μm. El software utilizado ha sido el FLIR QuickReport 1.2.

Mediante la captación de la radiación infrarroja emitida por la fachada, la cámara termográfica es capaz de medir diferencias de temperaturas por debajo de 0.1 °C. El equipo empleado en nuestro trabajo es un sistema de onda larga, este tipo de cámaras son más recomendado para el uso en exteriores debido a que captan con más dificultad las reflexiones solares y son más sensibles a las radiaciones de baja temperatura del entorno. Se trata de un sistema de captación de imágenes térmicas que representan la distribución superficial de temperaturas de la fachada observada, permitiendo la realización de medidas y análisis térmico sobre la propia imagen.

7.3.2 Análisis termográfico marzo 2014

Con el objetivo de observar el efecto de la fachada vegetal en la temperatura de la fachada de la celda de ensayos Paslink y consecuentemente en la transmisión de la energía hacia el interior, se llevó a cabo una sesión de fotografías termográficas, el 27 y 28 de marzo de 2014, desde el exterior de la célula Paslink (cámara situada a 5 m de la celda de ensayo).

No se debe olvidar la influencia de la radiación solar sobre las superficies exteriores, la cual es absorbida haciendo que aumente su temperatura. Con el fin de evitar el conflicto del aumento de temperatura debido a la radiación solar, las fotografías termográficas se deben realizar por la noche o en días nublados, con poco viento, para reducir las pérdidas por convección.

En nuestro caso la toma de fotografías se llevó a cabo en marzo de 2014, con la fachada vegetal completamente vegetada. La sesión de fotografías comenzó a las 10.00h del día 27 de marzo hasta el día 28 de marzo a las 12.00h, realizándose de forma automática la toma de imágenes termográficas cada 30 minutos.

En la Figura 5.26 se observan los datos climatológicos y las temperaturas de las diferentes capas de la fachada vegetal el día de la toma de imágenes termográficas.

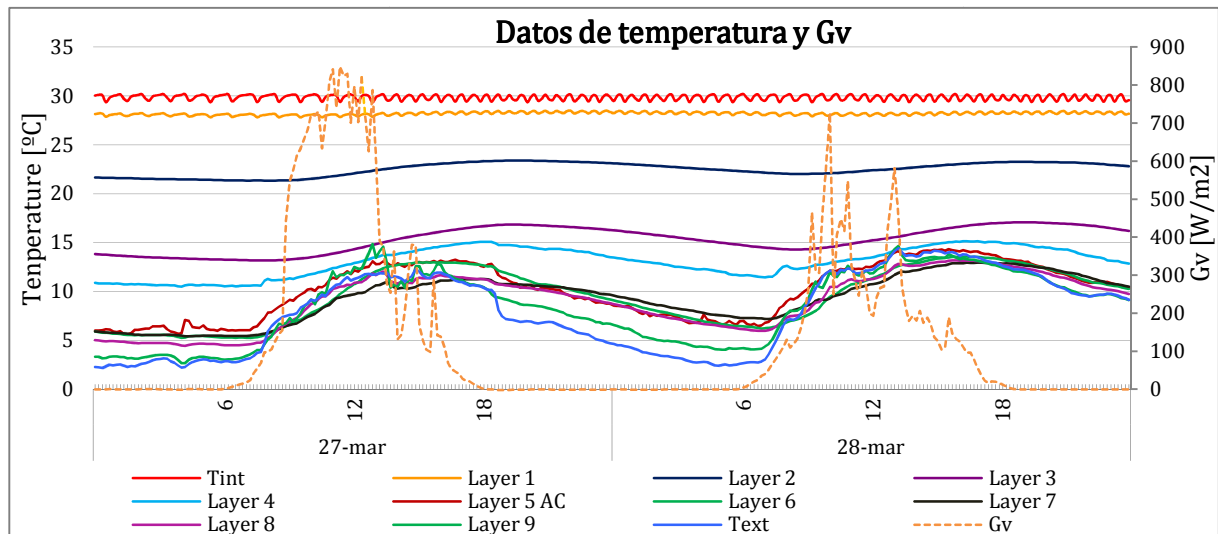


Fig. 5. 26. Datos de temperatura de las diferentes capas de la pared vegetal, temperatura del aire interior y exterior de la celda de ensayos, y radiación vertical global (G_v) a lo largo de la secuencia del análisis termográfico.

La realización de las imágenes se tomo en el mes de marzo de 2014 para asegurar un importante gradiente de temperaturas entre el exterior e interior de la fachada vegetal. Durante la sesión termográfica el interior de la celda de ensayos se encontraba a temperatura constante de 30 °C, como se puede apreciar en la figura anterior. En el exterior la temperatura varió entre 12 °C de máxima y 2.5 °C de mínima.

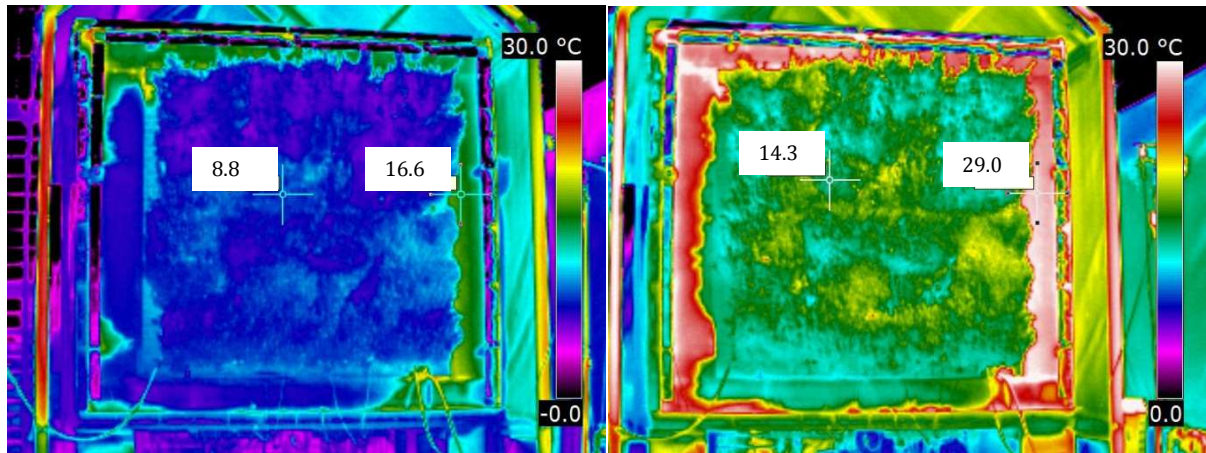
A continuación Fig. 5.27, se puede observar el detalle del estado vegetativo de la fachada vegetal el día de las toma de las imágenes termográficas.



Fig. 5. 27. Fotografías de la fachada vegetal el día de la realización de las fotografías termográficas (27-03-2014). Izda.: detalle del marco perimetral aislante Centro: visión completa de la fachada vegetal. Dcha. Detalle del desarrollo vegetativo

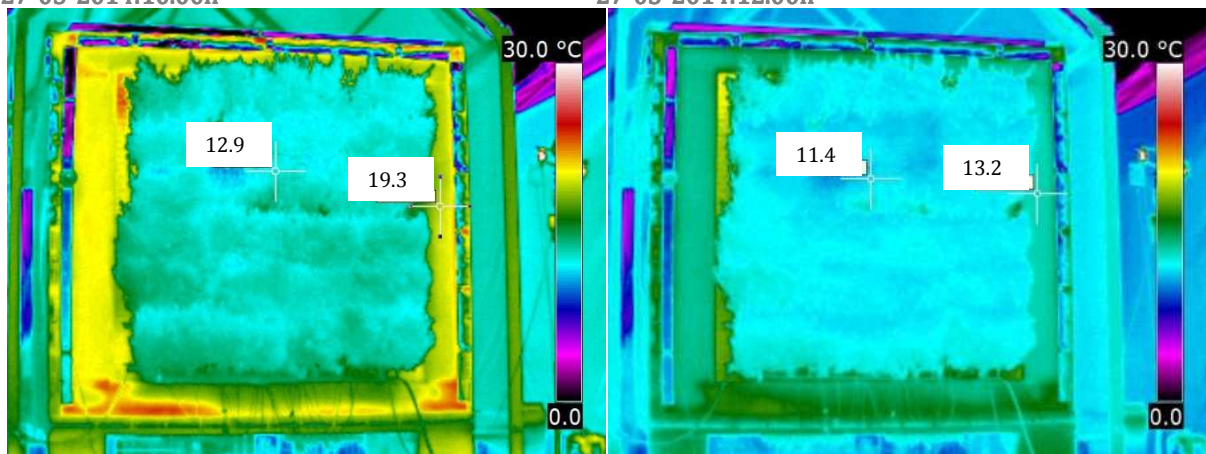
Como se puede ver en la imagen anterior la fachada vegetal está rodeada por un marco perimetral aislante, el cual está formado por un anillo lleno de poliestireno expandido con un espesor de 0.4 m, excepto en la base, en el que se utiliza vidrio celular debido a su mayor capacidad de carga. La fachada vegetal se encuentra instalada en este marco perimetral aislante. La temperatura de este marco se tomará para cuantificar y contrastar con la temperatura central de la fachada vegetal.

A continuación (Fig .28) se muestran la fotografías termográficas tomadas a lo largo de 26 horas:



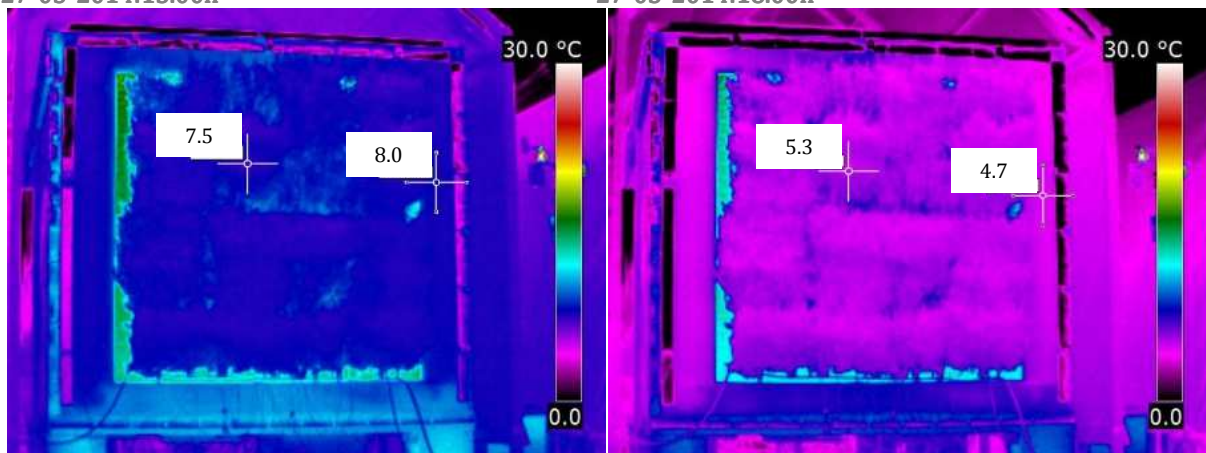
27-03-2014:10.00h

27-03-2014:12.00h



27-03-2014:15.00h

27-03-2014:18.00h



27-03-2014:21.00h

27-03-2014:24.00h

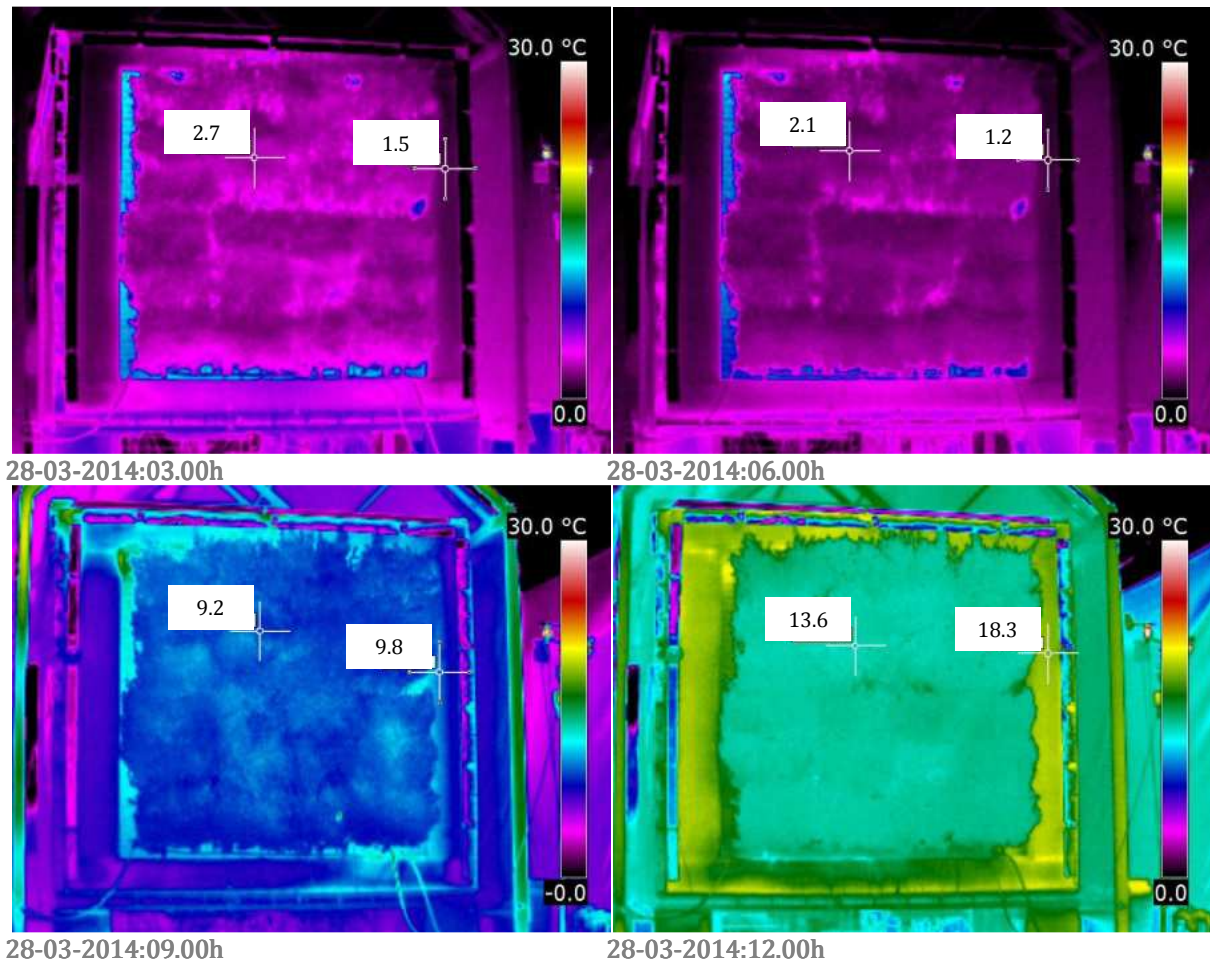


Fig. 5. 28. Fotografías termográficas de la fachada vegetal realizadas durante 26 horas desde el día 27-03-2014 a las 10.00h. En cada fotografía se indica la temperatura de la vegetación en el centro de la fachada vegetal y en un punto del marco aislante que la rodea. En el pie de cada fotografía se puede ver el día y la hora a la que fue tomada.

En cuanto a las fotografías, se observan diferencias en los resultados entre la parte central de la fachada vegetal y el marco aislante de este, principalmente en las horas centrales del día cuando la temperatura exterior es máxima.

A medida que la radiación va teniendo presencia la temperatura del aire exterior aumenta progresivamente y de la misma forma la temperatura de la fachada vegetal y el marco que lo rodea. A las 10.00 h de la mañana del día 27 de marzo de 2014 la temperatura del aire exterior se encontraba a 8.2 °C prácticamente en equilibrio con la temperatura de la fachada vegetal, pero no así con la temperatura del perímetro que ya doblaba esa temperatura 16.6 °C.

Esta diferencia de temperaturas entre ambas superficies se mantiene a medida que la radiación solar aumenta. Así, mientras que la fachada vegetal no supera los 15°C al mediodía (12.00 h) cuando la temperatura del aire exterior es de 12°C, el marco dobla esta temperatura alcanzando prácticamente los 30°C. En el análisis de este caso demuestra, que las superficies con vegetación, permanecen 15°C más frías, que aquellas que están a pleno sol debido a la evapotranspiración.

Con el transcurso del día y radiación solar disminuye, a la hora del ocaso 18.00 h, se ve como la temperatura del marco ha disminuido rápidamente hasta los 13 °C y la parte ajardinada se encuentra a 11.4 °C. A partir de este momento ya sin radiación solar, la temperatura exterior del aire disminuye rápidamente llegando a la mínima de 2.5 °C a las 06.00 h, en este momento la temperatura de fachada vegetal 2.1 °C, se encuentra un grado por encima de la del marco perimetral, 1.2 °C.

7.4 Análisis de los resultados

La secuencia de imágenes empleadas en este trabajo para el análisis térmico de la fachada vegetal ha tenido especial importancia para confirmar el efecto termorregulador de las plantas sobre las fachadas.

El análisis de las imágenes termográficas proporciona información cuantitativa muy importante acerca de los mecanismos de termorregulación de las fachadas vegetales. Por un lado, las diferencias de temperatura entre la superficie con plantas y el marco sin vegetación se hacen notorias con la aparición de radiación solar. Llegando a doblar la temperatura en la superficie no cubierta por plantas respecto a la vegetada en las horas centrales del día

La medida de las imágenes termográficas aporta información cuantitativa sobre el metabolismo secundario de las plantas, implicados en la termorregulación. Las medidas realizadas, como en nuestro caso, a lo largo de un periodo de 24h permiten detectar y cuantificar el proceso metabólico diurno y nocturno. La capacidad de obtener imágenes de todo el proceso abre la posibilidad de visualizar espacial y temporalmente los efectos causados tanto por factores de estrés abióticos como bióticos en la fachada vegetal y las diferencias de temperatura con superficies inertes.

Las medidas de imagen termográfica han sido usadas en numerosas ocasiones en el seguimiento de la regulación térmica de edificios convencionales y en especial para la detección de puentes térmicos y deterioros de aislamiento. En el caso de las fachadas vegetales, esta caracterización ha sido escasa. La carencia de información en este ámbito hace a las medidas termográficas tomadas un punto de partida para futuros estudios.

Las diferencias de temperatura entre ambas superficies (vegetal y marco aislado) suceden de forma más marcada en periodos con elevada radiación solar. Las hojas de las plantas alcanzan la mitad de la temperatura de la pared adyacente aislante lo que supone, que las plantas logran reducir la temperatura mediante la transpiración.

La ausencia de radiación solar y consecuente reducción de temperatura exterior durante las horas nocturnas reduce la temperatura exterior y de las superficies exteriores. Por lo que, al contrario que en la fase diurna, durante el periodo nocturno, la temperatura entre ambas superficies prácticamente se iguala a partir de las 21.00 h, detectándose en las imágenes como los valores de temperatura de las plantas son superiores en un grado a las superficies adyacentes. La temperatura de las hojas está asociada a la transpiración de las mismas y por lo tanto durante este periodo los estomas se encuentran cerrados y la planta no transpira.

Considerando los resultados de esta técnica, es evidente la enorme complejidad de la termorregulación e interacción planta-fachada, que resulta dependiente de los factores ambientales y del estado de desarrollo del vegetal en el momento del muestreo. La respuesta de la planta a la radiación solar y a la ausencia de esta, tiene patrones diarios muy diferentes a las superficies inertes habituales en la edificación. Concluyendo, la propiedad más interesante de la fachada vegetal, es que estas superficies vegetadas mantienen su temperatura cercana a la del aire, tanto de día como de noche, por lo que resultan útiles como termoreguladoras del intercambio térmico.

8 Aislamiento y Regulación térmica de edificios

La escasez de energía, la contaminación, el calentamiento global y los impactos de las islas de calor urbanas son algunos de los temas más urgentes actualmente. Históricamente, la arquitectura y la construcción se han basado en la experiencia y en el conocimiento del medio y el clima. Después de un período en el que el diseño de edificio ignoró el clima local, han surgido edificios que incorporando a la arquitectura técnicas pasivas consiguen edificios de baja necesidades energéticas [159]. Asimismo, el uso de menos energía reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso) y reduce los costes operativos.

La vida útil de un edificio se puede prolongar actuando sobre la envolvente, ya que es la parte del edificio que sufre las inclemencias meteorológicas y la que junto a las instalaciones son las responsables del confort térmico de las viviendas. Actuando sobre la envolvente se puede conseguir una mejora significativa en las condiciones de habitabilidad reduciendo las emisiones de CO₂ y la demanda energética.

8.1 Análisis de la reducción de energía en edificios.

Uno de los principales objetivos de esta tesis es determinar la transferencia de calor entre el ambiente exterior e interior de la celda de ensayo Paslink bajo diferentes soluciones constructivas, con el objetivo de crear un ambiente interior confortable. La manera de evaluar si las acciones de rehabilitación emprendidas son las correctas, será estimando y comparando ambas soluciones constructivas utilizadas.

A lo largo de esta sección, se discutirá sobre la importancia en la edificación de los consumos de energía. Las superficies opacas representan la parte más característica, energéticamente hablando, de los componentes que constituyen la piel del edificio. Por lo tanto, mientras más datos se tengan sobre los consumos energéticos en la fachada exterior, más fácil será la evaluación de la influencia de estas superficies sobre los consumos.

Hay estrategias que no requieren energía externa para mejorar el rendimiento del edificio. Estas estrategias pasivas ayudan a reducir las condiciones climáticas no deseadas, aprovechando los recursos que ofrece la construcción como son, la ubicación, la radiación solar, la variabilidad térmica, la luz del día, el cielo despejado y la temperatura del suelo [160]. La figura 5.29 muestra estas estrategias agrupadas por su finalidad: calefacción, refrigeración y almacenamiento de energía térmica también muestra una lista de soluciones híbridas.

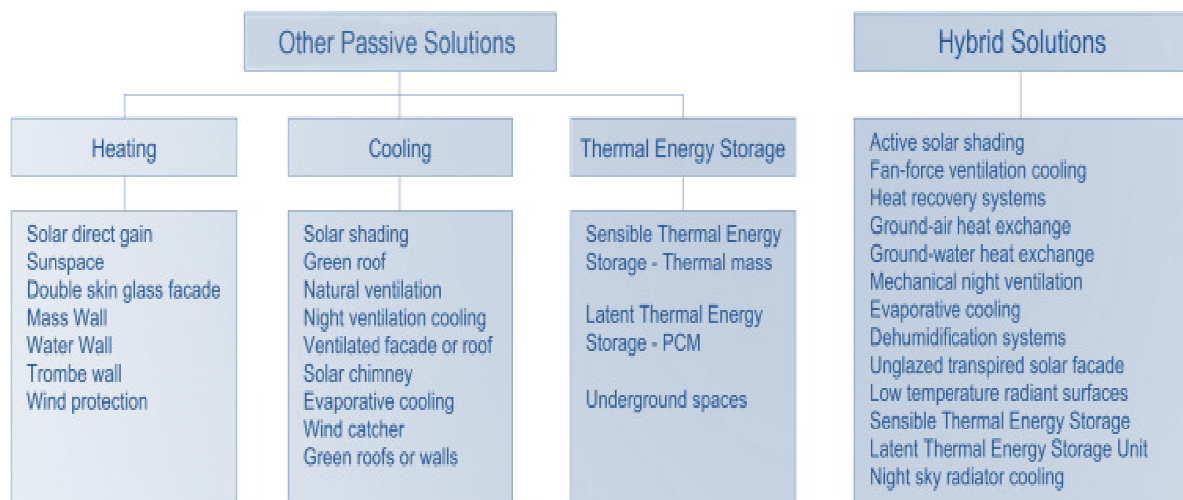


Fig. 5. 29. Soluciones pasivas e híbridas en edificios Fuente: Rodríguez-Ubinas *et al.* (2014) [160]

Las estrategias de diseño pasivo contribuyen a mejorar las condiciones de confort interior, aumentando la eficiencia energética de los edificios y reduciendo su consumo de energía [160]. A lo largo de esta tesis se han empleado dos soluciones pasivas (fachada ventilada y fachada vegetal) sobre el muro base de hoja doble, para entender el funcionamiento de estas se han elegido varios días representativos, tanto del periodo de verano como del periodo de invierno.

En las siguientes secciones se recoge el perfil de temperaturas en la hora con mayor radiación solar (12.00 h) y la de mayor salto térmico (06.00 h) de las diferentes soluciones constructivas evaluadas en diferentes momentos anuales.

8.1.1 Muro base

Para el caso del primer elemento constructivo, muro base de doble hoja, sólo se tienen las secuencias de muestreo realizadas en el periodo de verano de 2012. El análisis se realizó en la toma de datos definida en el capítulo 4, SEC I, concretamente para el día 03 de julio de 2012, como se muestra en la siguiente figura 5.30.

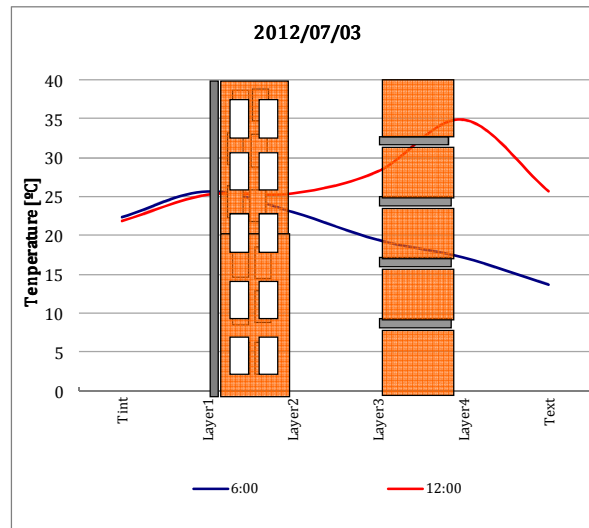


Fig. 5.30. Perfil de temperaturas a las 06 y 12.00h del día 03 de julio de 2012.

Como se ve en la figura anterior la temperatura de la superficie exterior sube en la hora central del día (12.00 h) debido a la máxima incidencia de la radiación solar. A lo largo de las diferentes capas que la componen, la temperatura se reduce debido a la resistencia térmica y capacitancia de los elementos. Así, mientras que el ladrillo caravista tiene una temperatura exterior de 35 °C en la cara interna del ladrillo la temperatura se reduce hasta 25 °C , siendo en ese momento de 25 °C la temperatura del aire libre exterior.

Por el otro lado, la temperatura a las 06.00 h, cuando no hay radiación solar, sufre un disminución constante desde el interior de la celda a 20 °C hasta el aire exterior que se encuentra a 15 °C.

8.1.2 Fachada ventilada

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el primer caso de rehabilitación del muro base doble. Esta primera solución constructiva consta del anterior muro base de doble hoja con un aislante de 5 cm de lana de roca y un aplacado cerámico de 2 cm, entre ambas capas se encuentra una cámara de aire ventilada de 5 cm.

Para el análisis del comportamiento de la fachada ventilada, se toman los datos de un día representativo, durante la toma de datos definida en el capítulo 4, de la Sec IV, concretamente para el día 20 de agosto de 2012.

Se estudian el desarrollo de las temperaturas en las diferentes capas de la solución y se evalúa el comportamiento de aire dentro de la cámara de aire ventilada dependiendo de las condiciones ambientales de temperatura y radiación solar. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente figura 5.31.

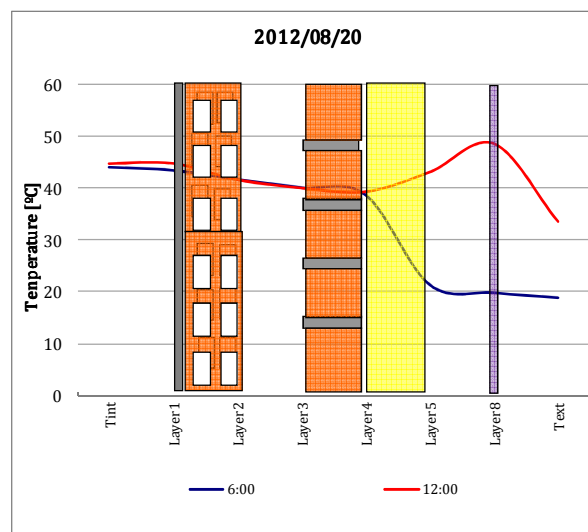


Fig. 5. 31. Perfil de temperaturas de la fachada ventilada a las 06 y 12.00h del día 20 de agosto de 2012.

El primer parámetro estudiado es la temperatura, la Figura 5.29 muestra la variación de la temperatura a lo largo de las diferentes capas de la muestra

El primer punto importante a mencionar es que se puede ver como las temperaturas del ambiente interior antes de la capa aislante no sufren grandes variaciones. Las temperaturas se mantienen muy estables a lo largo de todo el día. En segundo lugar, se observa el funcionamiento de la lana de roca y su efecto aislante, sobre todo a las 06.00h. La zona más cercana de la cámara ventilada a la capa aislante tiene temperaturas

cercanas a esa capa, repitiendo el mismo fenómeno para las zonas cercanas a la capa cerámica.

Por último, se observa como en la hora central del día, cuando la temperatura exterior es de 32 °C, la superficie exterior del muro alcanza prácticamente los 50 °C. Mientras que durante las horas nocturnas, sin radiación solar, la temperatura de la capa exterior cerámica se encuentra a la misma temperatura que el exterior, 20 °C.

8.1.3 Fachada vegetal

En este segundo caso de solución de rehabilitación pasiva, se ha llevado a cabo el estudio del perfil de temperaturas en la fachada vegetal. El análisis se ha realizado para la época de invierno y de verano, medida en diversas condiciones ambientales y distinto desarrollo vegetativo. Durante la época de invierno, se han tomado días con bajas temperaturas exteriores y con radiación solar significativa, para favorecer el salto térmico y poder observar el potencial de la fachada vegetada durante la época de invierno.

8.1.3.1 Perfil de temperaturas durante la época de invierno.

Con el objetivo de apreciar los efectos del desarrollo de la vegetación sobre la temperatura exterior de la envolvente se llevó a cabo el perfil de temperaturas en la misma época del año de dos años consecutivos. A continuación (Fig. 5.32) se presentan los modelos de perfiles de temperatura realizados sobre la fachada vegetal en la época de invierno a lo largo de dos años consecutivos.

La muestra ensayada durante la época de invierno de 2013 presenta un desarrollo vegetativo reducido, en comparación con el ensayo realizado en invierno de 2014 momento en el que la vegetación se encontraba totalmente desarrollada.

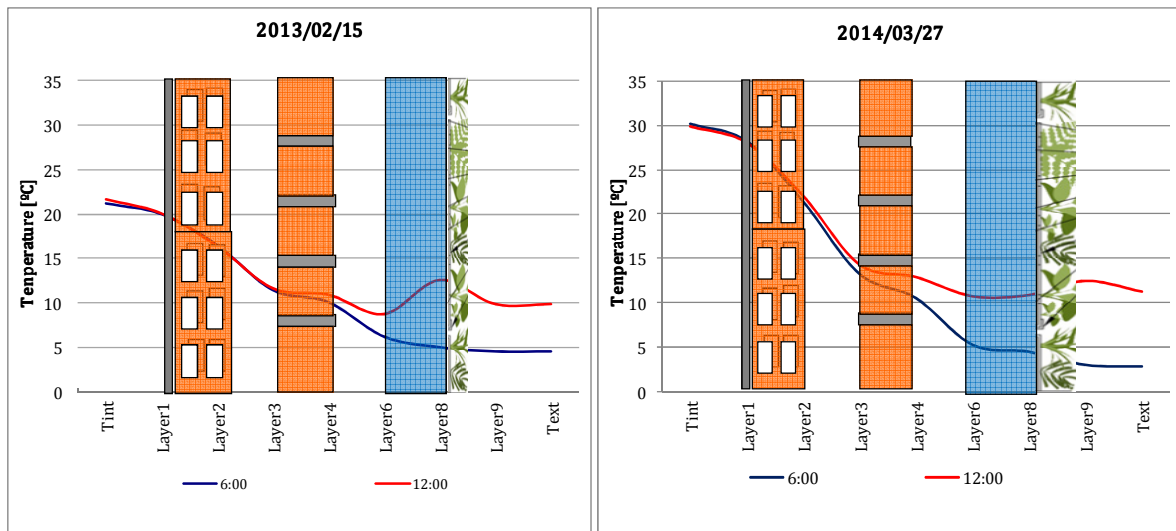


Fig. 5. 32. Perfil de temperaturas a las 06 y 12.00h durante la época de invierno. Izda.: muestra con reducido desarrollo vegetativo durante el 15 de febrero de 2013. Dcha.: muestra con desarrollo vegetativo completo el día 27 de marzo de 2014.

El primer punto a destacar en ambos modelos, es la temperatura del ambiente interior hasta antes de la capa de ladrillo caravista, en los dos momentos del día evaluados, tiene prácticamente la misma temperatura y la misma línea de descenso.

En el primer caso analizado, fachada vegetal durante la época de invierno y con poco desarrollo de la vegetación (40 % superficie vegetada), se observa como en la hora central del día la radiación incidente eleva la temperatura exterior del modulo vegetal dos grados centígrados sobre la temperatura exterior. Por lo tanto en este primer caso, en el que la vegetación no está muy desarrollada, se observa un ligero aumento de la temperatura en la superficie exterior.

El segundo caso, ya con una muestra vegetal completamente desarrollada (100 % de la superficie) e igual que en el anterior caso, durante un día de invierno con importante radiación solar. Se observa como a las 12.00 h la temperatura de las capas exteriores de la muestra es algo inferior y constante a lo largo de las capas que conforman la fachada vegetal, esta temperatura se mantiene prácticamente constante. En contraste al caso anterior, donde la temperatura exterior del muro aumenta por encima de la temperatura del ambiente. Mientras que durante las horas nocturnas, sin radiación solar, existe un gradiente de 25 °C entre el exterior e interior de la celda de ensayo, la temperatura de la capa exterior vegetal se encuentra ligeramente por encima de la temperatura exterior, pero constante en todo el sistema vegetal.

8.1.3.2 Perfil de temperaturas durante la época de verano

El perfil de temperaturas durante la época de veranos realizados sobre fachada vegetal, se analizó siguiendo el esquema descrito en el apartado anterior. En la Figura 5.33 se observa la variación de la temperatura a lo largo de las diferentes capas de la muestra con ensayos de temperatura interior distintos, el primero de ellos con 30 °C y el segundo con 10 °C.

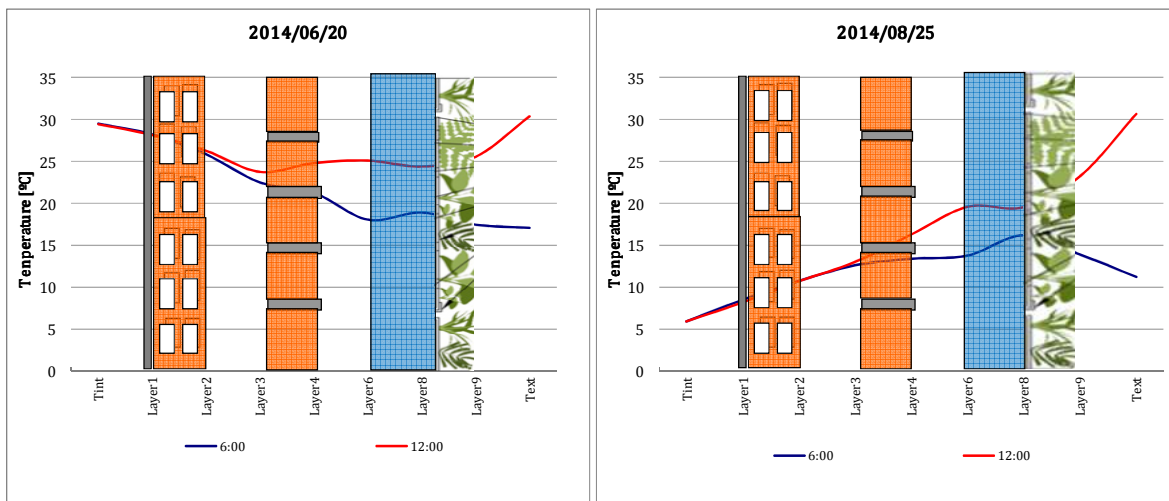


Fig. 5.33. Perfil de temperaturas a las 06 y 12.00h durante la época de verano Izda.: muestra con desarrollo vegetativo completo durante un ensayo de temperatura constante interior de 30 °C el 20 de junio de 2014. Dcha.: muestra con desarrollo vegetativo completo durante un ensayo de temperatura constante interior de 10 °C el 25 de agosto de 2014

El primer caso analizado, representa el perfil de temperaturas durante el mes de junio de 2014, con una fachada vegetal totalmente vegetada. La Fig. 5.33 nos muestra como cuando la temperatura exterior está en su máxima (30 °C) la fachada vegetal se encuentra a una menor temperatura debido a la transpiración de las plantas las cuales refrescan el aire circundante, así se comprueba como la temperatura a la hora central del día no alcanza los 25 °C. No debemos olvidar que este tipo de fachadas vegetales modulares cuentan con un sistema de irrigación que permite a la planta tener siempre agua disponible. Gracias a ello, una superficie vegetal bien irrigada cuando la temperatura es alta y la humedad ambiental es baja, podría estar más fría que la temperatura del aire por el enfriamiento evaporativo.

Cuando la temperatura exterior baja (17 °C) durante las hora nocturnas y el salto térmico entre el interior y exterior del muro es máximo, se observa como la temperatura

de la fachada vegetal está levemente por encima de la temperatura exterior, y como el resto de capas hasta llegar al ladrillo se mantiene constante.

Por último, se analiza el caso para el periodo de verano con la vegetación completamente desarrollada pero con sistema de refrigeración interior para conseguir un flujo de calor entrante. Así, como se observa en la Fig. 5.33, mientras que la celda interior se encuentra a una temperatura de 5 °C la temperatura del aire exterior es de 30 °C. Bajo estas condiciones, en el momento de mayor radiación solar diurna, la temperatura de la capa exterior de la vegetación no sobrepasa los 20 °C.

El gradiente de temperaturas durante el periodo nocturno detectados durante este periodo siguen el patrón contrario, es decir, cuando la temperatura exterior es mínima (10 °C) las plantas y los módulos que las albergan se encuentran a 15 °C.

8.1.4 Análisis de los resultados

En primer lugar cabe señalar las diferencias existentes entre las dos soluciones constructivas utilizadas, sobre todo visibles en la temperatura de la cámara de aire y en la temperatura de la superficie exterior.

Observando los datos de las secciones previas se puede afirmar que mientras que un muro tradicional, o fachada ventilada durante los periodos de radiación máxima aumentan su temperatura en 20 °C respecto a la temperatura ambiente, las fachadas vegetales mantiene la temperatura en equilibrio ligeramente por debajo de la temperatura ambiental.

Queda claro que la temperatura del aire no está tan influida por la vegetación, aunque por medio de la evapotranspiración, es posible disminuir la temperatura que rodea las plantas. Es decir, sí se encuentra el efecto de la vegetación es en las temperaturas superficiales, ya que gracias a la sombra que ejercen favorecen que el aire que está en contacto con las superficies quede protegida y no se caliente, e incluso si la superficie está húmeda, como en el caso de los módulos vegetales, puede llegar a enfriarse.

Por lo tanto la utilización en conjunto de vegetación y materiales constructivos, puede desarrollar sistemas para el enfriamiento de las superficies que no solo tiene como fin el confort térmico de sus habitantes sino también el ahorro energético.

Los resultados de esta sección abren nuevas líneas de investigación de las fachadas vegetales. El estudio térmico de la fachada vegetal y su comportamiento térmico permitirán aumentar la eficiencia térmica de los edificios. A pesar de ello, se hace necesario el aumento de trabajos relacionados con fachadas vegetales lo que ayudaría en su futura aplicación y comercialización.

9 Conclusiones

En este capítulo se recogen las principales conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral, destacando especialmente las relativas al modelo del comportamiento térmico de una fachada vegetal mediante los datos obtenidos en condiciones reales de ensayo.

A lo largo de este capítulo se ha llevado a cabo, el estudio dinámico del comportamiento térmico de un muro doble, convertido mediante rehabilitación energética en una fachada ventilada y posteriormente en una fachada vegetal, para obtener estimaciones sobre los parámetros físicos que lo caracterizan y poder caracterizar las variaciones respecto a su estado inicial mediante cuatro metodologías diferentes.

En primer lugar, se han identificado las características térmicas de las diferentes fachadas en base al código técnico de la edificación, para posteriormente poder validar los resultados obtenidos con las diferentes metodologías realizadas en base a estas.

En segundo lugar, se han estudiado las capacidades y limitaciones del método de la media, identificado mediante esta técnica los parámetros tanto del muro base como de la fachada vegetal.

En tercer lugar, mediante el programa LORD se han llevado a cabo la identificación de las características térmicas de los elementos que constituyen el muro base y las fachadas ventilada y vegetal.

Como cuarto método, se ha utilizado el programa R con el paquete CTSM. Mediante este programa se han propuesto varios modelos para estimar, la resistencia térmica, la transmitancia térmica, la capacidad efectiva del muro, el coeficiente de convección (en fachada ventilada) y el coeficiente de convección combinada (en fachada vegetal) y la absorptividad solar efectiva del muro. En concreto se han utilizado modelos de ecuaciones diferenciales estocásticas, de un estado, y de dos estados no medidos.

Los valores de los parámetros estimados por las tres vías concuerdan con los valores obtenidos mediante el CTE.

En lo referido al programa CTSM supone un importante avance a la hora de caracterizar una fachada, ya que mediante el uso de este programa se reduce considerablemente el tiempo de experimentación. Los valores de incertidumbre de las estimaciones están dentro de los límites aceptables dada la naturaleza a escala real de los ensayos realizados. Analizando los residuos obtenidos, los modelos presentan un buen comportamiento en cuanto a la predicción, no obstante, observando los resultados obtenidos para los parámetros, y sus errores correspondientes, sería necesario un estudio más detallado para poder comprobar si estas desviaciones se deben a un problema de los modelos empleados, o si por el contrario se debe a la configuración del experimento.

Como conclusiones principales de los ensayos llevados a cabo con el programa CTSM se puede concluir que:

- Se consigue un aumento de la capacidad aislante del 68 % y capacidad refrigerativa del 42 % con la implementación de una fachada ventilada cerámica (con 5 cm de lana de roca) sobre un muro de hoja doble. En el caso de la fachada vegetal (sin instalación de un material aislante específico) la capacidad aislante aumenta en un 41 % y la capacidad refrigerativa en un 85 % respecto al muro base.
- Se puede determinar que las fachadas vegetales pueden incrementar ligeramente las demandas de calefacción en épocas frías mientras que en épocas cálidas, disminuyen significativamente las demandas de energía para refrigeración.
- El pequeño gradiente de temperaturas entre la temperatura de la cámara de aire y la temperatura exterior hace difícil su identificación por lo que se tomó el valor de T_c en los modelos matemáticos de fachada ventilada y fachada vegetal.
- La diferencia entre la temperatura utilizada en los modelos matemáticos, temperatura de la cámara de aire (T_c), y la temperatura ambiente exterior (T_e), se ha comprobado que es del orden del 10 %. Esta reducida diferencia permite hacer simulaciones con la temperatura exterior teniendo asumiendo un error del 10 %. La posibilidad de poder realizar simulaciones con datos meteorológicos

facilitará en gran medida su utilización en simulación energética así se abre la posibilidad de poder introducirlo en programas de certificación como es el caso del CALENER.

- Al realizar determinación del coeficiente de convección (fachada ventilada), coeficiente de convección combinado (fachada vegetal) y el coeficiente de absortividad solar efectivo de los dos tipos de fachada (ventilada y vegetal) ha permitido una comprensión más profunda del fenómeno de transferencia de calor. Los resultados obtenidos permiten establecer los comportamientos térmicos de cada uno de los tipos de fachada estudiada lo que permite realizar una comparación entre ellas.

A lo largo de la quinta sección del capítulo se ha realizado un análisis termográfico de la fachada vegetal revelando mediante datos cuantitativos la capacidad refrigerante de la vegetación. El análisis de las imágenes termográficas proporciona información cuantitativa acerca de los mecanismos de termorregulación de las fachadas vegetales. Observándose como las superficies vegetadas mantienen su temperatura cercana a la del aire, tanto de día como de noche, por lo que resultan útiles como reguladoras del intercambio térmico.

En la última sección del capítulo se lleva a cabo el estudio del comportamiento aislante de las dos soluciones de rehabilitación comparando su consumo energético y consiguiente ahorro energético y medioambiental.

"Escucha en silencio, porque si tu corazón está lleno
de otras cosas no podrás oír [...]"

Teresa de Calcuta (1910-1997)



CAPÍTULO 6

ESTUDIO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO Y
ABSORCIÓN ACÚSTICA DE UNA FACHADA
VEGETAL

RESUMEN

En este capítulo se describe el desarrollo de la segunda parte experimental, consistente en la caracterización acústica de una fachada vegetal. Para ello se realizaron dos ensayos acústicos, uno para caracterizar la capacidad de aislamiento y otro para caracterizar la absorción acústica. Asimismo, el artículo "Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings", publicado en la revista Applied Acoustics en 2015 presenta los principales datos y conclusiones presentados en este capítulo.

ABSTRACT

The second experimental part of the Thesis is described in this chapter. It is an acoustic monitoring of a green wall. Two acoustic tests were done, one to characterize the ability of isolation and another one to characterize the sound absorption of a constructive solution of a green wall. Moreover, the main highlights and conclusions of this chapter were presented in the paper "Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings", published in Applied Acoustics journal in 2015.

1 Introducción

Es de sobra conocido que las plantas pueden reducir los niveles de ruido de tres formas diferentes. La primera, se basa en que el sonido puede ser reflejado y difractado por los componentes de la plantas, como los troncos, ramas y hojas. El segundo mecanismo, es la absorción por parte de la vegetación, a este mecanismo se le puede atribuir las vibraciones que producen las hojas al contacto con las ondas sonoras, disipando y convirtiendo el sonido en energía. Por último, existe una tercera vía, mediante la interferencia del sonido provocado por la hojas de la plantas.

Asimismo, el sustrato presente en los módulos vegetales también tiene la capacidad de atenuar los niveles de ruido aéreo. La presencia de sustrato provoca interferencia en la transferencia directa del sonido entre la fuente y el receptor

Por lo tanto, la presencia de vegetación conlleva a una mitigación del sonido, debido principalmente a la presencia de una capa de vegetación y las raíces de estas. El resultado es la absorción del ruido aéreo.

Gracias a esta característica, las plantas tienen la capacidad de aportar un mayor confort en los interiores y exteriores de los edificios de las zonas urbanas. La eficiencia tanto en la absorción como en el aislamiento acústico depende del tipo de planta, densidad de

plantación, localización y frecuencia del sonido así como, de la solución constructiva elegida.

2 Objetivos del capítulo

El objetivo principal de este quinto capítulo es la caracterización acústica bajo condiciones controladas de laboratorio de una solución constructiva realizada con módulos vegetales. Para ello se han llevado a cabo dos ensayos realizados en el laboratorio de Acústica LCCE del Gobierno Vasco:

- Ensayo de aislamiento acústico siguiendo la norma UNE-EN ISO 10140-2:2011.
- Ensayo de absorción acústica mediante la norma UNE-EN ISO 354.

A lo largo de este sexto capítulo, se pretenden plasmar los resultados de los ensayos de aislamiento acústico y absorción acústica, de un prototipo modular de revestimiento vegetal. Mediante estos datos se pretende mejorar el conocimiento acústico de los sistemas verticales vegetales y contribuir así, a la reducción del ruido aéreo, tanto a escala urbana como a nivel de edificación.

Los resultados obtenidos podrían certificar a las fachadas vegetales como una estrategia pasiva válida en la mitigación acústica en la edificación, esta característica aumentaría su potencial de usos tanto en el exterior como en el interior de edificios.

3 Estudio del aislamiento acústico a ruido aéreo de una fachada vegetal

3.1 Construcción de la muestra ensayada

El cerramiento para la realización del estudio de aislamiento acústico se construyó en el laboratorio de control de calidad de la edificación, con unas dimensiones de 2.7 x 2.7 m. El marco perimetral, donde se aloja la muestra, está formado por una pared de arcilla cocida trasdosada. Por una de las caras se colocaron placas de yeso laminado, lo suficientemente aislantes como para garantizar la validez del ensayo, acorde a las indicaciones de la norma UNE-EN ISO 10140-2:2011.

Se dejó una abertura, de 1.205 m de ancho x 2.005 m de alto, para poder albergar la muestra en el cerramiento vertical. En los laterales de la abertura del cerramiento vertical se le colocaron de 10 barras de acero de 20 mm de diámetro dispuestos cada 20 mm en vertical, para minimizar al máximo la holgura entre las juntas horizontales de los módulos ver Fig. 6.1.



Fig. 6. 1. Detalle del levante del cerramiento utilizado en el ensayo de aislamiento acústico.

3.2 Descripción de la muestra analizada

La muestra consiste en 10 módulos de PVC rellenos de sustrato reciclado con plantas prevegetadas de *Helichrysum italicum*. descritos en el Capítulo 3. Cada uno de los módulos se ha colgado de dos barras de acero para evitar el vuelco y se han insertado hasta el extremo, tanto en la junta horizontal como en la vertical, para maximizar el aislamiento acústico. A pesar de ello, se aprecia en la Fig. 6.2. como quedan unas pequeñas aberturas en la unión de los módulos.



Fig. 6. 2. Izda. Detalle de la unión de los módulos con el marco vertical y horizontal. Dcha. Detalle de la unión entre los módulos.

El sellado perimetral entre muestra y abertura se ha realizado con cinta de doble cara entre módulos y abertura, adherida sólo a abertura y masilla de sellado Perennator TX 2001 S, en la cara de las plantas.

A continuación en la Fig. 6.3. se muestra el detalle de la colocación y ensayo de la prueba de aislamiento acústico de la fachada vegetal en la sala de transmisión horizontal.



Fig. 6. 3. Resumen fotográfico de la instalación de las muestras para el ensayo de aislamiento acústico.

3.3 Recinto de ensayo y Equipos de medida

3.3.1. Descripción de las cámaras y condiciones del ensayo

El ensayo se ha realizado en las cámaras de transmisión horizontal, compuestas por una sala emisora y otra receptora. La cámara receptora está compuesta de una doble caja de hormigón de veinte y diez centímetros de espesor cada una acústicamente desconectadas.

Las cámaras de transmisión horizontal cumplen las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 10140-5:2011.

A continuación en la tabla 6.1. se describen las condiciones de ensayo de cámara emisora y cámara receptora.

Tabla 6. 1. Condiciones de ensayo de la cámara emisora y cámara receptora

Condiciones de ensayo		
Volumen sala receptora: 55 m ³	Área de la muestra: 2.42 m ²	Temperatura cámara 11.4°C
Volumen sala emisora: 65 m ³	Masa superficial estimada 57 kg/m ²	Humedad Relativa cámara 56 %
		Presión cámara 968 mbar

En la siguiente Figura 6.4 se puede observar el croquis de las salas de transmisión horizontal, tanto de la cámara emisora como de la cámara receptora. Así mismo, se puede visualizar la disposición de los micrófonos, fuentes sonoras y muestra.

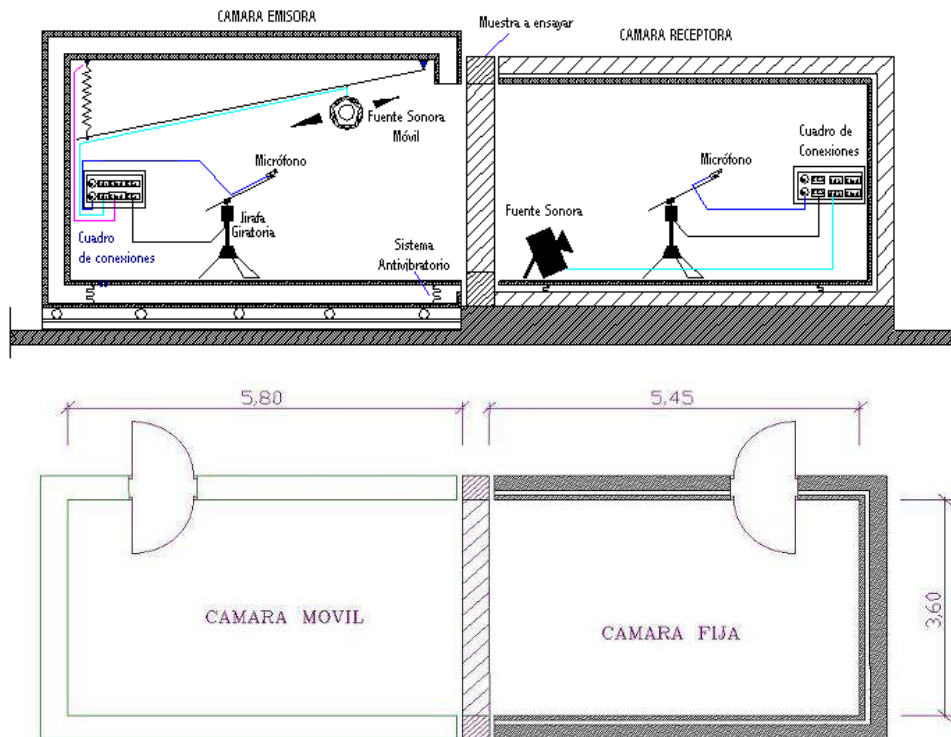




Fig. 6. 4. Arriba: Croquis de las salas de transmisión horizontal, cámara emisora y cámara receptora. Disposición de micrófonos, fuentes sonoras y muestra. Abajo. Imagen del momento de ensayo realizado de las salas de transmisión horizontal, por ambas caras.

3.3.2. Equipos de medida utilizados

En la tabla 6.2. se describen los equipos de medida utilizados en la sala horizontal, en la sala receptora y en la sala de control.

Tabla 6. 2. Equipos de medida utilizados en la sala horizontal emisora, receptora y de control

	Sala Horizontal Emisora	Sala Horizontal Receptora
Micrófonos	Brüel & Kjær 4943; N° serie 2534064	Brüel & Kjær 4943; N° serie 2534065
Preamplificadores	Brüel & Kjær 2669; N° serie 1948764	Brüel & Kjær 2669; N° serie 2025844
Fuentes sonoras	Brüel & Kjær 4296; N° serie 2071420	CERWIN VEGA; N° 012446
Jirafas giratorias	Brüel & Kjær 3923; N° serie 2036586	Brüel & Kjær 3923; N° serie 2036591

	Sala de Control	
Analizador	Brüel & Kjær 2144	N° serie 1893979
Amplificador	LAB Gruppen;LAB 300	N° serie 970-967
Ecualizador	Sony, SRP-E100	N° serie 400238
Calibrador	Brüel & Kjær 4231	N° serie 2061476
Medidor de condiciones	Ahlborn Almemo 2590-3S	N° serie H09121017

3.4 Metodología

El índice de reducción sonora (R) para cada tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz se ha calculado según la norma UNE-EN ISO 10140-2 de acuerdo con la siguiente expresión:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \cdot \text{Log } S/A \quad \text{Eq. 111}$$

donde, L_1 es el nivel de presión sonora promedio en la sala emisora [Hz]; L_2 es el nivel de presión sonora promedio en la sala receptora [Hz]. S : es el área de la muestra [m^2]. A : es la área de absorción sonora equivalente en el recinto receptor [m^2].

La medida de los niveles de presión sonora promedio L_1 y L_2 , se ha realizado emitiendo ruido blanco ecualizado (entre 100 Hz y 5 kHz) mediante una fuente omnidireccional móvil.

El campo sonoro en la sala emisora y receptora se ha muestreado mediante un micrófono girando con un radio de un metro a una velocidad de 16 s/ciclo durante 32 s.

El área de absorción sonora equivalente se ha evaluado a partir del tiempo de reverberación medido en la sala receptora utilizando la fórmula de Sabine:

$$A = 0.16 V/T \quad \text{Eq. 112}$$

donde; A : es el área de absorción sonora equivalente en el recinto receptor [m^2], T : es el tiempo de reverberación del recinto receptor [s], V : es el volumen del recinto receptor [m^3].

El tiempo de reverberación de la sala receptora se ha determinado empleando dos posiciones de fuente y tres posiciones fijas de micrófono para cada posición de fuente distribuidas a 120° en el recorrido del micrófono. En la frecuencia de 50 Hz, el tiempo de reverberación medido ha sido de $0.97 < 1$, debido a la presencia de la muestra. Finalmente, se ha medido el ruido de fondo de la sala receptora, en cada tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz.

3.4.1. Adquisición y tratamiento de datos

Se ha medido el índice de reducción sonora [R], en bandas de frecuencia de tercio de octava entre 100 y 500 Hz, Así como los índices globales y parámetros acústicos que definen el aislamiento a ruido aéreo de la muestra para la aplicación del Documento Básico “DB-HR Protección frente al ruido”, del Código Técnico de la Edificación (CTE):

- Índice global de reducción acústica ponderado A, R_A ó $R(A)$, entre 100 y 5000 Hz, expresado con una cifra decimal.
- Índice global de reducción acústica ponderado A, para ruido exterior dominante de automóviles, $R_{A,tr}$, entre 100 y 5000 Hz y expresado con una cifra decimal.
- El índice ponderado de reducción sonora R_w calculado según la norma UNE-EN ISO 717-1, a partir del índice de reducción sonora, R.

Los términos de adaptación al espectro entre 100 y 3150 Hz, C y C_{tr} , calculados según la norma UNE-EN ISO 717-1, que son los valores, en decibelios, que han de añadirse al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular, tales como ruido rosa (C) y ruido de tráfico (C_{tr}).

3.4.1.1 Uso de la fachada vegetal como pantalla anti-ruido

Para el caso en el que la solución vegetal fuese utilizada como una pantalla anti-ruido, se realiza el cálculo del índice global DL_R

El índice de evaluación del aislamiento al ruido aéreo (DL_R) se calcula según la norma UNE-EN 1793-2 de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DL_\alpha = -10 \text{ Lg} \left[\frac{\sum \alpha_{si} 10^{0,1 \cdot Li}}{\sum 10^{0,1 \cdot Li}} \right] \times \quad \text{Eq. 113}$$

donde; i : representa cada tercio de octava desde 100 Hz a 5000 Hz., L_i : es el nivel de presión sonora normalizada ponderado A, en decibelios, de ruido de tráfico rodado dentro de la i ésima banda de tercio de octava del espectro definido por la norma UNE-EN 1793-3., R_i : es el índice de aislamiento acústico en la i ésima banda de tercio de octava entre 100 Hz y 5000 Hz.

3.5 Resultado ensayo aislamiento a ruido

Los primeros resultados del ensayo de aislamiento acústico se presentan en la Fig. 6.5. Los resultados muestran una reducción sonora de $R_w = 15$ dB en la fachada vegetal modular ensayada. Los términos de corrección son de $C_{tr} = -1$ dB para el ruido del tráfico y $C = -1$ dB para el ruido rosa. En el caso de los módulos vegetales se usaran como pantalla de sonido que se clasificarían como B1.

Cabe recordar que únicamente se han ensayado los módulos vegetales con las plantas, es decir sin ningún tipo de muro ni soporte, por lo tanto cabe esperar que la colocación de los módulos sobre muros y fachadas aumente su capacidad de aislamiento acústico.

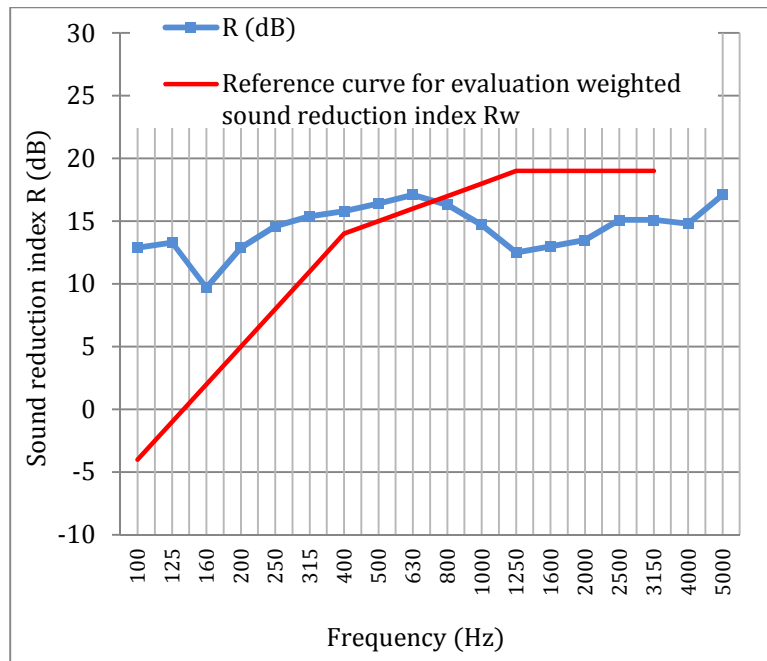


Fig. 6. 5. Curva del índice de reducción sonora (15dB) de la fachada vegetal modular ensayada
El aislamiento a ruido aéreo de diferentes elementos constructivos frecuentes en la edificación como pueden ser, cristales, puertas y ladrillos se puede comparar en la Fig. 6.6.

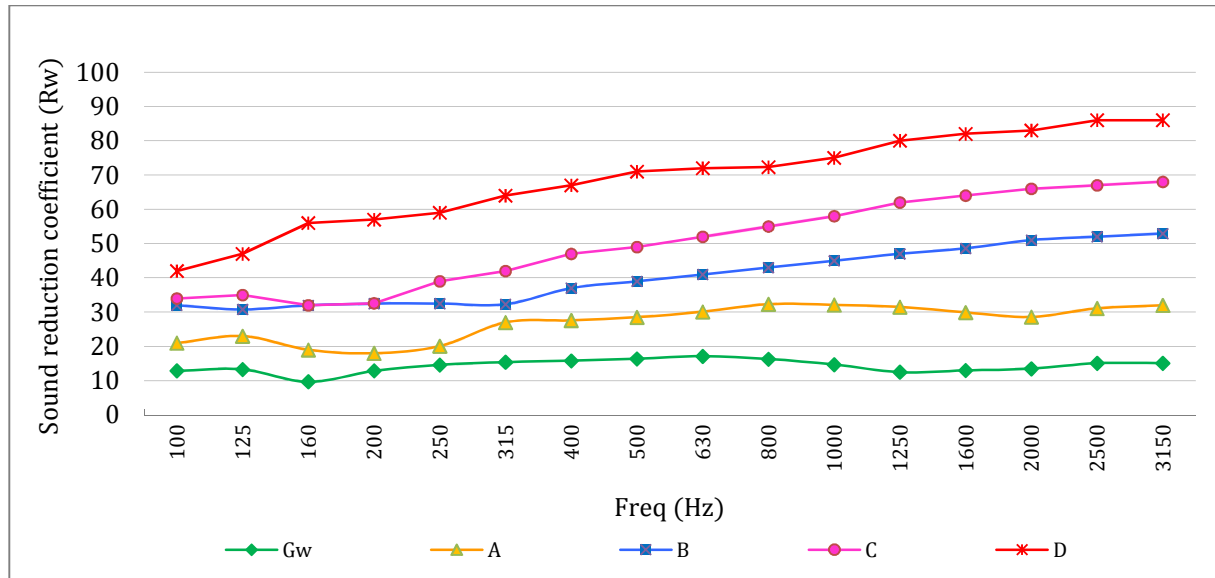


Fig. 6.6. Curva del coeficiente de reducción sonora para diferentes elementos constructivos. Gw- Green wall –Fachada vegetal ($R_w = 15$ dB).. A- Cristal térmico doble (6-12-6), sobre estructura de madera ($R_w = 30$ dB). B- Bloque de 100mm de espesor, sin revestimiento ($R_w = 44$ dB). C- Bloque ligero de 215 mm de espesor, con revestimiento de mortero por ambas superficies ($R_w=51$ dB). D- Muro de doble hoja de 12.5 mm más 19 mm de mortero sobre estructura metálica, separado por una cavidad de 250 mm con lana de roca de 100 mm ($R_w = 70$ dB).

Los datos de la Fig 6.6 revelan la poca capacidad de aislamiento acústico ofrecido por los módulos vegetales, que se expresa con el coeficiente R, frente a otras soluciones constructivas. Debe tenerse en cuenta, que los principios básicos de aislamiento acústico son la masa, sellado y aislamiento estructural. Por lo tanto, este reducido valor puede estar condicionado por la reducida masa de los módulos vegetales que es de aproximadamente 50 kg/m^2 , en comparación con la masa de ladrillo de unos 200 kg/m^2 o la masa de un bloque ligero de unos 280 kg/m^2 .

En referencia a la impermeabilidad, el hecho de que la pared vegetal este compuesta de piezas modulares provoca la existencia de las uniones y espacios entre módulos, los cuales interrumpen la continuidad entre los módulos y en consecuencia el sellado acústico, a diferencia de otras soluciones constructivas, tales como doble acristalamiento térmico o hojas dobles de placas de yeso con lana mineral. En el caso de que se realizaran unos pequeños cambios en la muestra ensayada, tales como tapar el espacio entre los módulos y entre los módulos y el perímetro del marco se conseguirían alcanzar valores de reducción sonora de $R_w = 18$. En este caso, los términos de corrección son $C_{tr} = -1$ dB para el ruido del tráfico y $C = -1$ dB para el

ruido rosa. En el caso de los módulos vegetales se usaran como pantalla de sonido que se clasificarían como B2.

Es posible realizando unas ligeras mejoras en el sistema modular, como aumentar la masa de los módulos y sellando el espacio intermodular, aumentar la eficacia del sistema, y, en consecuencia, las paredes vegetales modulares podrían ser apropiadas como aislante acústico.

4 Estudio de la absorción acústica de una fachada vegetal

4.1 Descripción de la muestra analizada

La muestra está compuesta por 42 módulos de revestimiento vegetal de polietileno reciclado rellenos de sustrato con plantas de la especie vegetal *Helichrysum italicum* descritos en detalle en el capítulo 3.

La muestra se ha montado dentro de la cámara reverberante en posición horizontal apoyada en el suelo sobre unos calces de madera (75 mm alto) bajo los 4 enganches de cada módulo. De esta forma se pretende simular, en horizontal, la misma cámara de aire que habría en obra en vertical entre el revestimiento y elemento base de fachada o pantalla.

La muestra se ha montado dentro de un marco perimetral de madera de 18 mm de espesor. El sellado entre muestra y marco y entre marco y suelo se ha realizado con cinta adhesiva.

Las dimensiones de la muestra han sido de 3.6 m de largo x 2.8 m de ancho (superficie de la muestra 10.08 m²) Fig. 6.7.



Fig. 6. 7. Resumen fotográfico de la construcción del marco y colocación de las muestras para la realización del ensayo de absorción acústica

4.2 Recinto de ensayo y Equipos de medida

4.2.1. Descripción de la cámara reverberante y Condiciones del ensayo

El ensayo se ha realizado en una cámara reverberante. Esta cámara es un paralelepípedo regular de 7 x 6 x 5m con un área total de 211.8 m².

La difusividad del campo sonoro se consigue mediante veinte difusores (entre 0.8 m² y 1 m²) suspendidos del techo de la cámara y ocho difusores de esquina (ver Fig.6.8).

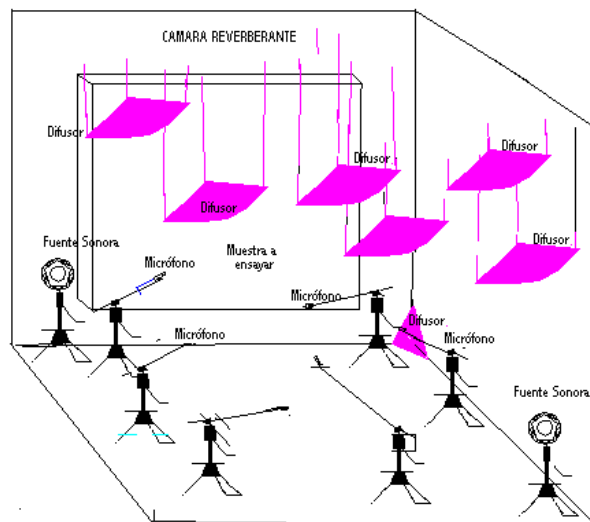


Fig. 6. 8. Croquis de la cámara reverberante, disposición de las fuentes sonoras, micrófonos y difusores.

A continuación, en la Tabla 6.3. se facilitan las condiciones de ensayo tanto en la cámara reverberante vacía y con la muestra, es decir con anterioridad a la muestra y con ella.

Tabla 6. 3. Condiciones de ensayo en la cámara reverberante antes y durante el ensayo.

Condiciones de ensayo	Sala vacía	Sala con muestra
Volumen sala reverberante: 209.6 m ³	t ₁ : 15.5 °C	t ₂ : 15.5 °C
Superficie sala reverberante: 211.8 m ²	HR ₁ : 50 %	HR ₂ : 73 %
Área de la muestra: 10.08 m ²	P ₁ : 971 mbar	P ₂ : 971 mbar

4.2.2. Equipos de medida utilizados

A continuación, en la Tabla 6.4. se describen los equipos de control utilizados en la sala de control y en la cámara de reverberación.

Tabla 6. 4. Equipos de control utilizados en la sala de control y cámara reverberante

Sala de Control	
Analizador	Brüel & Kjær 2144; N° serie 1893979
Amplificador	LAB Gruppen;LAB 300; N° serie 970-967
Ecuador	Sony, SRP-E100; N° serie 400238
Medidor de condiciones atmosféricas	Ahlborn Almemo 2590-3S; N° serie H09121017
Calibrador	Brüel & Kjær 4231; N° serie 2061476

Cámara de Reverberación	
Micrófono	B&K 4192; N° serie 1933114
Fuente Sonora	B&K 4292; N° serie 028030
Preamplificador	B&K 2669; N° serie 2025845
Fuente Sonora	B & K 4296; N° serie 2071424

4.3 Metodología

El coeficiente de absorción sonora (α_s) para cada banda de tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz se determina según la norma UNE-EN ISO 354 mediante la fórmula siguiente:

$$\alpha_s = AT/S \quad \text{Eq. 114}$$

Donde; AT es el área de absorción equivalente de la muestra [m^2], S : es el área de la muestra de ensayo [m^2].

El área de absorción equivalente de la muestra se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_T = 55.3 \cdot V \left(\frac{1}{C_2 \dots T_2} - \frac{1}{C_1 \dots T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad \text{Eq. 115}$$

donde; V : es el volumen de la cámara reverberante vacía [m^3], C_1 : es la velocidad de propagación del sonido en el aire en cámara reverberante vacía [m/s], C_2 : es la velocidad de propagación del sonido en el aire en cámara reverberante con muestra [m/s], T_1 : es el tiempo de reverberación de la cámara reverberante vacía [s], T_2 : es el tiempo de reverberación de la cámara reverberante con la muestra instalada [s], m_1, m_2 : son los coeficientes de atenuación sonora calculados según ISO 9613-1, empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante.

Las medidas de los tiempos de reverberación se han realizado emitiendo ruido rosa ecualizado a través de dos fuentes sonoras omnidireccionales y empleando seis posiciones fijas de micrófono. Para cada posición de micrófono y de fuente se ha obtenido el tiempo de reverberación como promediado de 5 curvas de caída en cada banda de tercio de octava desde 100 Hz a 5 kHz.

Las medidas del tiempo de reverberación de la cámara vacía y de la cámara con la muestra instalada se han hecho consecutivamente.

A partir del coeficiente de absorción (α_s) en bandas de frecuencia de tercio de octava, se calculan los siguientes parámetros según la norma UNE EN ISO 11654.

- Coeficiente de absorción sonora ponderado (α_{pi}) es el valor del coeficiente de absorción acústica dependiente de la frecuencia, basado en mediciones por bandas de un tercio de octava de acuerdo con la norma ISO 354 y calculado por bandas de octava según la fórmula siguiente

$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_{i1} + \alpha_{i2} + \alpha_{i3}}{3} \quad \text{Eq. 116}$$

donde; α_{pi} : es el coeficiente de absorción sonora práctico para la banda de octava i . y α_{i1} , α_{i2} , α_{i3} : son los coeficientes de absorción sonora en bandas de un tercio de octava para la octava i .

El coeficiente de absorción sonora ponderado (α_w) corresponde al valor único independiente de la frecuencia, que es igual al valor de la curva de referencia a 500 Hz después de desplazarla. Para calcularla se realiza una traslación de la curva de referencia por pasos de 0.05 hacia la curva del coeficiente de absorción sonora práctico hasta que la suma de las diferencias desfavorables sea menor o igual que 0.10. En ese momento se produce una desviación desfavorable a una frecuencia concreta cuando el valor medido es menor que el valor de la curva de referencia. Deben tenerse en cuenta solamente las desviaciones en el sentido desfavorable. La absorción acústica ponderada (α_w) se define como el valor de la curva de referencia desplazada a 500 Hz Fig. 6.9.

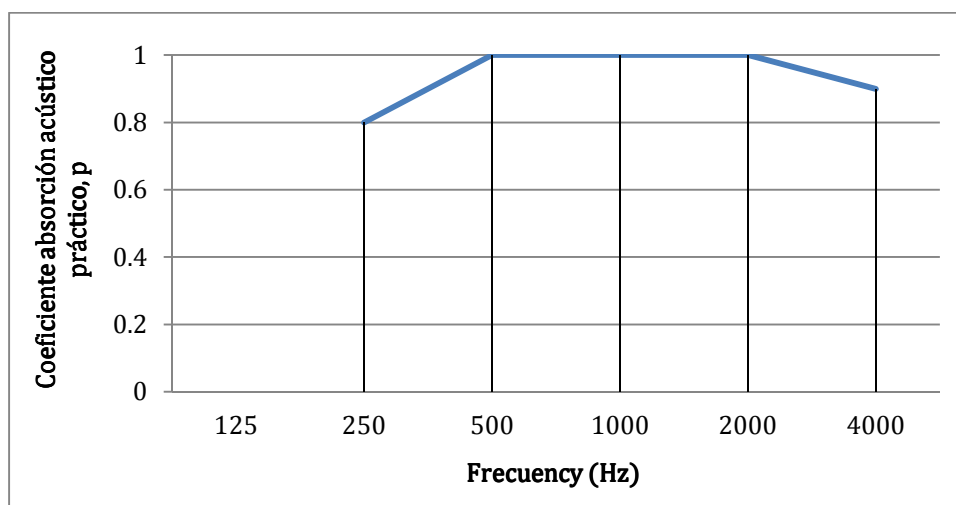


Fig. 6. 9. Curva de referencia para evaluar el coeficiente α

Indicadores de forma (L.M.H): manifiestan los coeficientes de absorción acústica prácticos que exceden los de la curva de referencia desplazada en torno a un 0.25 o más en diferentes espectros de frecuencia.

- Si el exceso de absorción se produce a 250 Hz, se utiliza la notación L.
- Si el exceso tiene lugar a 500 Hz o a 1000 Hz, se utiliza la notación M.
- Si el exceso se produce a 2000 o a 4000 Hz, se utiliza la notación H.

4.3.1. Adquisición y tratamiento de datos

En la realización de la adquisición y tratamiento de datos se han medido:

- Los tiempos de reverberación de la cámara de ensayo sin muestra (T_1) y con la muestra instalada (T_2).
- El coeficiente de absorción sonora α_s , en bandas de frecuencias de tercio de octava entre 100 y 5000 Hz, en tabla y gráfica.
- El coeficiente de absorción sonora ponderado, α_w , e indicadores de forma.

Para el caso en el que la solución vegetal fuese utilizada como parte de una pantalla anti-ruido, se presenta el cálculo del índice global DL_α

$$DL_\alpha = 2dB \quad \text{Eq. 117}$$

Es un resultado válido exclusivamente para la muestra en las condiciones de montaje descritas en el presente informe.

El índice de evaluación de la absorción acústica, DL_α , se obtiene según la norma UNE-EN 1793-1, mediante la siguiente fórmula:

$$DL_\alpha = -10 \text{ Lg} \left[\frac{\sum \alpha_{si} 10^{0,1 \cdot Li}}{\sum 10^{0,1 \cdot Li}} \right] \quad \text{Eq. 118}$$

donde; α_{si} : es el coeficiente de absorción acústica dentro de la i ésima banda de tercio de octava. Li : es el nivel de presión sonora normalizado ponderado A, en decibelios, de ruido de tráfico rodado dentro de la i ésima banda de tercio de octava del espectro definido en la norma UNE-EN 1793-3. DL_α : es el índice de evaluación de la absorción acústica calculado como la diferencia de niveles de presión sonora ponderados A [dB].

4.4 Resultados ensayo absorción a ruido

A continuación la Fig. 6.10 muestra los tiempos de reverberación con la cámara vacía y con la cámara con la muestra vegetal. Estos datos manifiestan el buen comportamiento de las fachadas modulares vegetales, tanto a frecuencias bajas como altas. Lo que demuestra el buen comportamiento de las fachadas vegetales en la absorción acústica, ya que los módulos vegetales son capaces de reducir a la mitad el tiempo de reverberación.

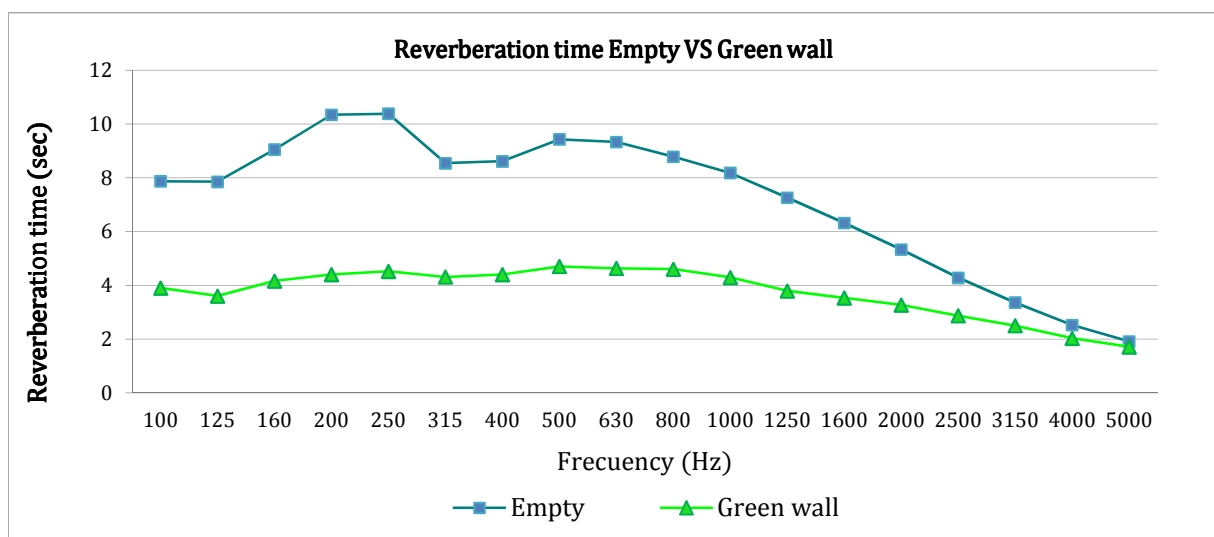


Fig. 6. 10. Curva del tiempo de reverberación con la cámara vacía y con la cámara con la muestra vegetal

A lo largo de los últimos años se han llevado a cabo otros estudios de absorción acústica en fachadas vegetales. En la Figura 6.11 se comparan los resultados del coeficiente de absorción de sonido obtenidos de la fachada vegetal modular estudiada en este trabajo en la sala de reverberación para y los resultados obtenidos por Wong *et al.* (2010) [26]. La muestra que se utilizó en el estudio de Wong *et al.* consta de dos marcos de madera con diferentes bastidores inclinados hacia el interior, donde se colocaron varias macetas de plantas para simular una fachada vegetal. Dependiendo del número de macetas colocadas en cada estante, la cobertura vegetal variaba de modo que era posible lograr el 43%, 71% o 100% de cobertura vegetal. Según este autor, el sustrato funciona bien acústicamente a bajas frecuencias mediante la absorción de la energía acústica, mientras que las plantas desempeñan mejor la absorción acústica a altas frecuencias. Sin

embargo, este hecho no se reflejó en las curvas del coeficiente de absorción de sonido (Figura. 6.11), ya que los valores estuvieron por debajo de 0.3 en la gama de frecuencias de 100 a 400 Hz.

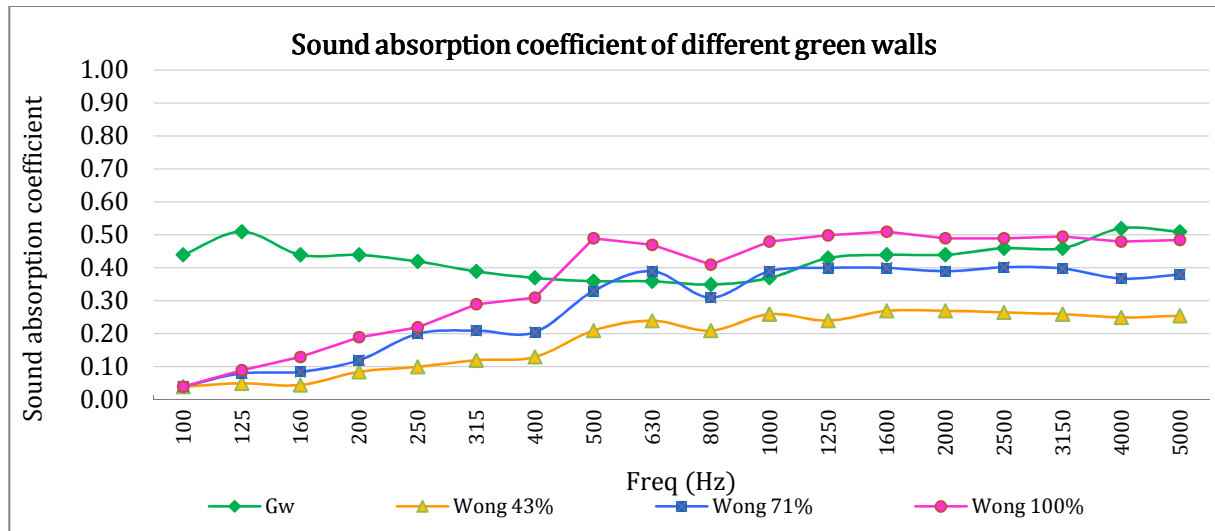


Fig. 6. 11. Coeficientes de absorción sonora de diferentes paredes vegetales

En cuanto a la fachada vegetal modular estudiada en el presente estudio, se observa como el coeficiente de absorción acústica se mantiene prácticamente constante entre 0.35 y 0.51, lo que refleja un buen funcionamiento acústico no sólo en las bajas frecuencias sino en altas frecuencias también. El análisis y comparación con otro tipo de fachadas estudiadas difiere sobre todo en la tipología de la fachada así como en la colocación de la muestra y la vegetación.

A partir de estos resultados se puede deducir que las paredes verdes proporcionan buenas capacidades de absorción de sonido, pero la magnitud de su contribución depende del diseño y los materiales que se utilizan en cada sistema.

Con los datos que se obtuvieron en este estudio y compararlos con los de estudios previos, se puede confirmar el potencial de las paredes verdes como herramientas para el aislamiento acústico de los edificios. Sin embargo, el escaso número de estudios realizados con anterioridad y las diferencias en los sistemas de construcción que se utilizaron en estos estudios no permiten obtener valores precisos de la contribución real de las paredes vegetales para la atenuación del ruido en los edificios.

La Figura 6.12 compara los valores obtenidos para el coeficiente de absorción acústica de la fachada vegetal y diferentes materiales comunes de construcción.

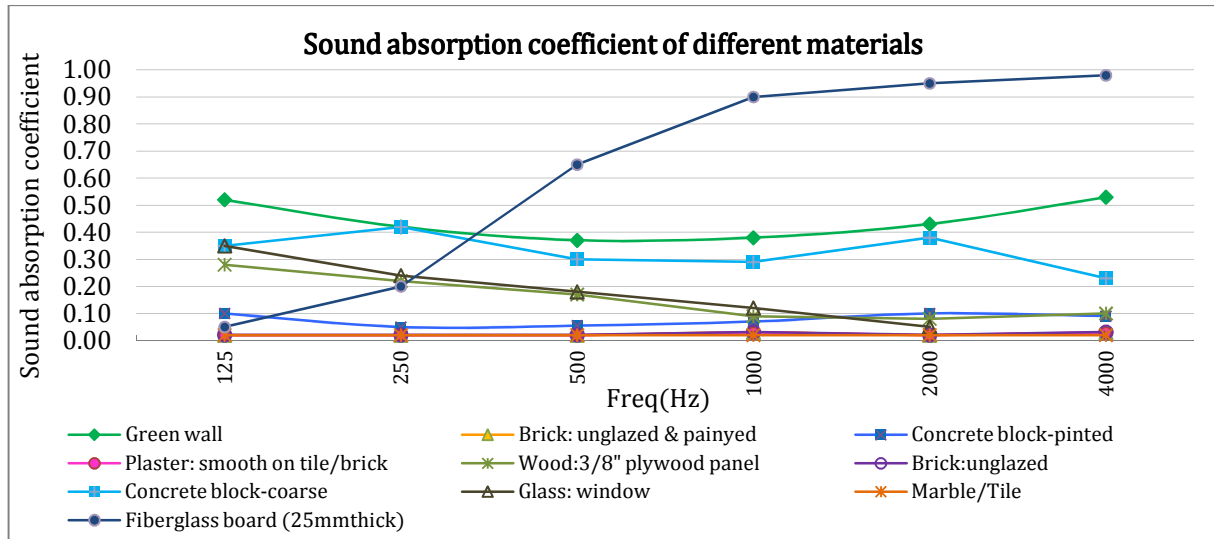


Fig. 6. 12. Coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales.

La fachada vegetal proporciona las mismas o mejores características de absorción de sonido que muchos de estos materiales a bajas frecuencias. Por otra parte, aunque la fachada vegetal no puede competir con materiales tales como la fibra de vidrio, también funciona bien a altas frecuencias.

5 Análisis de los resultados

A continuación se exponen los resultados más representativos de los ensayos acústicos realizados sobre una fachada vegetal modular como sistema de aislamiento acústico pasivo para edificios.

Las diferentes técnicas de ensayo acústico empleadas en este trabajo para el análisis de la absorción y aislamiento acústico aéreo de una fachada vegetal han revestido especial importancia para el estudio y caracterización acústica de este elemento constructivo.

El análisis del aislamiento acústico a ruido aéreo se realizó según la norma UNE-EN ISO 10140-2. Los valores obtenidos son inferiores a los valores de otras soluciones constructivas comunes, a pesar de ello estos son prometedores y se podrían mejorar

con algunas mejoras simples como aumentando la masa del sistema constructivo o sellando las juntas entre las piezas modulares. En ese caso el índice de reducción de sonido ponderado tendría el valor de $R_w = 18$ dB.

Reviste especial interés el análisis de la capacidad de absorción acústica. El valor calculado del coeficiente de absorción acústica ponderado es de $\alpha_w = 0.40$. En cuanto el coeficiente de absorción de sonido con respecto a estudios anteriores, se encontraron algunas diferencias, muy probablemente debido a las diferencias en el sistema constructivo ensayado en cada caso. Sin embargo, a pesar de estas diferencias, se puede confirmar el elevado potencial de las fachadas vegetales modulares como absorbente acústico de para edificios.

Teniendo en cuenta que la frecuencia de la voz esta alrededor de 200 Hz, esta corresponde a la frecuencia en la que la fachada vegetal modular es más eficiente en la absorción de sonidos, por lo que podría ser utilizado de manera muy eficaz en lugares públicos como restaurantes, hoteles, o incluso en zonas peatonales en el exterior de la calle.

Todos los ensayos de este estudio consideraron sólo la transmisión directa de sonido a través de la pared verde. Dado que el sonido también puede transmitirse por vías indirectas, los futuros estudios deben considerar una situación más realista con la pared vegetal colocada en una fachada de edificio.

6 Conclusiones

Las diferentes normas ISO empleadas en este trabajo para el análisis del aislamiento acústico y absorción aérea de una fachada vegetal han revestido especial importancia para el análisis acústico de este tipo de fachadas

Caracterizar el comportamiento acústico de estos elementos constructivos proporciona la descripción de parámetros acústicos importantes de las fachadas vegetales.

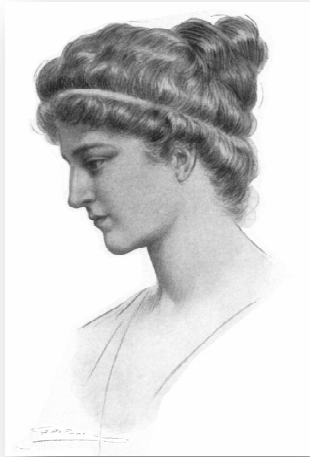
La determinación del análisis del aislamiento acústico a ruido aéreo ha tenido como resultado $R_w = 15$ dB, lo que no confiere grandes propiedades de aislamiento acústico a las fachadas vegetales.

Por otro lado, respecto al análisis de la capacidad de absorción acústica. El valor calculado del coeficiente de absorción acústica ponderado es de $\alpha_w = 0.40$, lo que confirma el elevado potencial de las fachadas vegetales modulares como elemento de absorción acústica de para edificios.

Los resultados de este capítulo abren nuevas líneas de investigación. Por un lado, la excelente capacidad de absorción acústica de las fachadas vegetales permitirá aumentar su uso. El empleo de estos elementos llevará, asimismo, a un análisis cuantitativo más minucioso de las fachadas verdes. Por otra parte, se hace necesaria la caracterización acústica de diferentes prototipos vegetales para corroborar dichos resultados.

"Defiende tu derecho a pensar..., porque incluso pensar de manera errónea es mejor que no pensar."

Hipatia de Alejandría (370-415)



CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES, CONTRIBUCIONES Y TRABAJO FUTURO

RESUMEN

Éste último capítulo recoge las principales conclusiones de esta Tesis, así como sus contribuciones y una propuesta de líneas de trabajo futuras y la forma de llevarlas a cabo.

ABSTRACT

This last chapter gathers the main conclusions of this PhD Thesis. Its contributions and a proposal of future works which are identified are also presented, as well as the means to proceed with them.

1 Conclusiones y Contribuciones

El principal objetivo de esta tesis es evaluar la eficiencia energética y la aplicabilidad de las fachadas vegetales en la rehabilitación de edificios. Por ello, el estudio energético y la generación de un modelo matemático son de máximo interés.

A continuación se describen las conclusiones finales obtenidas, analizándose las herramientas (capítulo 2) que utiliza la presente tesis, los procedimientos llevados a cabo (capítulo 3), las secuencias de muestreo (capítulo 4) y los resultados más relevantes obtenidos.

Resulta de interés describir y analizar los parámetros energéticos y térmicos (capítulo 5) y los parámetros acústicos (capítulo 6) en el estudio de rehabilitaciones.

En primer lugar, como resumen del análisis de los resultados de la investigación llevada a cabo se puede concluir que:

- La metodología PASLINK es una herramienta óptima para caracterizar los componentes de construcción no convencionales tales como la fachada ventilada o la fachada vegetal. Los resultados que se obtienen mediante esta metodología son comparables a las condiciones reales de un edificio bajo condiciones reales de ensayo de

altos estándares de calidad. Este hecho es decisivo cuando se tienen que determinar las incertidumbres de los parámetros identificados para la realización de los modelos.

- Las fachadas vegetales son un sistema constructivo válido en la rehabilitación de edificios que sirve para reducir la temperatura exterior de la envolvente gracias al aumento del coeficiente de convección y disminución del coeficiente de absorción solar efectiva de la fachada y así aumentar el confort de sus habitantes durante la época de verano.
- La temperatura a la que se encuentra la capa externa de la fachada vegetal es importante, ya que esta es la temperatura afectada por el sol y el proceso de evapotranspiración de las plantas y es la que definirá las demandas de calefacción y refrigeración.
- El efecto del sistema de fertirriego utilizado en sistemas modulares de fachada vegetal parece ser fundamental en caso de querer reducir las demandas de refrigeración durante el verano. Las bajas temperaturas que se registran en la superficie exterior de la fachada vegetal, debidas a la humedad del sustrato, permiten que haya un flujo de energía saliente durante el día y que este flujo sea superior al flujo de calor entrante. Por el contrario, en la fachada ventilada cerámica el flujo de calor entrante durante las horas diurnas es superior al calor evacuado por la corriente de aire generada con el efecto chimenea.
- Durante la época de verano (periodos cálidos) a medida que la radiación y las temperaturas exteriores aumentan (35-40 °C) la temperatura de la vegetación aumenta hasta valores máximos de 30 °C donde se mantiene constante. Este hecho incrementa el efecto de reducción de las temperaturas en la fachada con vegetación, lo que demuestra el efecto positivo de las fachadas vegetales como dispositivos pasivos de reducción de temperatura.
- Durante la época de invierno (períodos fríos) las fachadas vegetales no son eficaces para reducir la demanda de calefacción. En el caso de que una envolvente quiera ser renovada o diseñada para un nuevo edificio a fin de minimizar las pérdidas de calor sería recomendable añadir una capa de aislamiento (5 cm de lana de roca) sobre el muro base previa al sistema vegetal.

- La mejora energética que se consigue mediante las fachadas vegetales está ligada a la evapotranspiración ya que en la cámara de aire entre la fachada vegetal y el muro base no se produce gradiente de temperaturas ($\Delta T 2 \text{ }^\circ\text{C}$) por lo que no hay efecto chimenea.
- En el caso de la fachada ventilada, la capa exterior de placas cerámicas, alcanza temperaturas máximas superiores a la temperatura máxima ambiental debido a la radiación solar incidente. También cabe señalar que las placas cerámicas no tienen inercia térmica como se observa en la evolución de su temperatura de forma paralela a la temperatura ambiente.
- Las medidas de temperatura en la cámara de aire de la fachada ventilada, muestra el gradiente vertical ($\Delta T 7 \text{ }^\circ\text{C}$) lo que produce un calentamiento del aire de la cámara que disminuye su densidad y provoca mediante convección su ascenso. Este fenómeno de efecto chimenea provoca el enfriamiento de la fachada ya que evita la acumulación de calor debido a la circulación del aire. Mediante este mecanismo de refrigeración, mediante la renovación del aire en la cámara, origina pérdida de calor de la cámara de aire y de la hoja interior. Esto supone un ahorro energético en épocas cálidas.
- En invierno la radiación solar no es suficiente para conseguir el movimiento de aire. En este caso la fachada ventilada es ayudada por la capa del aislante térmico (5 cm de lana de roca) el cual evita la pérdida de calor interno y proporciona protección adicional.
- Al igual que las fachadas vegetales la utilización de fachadas ventiladas reducen el coeficiente de absorción solar efectiva del muro lo que provoca la reducción de la temperatura de la capa exterior del muro.

En segundo lugar, como validación de los modelos numéricos llevados a cabo para obtener los patrones de comportamiento de una fachada ventilada como de una fachada vegetal, tanto de forma cualitativa como cuantitativa, a través de datos experimentales y termografía se puede concluir que:

- El desarrollo, la calibración y validación de los dos tipos de modelos (un modelo de caja gris RC mediante el programa LORD y mediante el programa CTSM) de las dos fachadas de estudio (f. ventilada y f. vegetal) junto al muro base sobre el que se ha

desarrollado la rehabilitación energética se han presentado a lo largo de esta tesis. Estos modelos han servido para describir térmicamente la fachada ventilada y la fachada vegetal. Los modelos pueden ser utilizados en el futuro para simular diferentes elementos y/o como modelos de referencia para compararlos con diferentes tipos de envolventes, por lo que pueden ser utilizados en el futuro para obtener la demanda de energía anual, para diferentes niveles de renovación energética en diferentes zonas climáticas.

- En la comparación con el modelo numérico, cabe señalar que el modelo de LORD se ha mostrado útil para evaluar el comportamiento térmico de la envolvente, mientras que el modelo CTSM presenta una mayor flexibilidad y rapidez especialmente cuando se evalúan diferentes sistemas constructivos. El resultado del modelo CTSM ofrece una evaluación potente, ya que, en relativamente poco tiempo, es posible obtener claras conclusiones para la toma de decisiones definitivas de rehabilitación envolventes.
- Gracias a este modelo es posible estimar el comportamiento térmico de una fachada vegetal y compararla con una fachada ventilada o una fachada convencional.
- Se consigue un aumento de la capacidad aislante del 68 % y capacidad refrigerativa del 42 % con la implementación de una fachada ventilada cerámica (sobre un muro de hoja doble. En el caso de la fachada vegetal la capacidad aislante aumenta en un 41 % y la capacidad refrigerativa en un 85 % respecto al muro base.
- Se puede determinar que las fachadas vegetales pueden incrementar ligeramente las demandas de calefacción en épocas frías mientras que en épocas cálidas, disminuyen significativamente las demandas de energía para refrigeración.
- El pequeño gradiente de temperaturas entre la temperatura de la cámara de aire y la temperatura exterior hace difícil su identificación por lo que se tomó el valor de T_c en los modelos matemáticos de fachada ventilada y fachada vegetal.
- La secuencia de imágenes termográficas tomadas proporciona información cuantitativa importante acerca de los mecanismos de termorregulación de las fachadas vegetales, confirmando el efecto termorregulador que las plantas tiene sobre las fachadas.

En tercer lugar, concluir con la síntesis de los resultados obtenidos en la caracterización acústica de una fachada vegetal, tanto su análisis de absorción como de aislamiento acústico bajo condiciones controladas de laboratorio:

- Es necesario subrayar que la caracterización se ha llevado a cabo únicamente sobre los módulos vegetales con las plantas, es decir sin ningún tipo de muro ni soporte, por lo tanto cabe esperar que la colocación de los módulos sobre muros y fachadas aumente su capacidad tanto de aislamiento como de absorción acústica.
- Por otro lado, la complejidad del ruido aéreo dificulta en gran manera la comparativa con otro tipo de soluciones vegetales, ya que los resultados de absorción y aislamiento acústico dependen en gran medida de la masa, sellado y tipo de estructura porosa o membrana de la envolvente a caracterizar.
- Las fachada vegetal modular ensayada no otorga grandes propiedades de aislamiento acústico ($R_w = 15$ dB) pero por el contrario, presenta una excelente capacidad de absorción acústica ($\alpha_w = 0.4$) tanto a bajas como a altas frecuencias, lo que otorga a las fachadas vegetales importantes propiedades acústicas lo puede permitir el aumento de su uso de estos elementos constructivos.

Como conclusión, se debe destacar que hay pocos estudios como el presente, que hayan sido llevados a cabo con experimentos bajo condiciones reales de ensayo y con series de datos temporales que abarquen períodos de tiempo tan amplios, y que por tanto favorezcan la identificación de los parámetros en condiciones variables. Todo ello, posibilita que pueda llegarse hasta los límites de los métodos y se presenten y superen las dificultades que conlleva estudiar la validez de los mismos respecto de la significancia estadística de los resultados.

2 Líneas futuras de trabajo

2.1. Integración del comportamiento térmico de fachada vegetal a todo el edificio

Los dos modelos térmicos desarrollados para las diferentes soluciones constructivas estudiadas a lo largo de la tesis (fachada ventilada y fachada vegetal) deben integrarse en un modelo de edificio general. De esta forma se podrían obtener las demandas reales tanto de calefacción como de refrigeración del edificio. Para el estudio de las demandas de calefacción y de refrigeración se deberían tomar en consideración, las pérdidas de calor debido a la transferencia de calor, pérdidas por ventilación o renovación del aire y las ganancias de calor internas del edificio. Todo ello conducirían a un diseño óptimo del sistema de climatización (Heating, Ventilating and Air Conditioning - HVAC) del edificio.

Es importante el estudio de la rehabilitación de la envolvente térmica, pero también lo es el estudio de costes para la rehabilitación y/o sustitución de estos. Los usuarios son cada día más exigentes con las condiciones térmicas de sus viviendas, por lo que si las envolventes no tienen unos rendimientos adecuados su consumo energético será mayor, por lo que pensar en los costes asociados a su rehabilitación energética o a su sustitución son líneas claras para futuros desarrollos.

Partiendo del modelo desarrollado se podría considerar realizar diferentes simulaciones para diferentes condiciones climáticas y épocas del año, para que pudiera servir en un contexto global. De esta forma, se podría conocer el comportamiento de una fachada vegetal o ventilada, según las diferentes topologías climatológicas consideradas. De esa forma se podría verificar el modelo en lugares con condiciones climáticas diferentes a las estudiadas.

De la misma manera, se podría llevar a cabo un estudio experimental de diferentes configuraciones de fachada, tales como módulos o placas de distinto material o vegetación o sustituirlas por material geotextil para aportar diferentes opciones al uso de este sistema de fachada vegetal en edificios.

Por todo ello, estudiar el efecto conjunto que pueden tener la utilización simultánea de cubiertas y fachadas vegetadas, es decir el uso e implantación masiva de vegetación en

las grandes ciudades, podría resolver una serie de problemas como el efecto invernadero o la isla de calor urbano. Por esta razón es importante tener el mayor conocimiento posible, acerca de las cualidades y requerimientos de la vegetación, lo que hace necesario un enfoque y visión común para una colaboración estrecha entre el proyectista de espacios exteriores y los especialistas en vegetación.

2.2. Estudio económico de una fachada vegetal

Verificar si el coste adicional de la instalación de una fachada vegetal se justifica con el ahorro energético que produce en la reducción de la demanda de refrigeración. El éxito de cualquier sistema pasa por la rentabilidad económica del mismo. Por esta razón, es necesario calcular el coste de implementación de un sistema de fachada vegetal teniendo en cuenta, además del coste inicial, el relativo a su conservación, reposición y consumo de agua. De este modo, se comprobaría si la inversión se justifica con los beneficios que el sistema proporciona, pudiendo calcular, en su caso, el tiempo de retorno de la inversión

ANEXOS

Anexo 1. Sistemas verticales vegetales

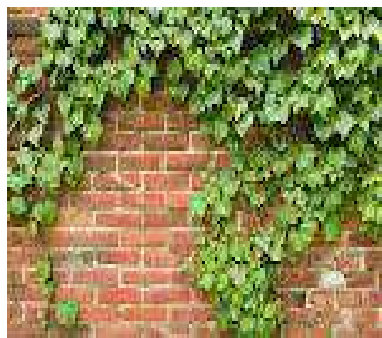
Actualmente existe una gran diversidad de sistemas verticales vegetales de edificios. Entre todos ellos, cabe diferenciar dos grupos principales: las paredes o fachadas vivas que emplean paneles modulares o geotextiles anclados al muro de fachada como soporte para todo tipo de plantas y arbustos de porte pequeño y el resto de fachadas vegetadas que utilizan algún sistema de malla, cableado o enrejado como soporte para plantas trepadoras principalmente. Por otro lado, se encuentran los muros de contención y las pantallas antirruído.

1.1. Fachadas vegetales

1.1.1. Fachadas vegetales tradicionales

FACHADAS TRADICIONALES

Las fachadas vegetales tradicionales son sistemas de fachada en las que plantas ya sean enredaderas o arbustos de porte colgante se desarrollan de forma dirigida, utilizando el propio muro de la vivienda. Las plantas se suelen colocar directamente en el suelo y se van desarrollando hasta tapizar completamente el muro o fachada.



1.1.2. Fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal

FACHADAS DE DOBLE PIEL

Las fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal son sistemas de vegetación vertical que tienen como objetivo crear una doble piel o cortina vegetal separada de la pared de la fachada. De esta forma, se pretende conseguir un aislante térmico natural en los edificios, captación de la radiación solar a través de la masa foliar de la vegetación, mediante la sombra generada por el material vegetal y refrigeración del entorno de la planta, es decir, sobre la pared del edificio, mediante el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración de las plantas.

La separación con la pared de fachada del edificio se puede realizar utilizando diferentes sistemas de apoyo como entramados metálicos, paneles rígidos, sistemas de cable o mallas

1.1.2.i. *Enrejados modulares*

Se trata de enrejados metálicos ligeros montados directamente sobre el muro de la fachada o también pueden ser estructuras metálicas independientes del muro vertical, estas sirven de apoyo al material vegetal.

Este tipo de sistema tiene la característica de ofrecer múltiples puntos de anclaje para el adecuado crecimiento de las plantas así como, proteger la integridad del muro o fachada, ya que la planta no se encuentra en contacto directo con esta.

1.1.2.i.1. Gro wall FAÇADE

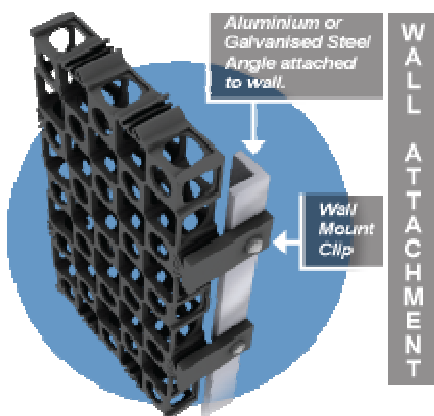
ATLANTIS

Enrejado modular

www.gro-wall.com.au

Sydney, Australia: 3/19-21 Gibbes Street, Chatswood, NSW 2067, Australia

El sistema Gro Wall Façade consiste en una estructura de plástico 100% reciclado y resistente al UV, instalado sobre bastidores de aluminio o acero inoxidable. Sobre la estructura de plástico se desarrollará el material vegetal. Este tipo de sistema se puede instalar tanto en el exterior como en el interior de los edificios



1.1.2.i.2. GreenScreen System

GREEN SCREEN

Enrejado modular

www.greenscreen.com

1743 S. La Cienega Blvd. Los Angeles, CA 90035, USA

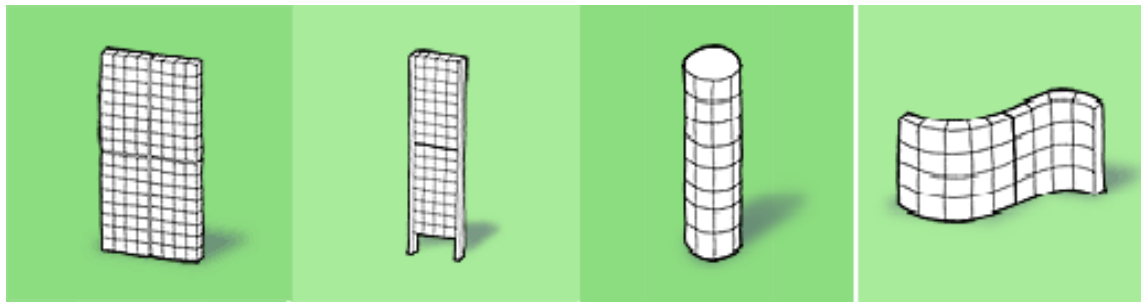
Se trata de un sistema de enrejado tridimensional de alambre de acero galvanizado soldado. Se emplea configurando diferentes tipos de módulos tanto rectangulares, planos, ondulados o bien configurando diversas, formas diseñadas a medida.

Estos sistemas se anclan directamente sobre la pared de la fachada, a las columnas o a los enrejados. Las plantas pueden ir plantadas directamente en la tierra, en la base del enrejado, o bien en jardineras rectangulares, preparadas para instalar el sistema de riego correspondiente.



Stanford Mall. Palo Alto

The Marketplace Oviedo



1.1.2.i.3. G-Sky Basic Wall Container System

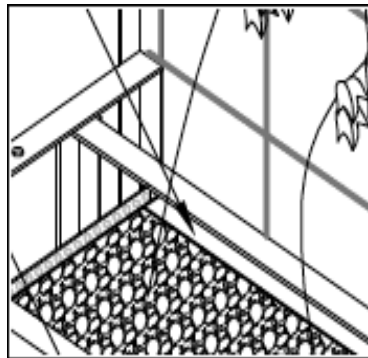
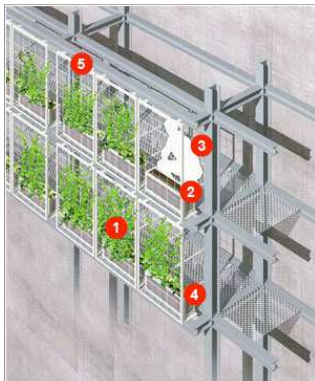
G-SKY

Enrejado modular

www.greenrooftops.com

669 Ridley Place, Unit 208- Delta, BC (Annacis Island)- V3M 6Y9-USA

Es un sistema modular constituido por un enrejado de perfiles y chapa acero inoxidable de pequeñas dimensiones integrado a jardineras rectangulares de 75 x 128 mm o realizadas a medida sobre el tamaño necesario. Los módulos se anclan a una estructura de perfiles de acero o madera que soporta tanto los módulos como la reja del pasillo interior que permite el acceso a las jardineras, para su mantenimiento. La estructura se fija directamente a la pared de la fachada mediante un enrejado de acero inoxidable que respeta la fachada del edificio. El sistema está preparado para el riego automático de las jardineras por medio de goteros.



1.1.2.ii. Cableados:

Mediante un sistema de cables de acero, anclajes, separadores y otros elementos se constituye una ligera estructura que sirve de apoyo a plantas. Este sistema de cables se emplea en fachadas vegetales que requieren soportar plantas trepadoras de follaje denso y de crecimiento rápido.

1.1.2.ii.1. Jakob inox line

<p>JAKOB</p>	<p>Cableado</p> <p>www.jakob.ch</p> <p><i>Drahtseilfabrik, CH-3555 Trubschachen Switzerland</i></p>
<p>Sistema de cables de acero inoxidable, junto con todas sus piezas accesorias, tensores, separadores, abrazaderas, grapas, etc. para poder vegetar cualquier superficie del edificio. Dado que las plantas trepadoras utilizan varias estrategias para trepar esta empresa ha diseñado diferentes sistemas, que permiten adaptarse a la forma de crecimiento de las especies</p>	
	
	
<p>Detalle de los diferentes elementos y ejemplos del sistema Jacob inox line</p>	

1.1.2.ii.2. Façade Scape i-SYS Stainless Cables and Rods

CARL STAHL DÉCOR CABLE, INC

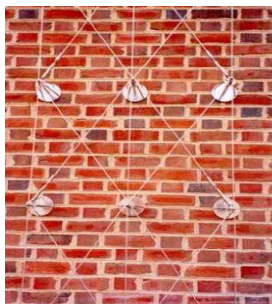
Cableado

www.decorcable.com

660 W Randolph St Chicago, IL 60661-2114, USA

Es un sistema de cables y varillas de acero inoxidable, junto con sus piezas accesorias, permite vegetar las fachadas de edificios mediante plantas trepadoras.

La empresa dispone de diferentes soluciones en función del peso que tendrá que soportar la estructura, también diferencia dos disposiciones, en forma ortogonal, o forma de rombo, dependiendo del tipo de crecimiento de la planta. Por otro lado, se diferencian los tipos de anclajes en función del material de fachada, para garantizar la estabilidad y durabilidad del sistema.



Elementos del sistema Project Independence Visitor Center. City Philadelphia State PA

1.1.2.iii. Mallas:

Es una estructura de malla de acero muy ligera que sirve de apoyo al crecimiento de las planta, estas se sujetan a las fachadas o la estructura de las construcciones. Este tipo de solución se emplea para plantas de crecimiento lento. Es un sistema muy flexible que aporta un elevado número de aplicaciones de diseño.

1.1.2.iii.1. Tend Stainless Steel Flexible Mesh Fabric

CARL STAHL DÉCOR CABLE, INC

Mallas

www.decorable.com

660 W Randolph St Chicago, IL 60661-2114, USA

Es una malla flexible de acero inoxidable, de poco peso, con diferentes tipos de trenzado y medidas de rombo, lo que le posibilita adaptarla al tipo de planta empleada. Este tipo de sistema permite cubrir grandes superficies de forma rápida y fácil.



Detalle de la malla de Décor Cable Flexible Mesh

Project Academy for Philosophy/Theology, Sankt Georgen. GERMANY

1.1.2.iii.2. Malla verde

BROEKWEG

Enrejado modular

www.mobilane.nl

3 3956 NE Leersum The Netherlands

La Valla Verde es una pantalla viva que consiste en una malla metálica de 5 mm de soldadura de acero galvanizado cubierta de plantas cultivadas en una maceta de madera biodegradable. La malla se entrega completamente vegetada. Existen diferentes tipos y medidas de macetas, la estándar corresponde a las siguientes medidas 1440x400x 400 mm de espesor y 1000 mm de altura, aunque existe la posibilidad de adecuarlo a las necesidades específicas de cada muro o fachada. Las macetas se. El sustrato está formado por coco biodegradable. La empresa posee un catalogo con las diferentes plantas trepadoras disponibles, todas ellas se entregan completamente vegetadas.



1.1.2.iii.3. Malla x-tend

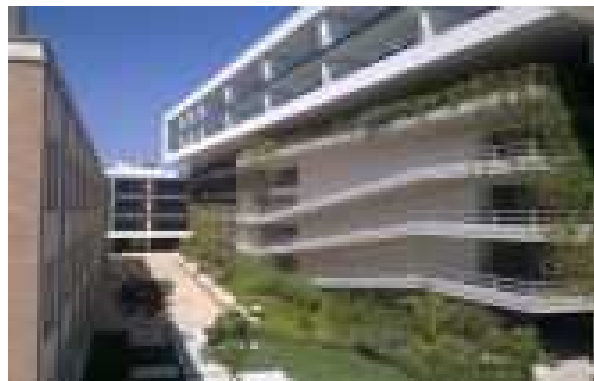
Arc316 MALLAS Y CABLES, S.A

Mallas

www.arc316.es

Avda. Maresme, 70 bis, nave 6 08940 ,Cornellà del Llobregat ,Barcelona

La Malla X-TEND es una malla de cables de acero inoxidable con casquillos prensados que se combina con cables y accesorios como soporte de plantas trepadoras. La geometría de la malla es un rombo que alcanza el estado de tensión óptima cuando su obertura es de 60º formando un triángulo equilátero. Dispone de varios formatos de malla y espesores cable dependiendo de la especie trepadora.



1.1.2.iv. *SISTEMA BIO WALL*

LOOP PH

Mallas

www.loop.ph

Unit 2, 231 Stoke Newington Church Street, London

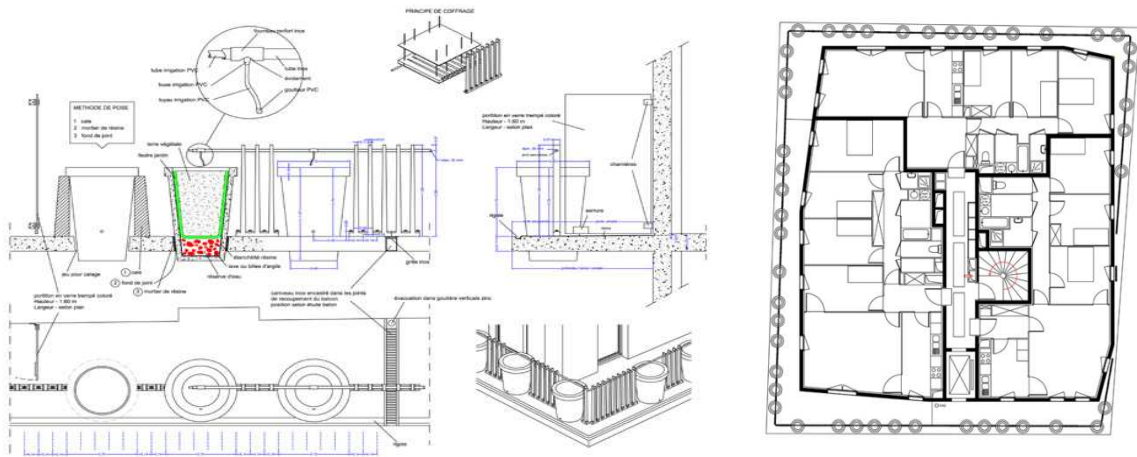
Sistema rígido con estructura tridimensional (3D) desarrollado en material ligero que sirve como estructura para el crecimiento y desarrollo de plantas trepadoras tanto en el exterior como en el interior de los edificios



1.1.3. Fachada vegetal perimetral

Es uno de los sistemas más sencillos, ya que las macetas, jardineras o contenedores se pueden colocar en el suelo, se pueden mover de un lugar a otro, o construir in situ formando parte de la fachada del edificio, y no es necesario elaborar sofisticados sistemas de riego

Fachada Perimetral



The flower Tower (Paris) -Edouard François- 1999-2004

1.2. Pared viva-Living wall

Las Paredes vivas forman muros verdes que son jardines verticales que se siembran en cualquier tipo de pared. Este sistema es un novedoso sistema vertical de cultivo hidropónico urbano. Se denominan “muros vegetales” “muros verticales” o “biomuros” en el que las plantas no necesitan tierra, únicamente un soporte, minerales, luz, y dióxido de carbono.

Los paredes vivas se pueden instalar tanto en espacios interiores, como en espacios exteriores. Estas actúan como barreras contra el sol y ruido, mientras que funcionan como filtros vivos de sustancias tóxicas del ambiente. Su uso se ha incrementado sobre todo en zonas donde el espacio horizontal es escaso y el vertical es abundante.

1.2.1. Muros vegetales modulares

Los sistemas vegetales modulares están constituidos por módulos de diferentes materiales tanto metálicos, de polietileno, de chapa, de plástico, etc. que sirven al material vegetal como soporte. Los módulos se fijan a la fachada mediante estructuras metálicas. Normalmente, estos módulos se encuentran prevegetados y se pueden colocar tanto en el interior como en el exterior de los edificios. Debido a la gran diversidad y densidad de plantas que puede albergar este tipo de sistemas, suelen requerir un mantenimiento más intenso y costoso que las fachadas vegetales

1.2.1.i. *Muro Vegetal Buresinnova*

BURESINOVA		Modular	www.buresinnova.com
<i>Andorra, 31 2ª planta- 08830 Sant Boi de Llobregat - Barcelona - Spain</i>			
<p>Este sistema consiste en módulos independientes de polietileno reciclado resistentes a la radiación UV. Son módulos estancos por lo que no es necesario impermeabilizar la pared. Cada unidad tiene ganchos de polietileno con los que se ajustan a la estructura del soporte esta, consiste en tubos de acero inoxidable sobre los que se cuelgan los módulos ajustando los ganchos de modo que no pueden extraerse perpendicularmente a la pared, para impedir sustracciones. Cada módulo tiene incorporado el sistema de riego y drenaje, con lo que se consigue que cada modulo se pueda regar de forma independiente ajustándose a las necesidades hídricas de las plantas que lo componen</p>			
			
Detalle del modulo vegetal Buresinnova		Can Felipa -2010	
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:			
Capa 0: Estructura soporte, tubos de acero inoxidable			
Capa 1: Módulos estancos independientes de polietileno reciclado			
Capa 2: Sistema de riego y drenaje independiente por modulo			
Capa 3: Vegetación prevegetada			
PESO DEL SISTEMA:	25 - 83,33 kg /m ² (seco-saturado)		
MEDIDAS DEL SISTEMA:	600 x 400 mm y 80 mm de espesor		
CAPACIDAD DEL SISTEMA	100 plantas/ m2		
SUSTRATO.	a base de fibra de coco y compost vegetal procedente de reciclaje		
SISTEMA DE RIEGO:	Los módulos, herméticamente cerrados, tienen en su parte superior entradas de gotero autocompensantes y en su parte inferior salidas de drenaje. Cada unidad puede fertirrigarse individualmente y tienen una salida general de drenaje, mediante la cual se puede hacer recircular.		

1.2.1.ii. *Wall mounted systems*

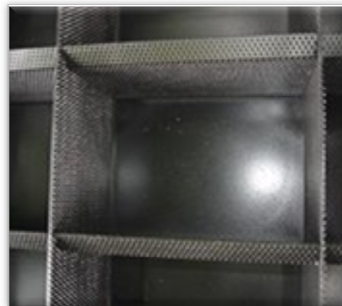
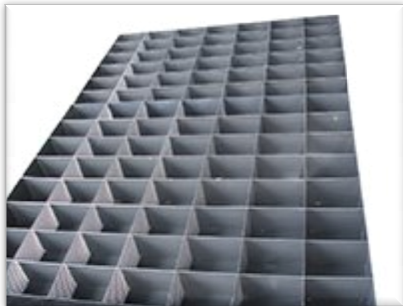
GREEN Living Technologies LLC

Modular

www.agreenroof.com

191 Imperial Circle-Rochester -New York 14617

Está formado por paneles modulares de varios tamaños en aluminio o acero inoxidable. El módulo estándar es de 610×610mm ×76mm de espesor que se complementa con módulos de otros tamaños, lo que proporciona una gran flexibilidad. Se adapta a las plantas con raíces más profundas. Este diseño patentado permite el flujo libre de agua desde la parte superior a la inferior mediante el drenaje de sus celdas, que después es recuperado en la parte inferior. Esto permite una recirculación del agua del riego



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: soporte a la pared

Capa 1: módulos metálicos, aluminio o acero inoxidable

Capa 2: el sustrato se compacta en las celdas de los módulos

Capa 3: especies vegetales prevegetadas

MEDIDAS DEL SISTEMA:

módulo estándar: 610 x 610 x 76mm

otros tamaños piezas de esquina:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

100 plantas/ m²

SUSTRATO.

Se compacta en las celdas de los paneles y las especies vegetales se plantan mientras el panel permanece en posición horizontal.

SISTEMA DE RIEGO:

Por goteo entre los paneles, el agua drena a través de toda la fachada y se recoge en la parte inferior.

1.2.1.iii. Sistema Green Wall panels

G-SKY

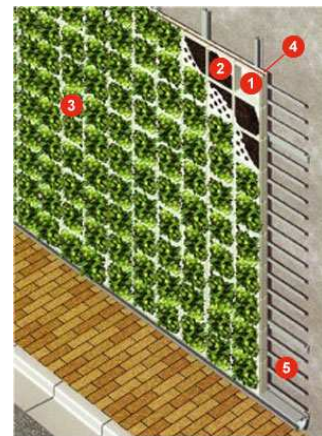
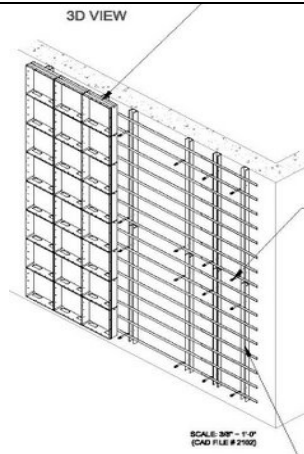
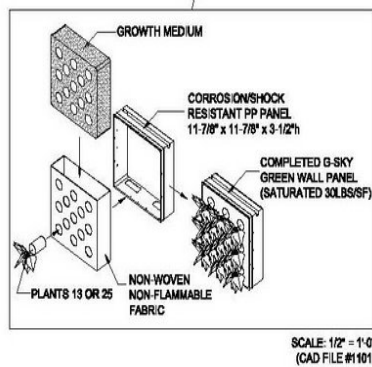
Modular

www.greenrooftos.com

669 Ridley Place, Unit 208- Delta, BC (Annacis Island)- V3M 6Y9-USA

Es un sistema flexible y modular que consiste en una estructura ligera de acero inoxidable, anclada a la pared (de obra o de hormigón), encima de la cual se cuelgan los paneles G-SKY, compuesto por módulos de carcasa cuadrada de 280 x 280 mm y 76 mm de espesor de acero inoxidable en la que se encaja una funda de tejido no inflamable con unos orificios circulares en una de sus caras, en el interior de la cual se deposita el sustrato y las plantas.

G-SKY GREEN WALL PANEL ASSEMBLY



Detalle del modulo y forma de anclaje de los paneles G-SKY





Ejemplos de Green Wall Panels

Worth-avenue-palm-beach-2010

COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: Anclaje a la pared realizado con una estructura ligera de acero inoxidable.

Capa 1: Paneles modulares de acero inoxidable de carcasa cuadrada de 280 x 280 mm y 76 mm de espesor, en la que se encaja funda de tejido no inflamable con unos orificios circulares

Capa 2: Sustrato de crecimiento

Capa 3: Material vegetal prevegetado que crece horizontalmente a través de los orificios

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

280 x 280 mm y 76 mm de espesor

CAPACIDAD DEL SISTEMA


13 plantas/modulo

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

por goteo que se sitúa entre los paneles, el agua drena a través de toda la fachada y se recoge en la parte inferior

1.2.1.iv. G-Sky Versa Wall System

G-SKY	Modular	www.greenrooftos.com
<i>669 Ridley Place, Unit 208- Delta, BC (Annacis Island)- V3M 6Y9-USA</i>		
<p>El sistema de anclaje de polipropileno permite sostener las macetas de 10-11,50 cm de diámetro directamente en la pared vertical. El riego y su recirculación se realizan por la parte trasera del sistema. Este sistema es adecuado para zonas de difícil acceso o sin espacio para la bandeja de riego. Es un sistema de muro vertical interior de gran eficiencia hídrica y totalmente autónomo</p>		
		
Detalle de anclajes de la estructura del sistema G-SKI versa	Hyunday Capital –Texas-2011	
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
Capa 0: Capa impermeable a lo largo de la pared trasera		
Capa 1 Bandejas recicladas de polipropileno		
Capa 2 material vegetal con su maceta		
Capa 3 Sistema de riego		
Capa 4 recirculación del agua de riego		
PESO DEL SISTEMA:		
MEDIDAS DEL SISTEMA:		
CAPACIDAD DEL SISTEMA		
SUSTRATO.		
SISTEMA DE RIEGO:	por goteo que se sitúa entre los paneles	

1.2.1.v. *Sistema Plantwall*

GREEN FORTUNE

Modular

www.greenfortune.com

ApSV74, Vesterbrogade 74, 03DK-1620 Copenhagen

Este sistema modular consiste en un panel de 305 x 305 mm de polipropileno montado sobre soportes de acero. El material vegetal tiene incorporado el sustrato vegetal apropiado y viene prevegetado con 13 plantas por panel. Se puede cubrir una superficie creando un patrón con paneles con distintas especies.



Caroli Center Malmo-Sweden



Instituto Karolinska Solna-Sweden



KU 64-BERLIN

COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 film hidrófugo sobre la pared

Capa 1 sistema de anclaje a la pared

Capa 2 sistema modular

Capa 3 material vegetal prevegetado

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

305 x 305 mm

CAPACIDAD DEL SISTEMA

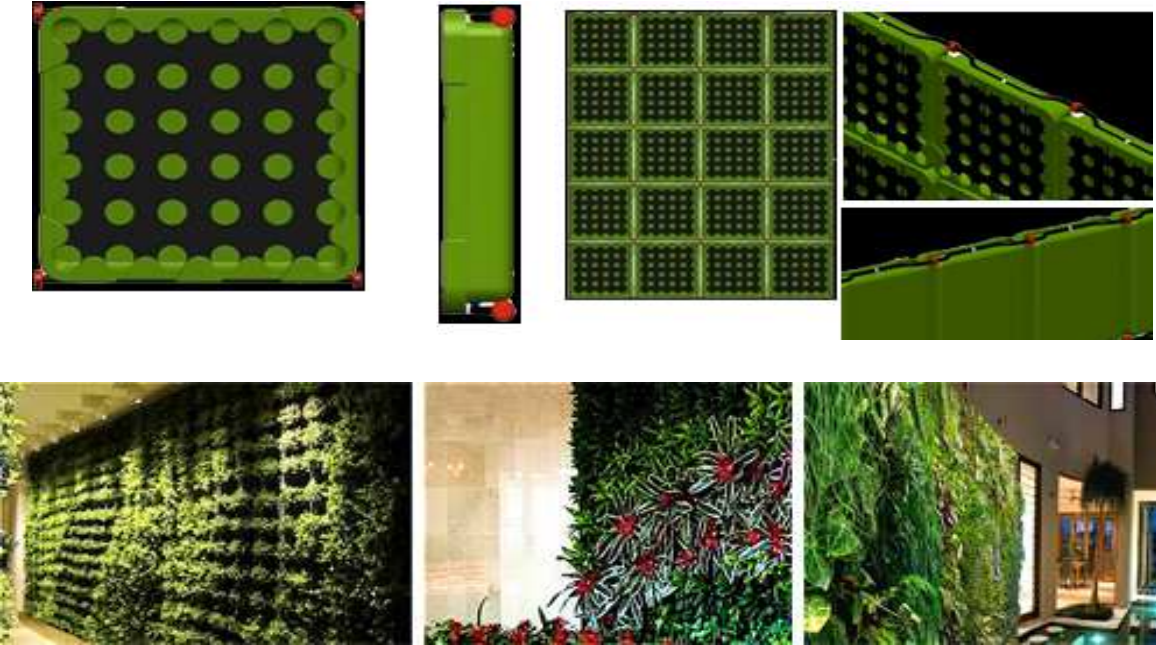
(13 plantas/modulo)

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

mediante fertirrigación de sistema cerrado

1.2.1.vi. Green-Wall Panel

COLFIBREX	Modular	www.greenwalltechnologies.com
<i>Carrera 30, 10 - 209 – Arroyohondo-Cali-Colombia</i>		
<p>Consiste en paneles modulares de polipropileno con protección UV. Este sistema está dotado de sistema de riego por goteo y drenaje individual por modulo. En su interior está relleno con sustrato agrícola. Es un sistema ligero, de fácil y rápido montaje, bajo costo de inversión y fácil mantenimiento</p>		
		
<p>Detalle de los paneles modulares Green Wall Panel y ejemplos del acabo final del sistema</p>		
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
<p>Capa 0 Anclaje a la pared Capa 1 paneles modulares de polipropileno Capa 2 material vegetal prevegetado Capa 3 sistema de riego y drenaje</p>		
PESO DEL SISTEMA:	peso del módulo vacío 4kg	
MEDIDAS DEL SISTEMA:	540X540mm X100mm de espesor	
CAPACIDAD DEL SISTEMA	100 plantas/m ² (36 plantas/módulo)	
SUSTRATO.	Sustrato agrícola	
SISTEMA DE RIEGO:	Goteo automatizado y fertirrigación recirculante	

1.2.1.vii. *Vertical Farming Panel*

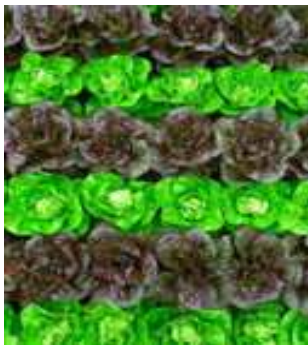
COLFIBREX

Modular

www.greenwalltechnologies.com

Carrera 30, 10 - 209 - Arroyohondo-Cali-Colombia

Este sistema consiste en paneles de Polipropileno con protección UV, compuesto por tres niveles de pisos colocados verticalmente donde se coloca el sustrato y el material vegetal para la implantación de muros vegetales. Incorpora un sistema de riego por goteo en la parte superior del panel y drenaje inferior entre ambos niveles. Son de fácil y rápido montaje y fácil mantenimiento



Detalle de los paneles modulares Vertical Farming Panel y ejemplos del acabado final del sistema

COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 sistema de anclaje a la pared

Capa 1 panel vertical con riego y drenaje incorporado

Capa 2 sustrato y material vegetal

PESO DEL SISTEMA:

peso del módulo vacío 3.5kg

MEDIDAS DEL SISTEMA:

540X540mm X100mm de espesor

CAPACIDAD DEL SISTEMA

100 plantas/m² (36 plantas/módulo)

SUSTRATO.

Sustrato agrícola




SISTEMA DE RIEGO:

Goteo automatizado y fertirrigación recirculante

1.2.1.viii. *DIY-LUSHE*

LUSHE URBAN GREENING	Modular	www.lushe.com.au
<i>Australia</i>		
<p>El Sistema DIY-Lushe de pared es un sistema vertical de fácil instalación. Consiste en macetas individuales de Polipropileno Negro Reciclado de 595mm ancho x 200mm de alto x 200mm de espesor, con drenaje inferior, lo que posibilita el riego de las macetas inferiores. Se pueden instalar de forma aislada o conformando un panel. Con 6 módulos, es suficiente para cubrir 1 metro cuadrado. La característica de este sistema es que las plantas crecen de forma horizontal.</p>		
		
<p>Modo de anclaje, colocacion de macetas, detalle del riego y drenaje Composición final</p>		
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
Capa 0 Anclaje a la pared mediante listones de madera		
Capa 1 macetas de polipropileno		
Capa 2 material vegetal		
Capa 3 sistema de riego y drenaje		
PESO DEL SISTEMA:		
MEDIDAS DEL SISTEMA:	595 X 200 mm X200mm de espesor	
CAPACIDAD DEL SISTEMA	(plantas cada10-15cm)(6 módulos 1m2)	
SUSTRATO.	Sustrato agrícola	
SISTEMA DE RIEGO:	Goteo automatizado de la primera maceta	

1.2.1.ix. *Naturpanel*

INTEMPER ESPAÑOLA, S.L.		Modular		www.intemper.com	
<i>Madroño 4 - Pol Industrial "La Mina" - 28770 Colmenar Viejo - Madrid-Spain</i>					
<p>Sistema de fachada vegetal compuesto por módulos de Polietileno inyectado de alta densidad en color verde, de 600 x 600 mm y 80 mm de espesor, precultivados. Llevan incorporado un sistema de riego por goteo en la parte superior de la fachada y drenaje inferior para la recirculación del agua de riego.</p>					
					
		<p>Casa del amor, Carlos Arroyo, - La Moraleja. Madrid - 2001-2003</p>		<p>Plaza del Pericón -Malaga- 2010</p>	
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:					
<p>Capa 0 sistema de anclaje a la pared Capa 1 panel vertical con riego y drenaje incorporado Capa 2 material vegetal</p>					
PESO DEL SISTEMA:					
MEDIDAS DEL SISTEMA: 600X600mm X80mm de espesor					
CAPACIDAD DEL SISTEMA					
SUSTRATO.					
SISTEMA DE RIEGO: Fertirrigación localizada y automatizada.					
Sin relleno y sin plantación 162,00 € /m ² - 59,00 € /Ud.					
Con relleno y sin plantación 252,00 € / m ² - 91,00 € /Ud.					
PRECIO Con relleno y plantación 610,00 € /m ² - 220,00 € /Ud					

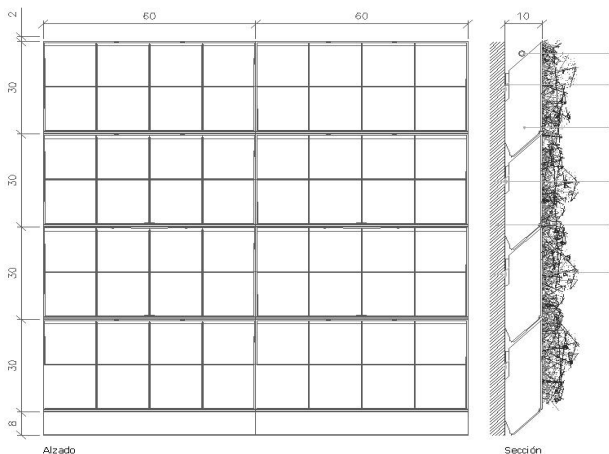
1.2.1.x. *Nartupanel Aljibe*

INTEMPER ESPAÑOLA, S.L.

Modular

www.intemper.com

Sistema vegetal compuesto por módulos de Polietileno inyectado de alta densidad en color verde de 600 x 300 mm y 100 mm de espesor. Están provistos de un depósito aljibe donde se almacena el agua de lluvia, para la optimización del suministro del agua a las plantas. El aporte de agua se realiza mediante riego desde la parte superior de la fachada.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0

Capa 1 Perfiles horizontales fijados mecánicamente a la fachada o estructura auxiliar

Capa 2 módulos de Polietileno inyectado de alta densidad

Capa 3 material vegetal prevegetado

Capa 4 sistema de riego

PESO DEL SISTEMA:

Peso total 15 kg/modulo (85 kg/m² saturado)

MEDIDAS DEL SISTEMA:

6000 x 300 x 100 mm de espesor

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Consiste en un sistema cerrado de recirculado de nutrientes mediante una tubería de alimentación de fertirrigación en la cabecera de fachada. Esta permite recircular la solución de drenaje a través de la bomba.

PRECIO

Sin relleno y sin plantación 134,00 €/m² - 25,00 €/Ud.
 Con relleno y sin plantación 210,00 €/m² - 38,00 €/Ud.
 Con relleno y con plantación 499,00 €/m² - 90,00€/Ud.

1.2.1.xi. *Live panel*

MOBILANE	Modular	www.mobilane.com
<i>Broekweg 3, 3956 NE Leersum</i>		
<p>Es un sistema modular de pared adecuado tanto para interiores como para exteriores. Los módulos consisten en paneles de 1000 x 600 mm x 16 mm de espesor, que en su interior contienen sustrato especial para el enraizamiento, lo que permite al material vegetal el acceso al agua y a los nutrientes. Los paneles se fijan a la estructura mediante un marco de aluminio ligero. El sistema de riego y drenaje es cerrado y totalmente automatizado</p>		
		
Detalle de los módulos y composición final		
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
Capa 0 Sistema fijación a la pared mediante marco de aluminio		
Capa 1 módulos con sustrato		
Capa 2 material vegetal		
Capa 3 sistema de riego		
PESO DEL SISTEMA:	Peso total 47 kg/m ² (saturado)	
MEDIDAS DEL SISTEMA:	1000 x 600 mm x 16 mm espesor	
CAPACIDAD DEL SISTEMA		
SUSTRATO.		
SISTEMA DE RIEGO:	Sistema fertirrigación desde la parte superior de la fachada con bomba de recirculación	

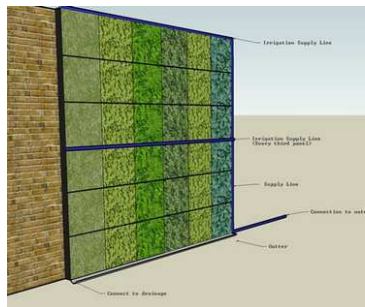
1.2.1.xii. *ELT Easy Green Living Wall Panel System*

ELEVATED LANDSCAPE TECHNOLOGIES

www.eltlivingwalls.com

245 King George Road, Suite 320 Brantford Ontario, Canada- N3R-7N7

Es un sistema modular fabricado en polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado, de estructura rectangular con 10 celdas independientes. Estas celdas tienen un ángulo de inclinación de 30º respecto a la pared para facilitar la circulación del agua del riego y el drenaje. En la parte inferior de la pared hay un compartimento para la recogida del drenaje del agua del riego y deposito superior para realizar el riego por goteo. Los módulos son de poco peso lo que facilita su instalación.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 Sistema fijación a la pared

Capa 1 módulos de HDPE

Capa 2 material vegetal

Capa 3 sistema de riego

PESO DEL SISTEMA:

Peso total 6,8 – 9 kg/m² (seco – saturado)

MEDIDAS DEL SISTEMA:

300 x 300 mm x 12 mm espesor, pero se pueden realizar a medida e incluso redondeados.

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Sistema cerrado de fertirrigación desde la parte superior de la fachada

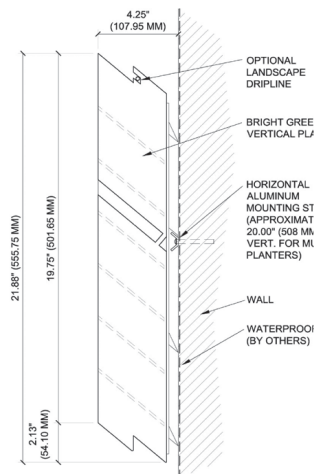
1.2.1.xiii. *Grow V*Ert Paneles Verticales

URBAN ZEAL PLANTERS

Modular

www.uzplanters.com

Es un sistema modular de 10 o 45 celdas construido en polietileno de alta densidad (HDPE), totalmente reciclable. El modulo posee una inclinación de 30° respecto a la vertical lo que favorece el riego mediante drenaje entre el modulo superior y el inferior y también contribuye a reducir en lo posible mojar la pared.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

- Capa 0 film hidrófugo
- Capa 1 bastidores traseros para anclaje a la pared
- Capa 2 sistema modular
- Capa 3 material vegetal prevegetado

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

497.5 x 497.5 x 63 mm

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

En la parte superior del sistema se encuentra el depósito para el agua de riego. El riego se realiza mediante escorrentía vertical a través de una línea de celdas a las siguientes, a parte de este sistema, cada línea de celdas posee en la parte superior un gotero.

1.2.1.xiv. *Flexipanel*

GREENMAT COVER CROP L.S.L

Modular

www.greenmatsystem.com

Carrer Vilamarí 86-88 baixos 08015 Barcelona Spain

Sistema de paneles precultivados Flexipanel de 620x520mm x 100mm de espesor esta realizado en material ligero y se utiliza para la instalación de paredes verticales vegetales. Por otro lado, también tiene la opción de crear muros separadores mediante los módulos rectangulares de 2000x600 x 100 mm de espesor



The office of Procore. 22 m² -2010.



Theatre Groningen, 14 m² 2011.



NIKHEF Amsterdam 100 m². 2011.



Head Office.Roma 2010 -51 m²



Rabobank Utrecht. 2012 -207 m²



Apartment Vancouver, 2010. -30 m²

COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 Sistema fijación a la pared

Capa 1 membrana TPO trasera

Capa 2 sustrato comprimido adecuado para el crecimiento vegetal

Capa 3 membrana de gran capilaridad y con resistencia a UV

Capa 4 material vegetal

Capa 5 sistema de riego

PESO DEL SISTEMA:

20-25 kg/m² seco 40-45 kg/m² saturado

MEDIDAS DEL SISTEMA:

Flexipanel 620x550 mm x 100 mm de espesor

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Sistema cerrado de fertirrigación

1.2.1.xv. Gro wall 4

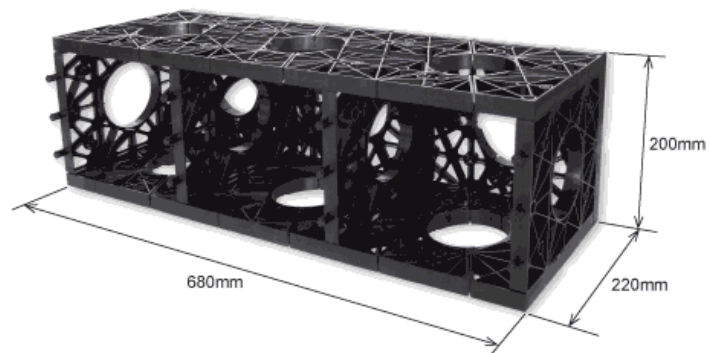
ATLANTIS

Modular

www.gro-wall.com.au

3/19-21 Gibbes Street, Chatswood, NSW 2067, Australia

Es un sistema modular de 680x 220 x 200 mm de anclaje a la pared. La característica principal de este sistema modular es que las plantas crecen de forma vertical. Para ello, tiene en el interior del sistema una maceta (Gro-Pot), de 6,5 litros de volumen que posee drenaje inferior. En cada modulo se colocan 3 macetas. El material vegetal se puede instalar prevegetado o en estadios más tempranos o incluso en semilla



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

- Capa 0 sistema de anclaje
- Capa 1 módulos con sistema de riego
- Capa 2 macetas con sustrato
- Capa 3 material vegetal

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

680 x 200 x 220 mm (capacidad para tres macetas)

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

goteros individualizados para cada maceta

1.2.1.xvi. *Muros Biani*

<p>BIANI MUROS VERDES</p>	<p>Modular</p>	<p>www.bitbang.mx</p>
<p>817, Col. Del Valle, Delegación Coyoacán, CP 03100. México, DF</p>		
<p>Sistema compuesto por tubería realizada en policloruro de vinilo (PVC) en la cual están integrados unas macetas realizadas en el mismo material donde se coloca el sustrato y material vegetal. Estas macetas están incorporadas en el sistema de fertirrigación.</p>		
		
		
<p>COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:</p>		
<p>Capa 0 Anclaje a la pared</p>		
<p>Capa 1 Tubería de PVC, con sistema de riego y macetas</p>		
<p>Capa 2 sustrato y material vegetal</p>		
<p>MEDIDAS DEL SISTEMA:</p>	<p>Muro Grande-PMG-001 920x880mm Muro Mediano-PMM-001 790x700mm Muro Chico-PMM-001 500x630mm</p>	
<p>CAPACIDAD DEL SISTEMA</p>	<p>Muro Grande-PMG-001 plantas 25/modulo Muro Mediano-PMM-001 plantas 16/modulo Muro Chico-PMM-001 plantas 9/modulo</p>	
<p>SUSTRATO.</p>	<p></p>	
<p>SISTEMA DE RIEGO:</p>	<p>Sistema cerrado de fertirrigación</p>	

1.2.1.xvii. *Elmich Vertical Greening Modules (VGM)*

ELMICH	Modular	www.elmich.com.au
<i>PTY 52/8 Avenue of Americas Newington NSW 2127 Australia</i>		
<p>Consiste en paneles modulares, estos están fabricados en plástico 100% reciclado resistente a UV, lo que le aporta gran ligereza a la estructura. El anclaje a la pared se realiza mediante bastidores de acero inoxidable con recubrimiento de polvo, los cuales sujetan el sistema a las paredes. Cada módulo contiene un revestimiento geotextil dentro del cual se coloca la mezcla de siembra, esta puede ser sustrato orgánico, sphagnum o poliestireno</p>		
  		
  		
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
Capa 0 Anclaje a la pared mediante bastidores de acero inoxidable		
Capa 1 módulos Vertical Greening / Capa 2 sustrato/ Capa 3 material vegetal		
Capa 4 sistema de riego y drenaje		
PESO DEL SISTEMA:	Tipo1: 6-34 kg - Tipo2: 5,5-19,5Kg (normal-saturado)	
MEDIDAS DEL SISTEMA:	Tipo1: 500x560x250mm. - Tipo2: 00x560x125mm	
CAPACIDAD DEL SISTEMA	16 plantas/ módulo	
SUSTRATO.	Corteza de pino (40%), fibra de coco (40%) y espuma de poliestireno reciclado de 3-5mm (20%)	
SISTEMA DE RIEGO:	El riego se realiza por goteo Capacidad de capturar agua de riego, que puede ser utilizada para el riego.	

1.2.1.xviii. Pared de sphagnum

ARRELS JARDINS	Modular	www.arrels Jardins.com
<i>Calle Mossèn Marià Martínez, 5 Canet de Mar 08360 Barcelona-Spain</i>		
<p>Se trata de estructuras modulares de diferentes dimensiones rellenas de <i>Sphagnum</i>, este es un musgo con capacidad de absorción y retención de agua que debido a su textura ligera, puede almacenar 20 veces su volumen en agua y redistribuirla a las raíces de acuerdo a sus necesidades. Al mismo tiempo proporciona una óptima oxigenación a las plantas con ph,4,8 que evita el uso de reguladores químicos, haciendo a la planta resistente a enfermedades y parásitos</p> <p>Son estructuras ligeras que pueden instalarse en el interior y exterior de edificios.</p>		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div>		
COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:		
<p>Capa 0 Estructura modular metálica con anclajes a la pared</p> <p>Capa 1 relleno de <i>sphagnum</i></p> <p>Capa 2 material vegetal prevegetado</p> <p>Capa 3 sistema de riego</p>		
MEDIDAS DEL SISTEMA:	<p>360x360x150mm / 720x360x150mm / 1500x1000x100mm / 1500x1000x150mm 1200x1000x100m / 1200x1000x150mm 1000x1000x100mm / 1000x1000x150mm</p>	
CAPACIDAD DEL SISTEMA		
SUSTRATO.	<i>Sphagnum sp.</i>	
SISTEMA DE RIEGO:	Goteros en cada estructura	

1.2.1.xix. Greenwalls Vertical Planting Systems

GREENWALLS VERTICAL PLANTING SYSTEMS

www.greenwalls.com

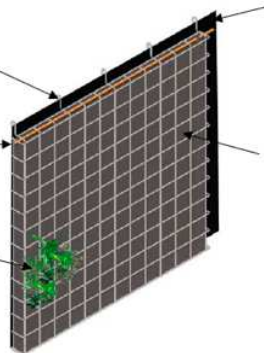
760 Vandalia Street, Suite 100- St. Paul, MN 55114

El sistema Greenwalls consiste en una estructura metálica anclada a la pared sobre una tela impermeable a la cual se le añade fertirrigación superior. La peculiaridad de este sistema radica en la última capa, realizada en espuma sobre la cual se realizan cortes para colocar el material vegetal

Powder coated wire hanging structure — designed to take the elements and provide structural integrity to the system.

Drip Irrigation channel — allows for easy installation of irrigation system. (Irrigation line not included with the panel)

Easy planting — just cut a slit into the foam panel and insert stage IV liners or 3" starter plants. They adapt quickly to their new environment. No need to pre-grow panels.



Waterproof layer — each panel overlaps the next to create an integral waterproof membrane, no need for additional waterproofing

Foam planting media — allows optimum root penetration and plant stability.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 capa impermeable

Capa 1 estructura de alambre para la sujeción del sistema

Capa 2 sistemas de fertirrigación por goteo

Capa 3 espuma

Capa 4 material vegetal

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Automatizado por fertirrigación el riego se realiza mediante goteo superior, posteriormente el agua drenada al fondo del sistema es recirculado

1.2.1.xx. Sistema Eco.bin.

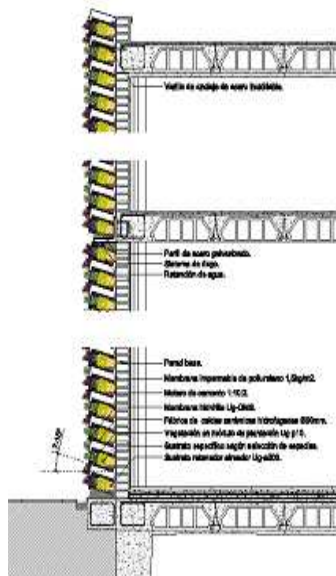
URBANABOLISMO

Modular Cerámico

www.urbanarbolismo.es

Plaza Gabriel Miró nº18 3ºB. 03001-Alicante – Spain

El medio de plantación de este sistema está constituido por un conjunto de celdas cerámicas. La inclinación de las celdas junto con la combinación de sustratos específicos permite almacenar agua durante un largo periodo de tiempo, por lo que el tipo de vegetación seleccionada requiere muy poca de agua y un mínimo mantenimiento, La película hidrófila aplicada sobre las celdas cerámicas mantiene el agua de riego adherida a ella y facilita la captación de agua atmosférica. Los huecos cerámicos actúan como elemento anecoicos que convierten a en este sistema en una barrera de absorción acústica.



Jardín vertical. Ibiza-Spain



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: membrana impermeable de poliuretano 1,5 kg/m²

Capa 1: muro de hormigón en la cara posterior mediante mortero mixto 1:2:10 y conectores de alambre de acero inoxidable de 4mm de diámetro anclados al muro de hormigón cada 1,5 m/l

Capa 2: celdas cerámicas hidrófugas hexagonales de 2 huecos, inclinadas de 7-15° sobre la horizontal y ancladas

Capa 3: especies vegetales

CAPACIDAD DEL SISTEMA

80 plantas/ m²

SISTEMA DE RIEGO:

Distribución sectorizada de líneas de goteo autocompensantes con goteos de 4 l/h y separación de 3m entre las líneas Sistema de monitorización y control de riego.

1.2.1.xxi. Sistema Leaf.box

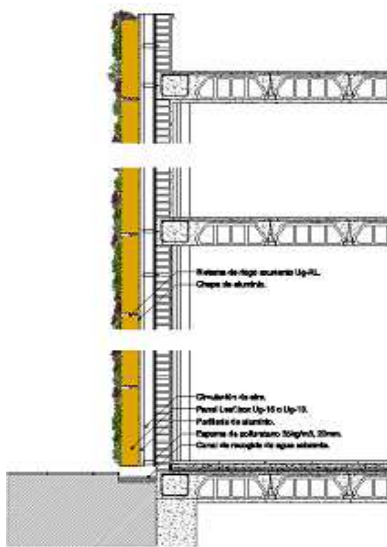
URBANABOLISMO

Modular Sedum

www.urbanarbolismo.es

Plaza Gabriel Miró nº18 3ºB. 03001-Alicante – Spain

Se trata de un sistema de paneles modulares de fibras vegetales con un espesor de 10 a 15 cm instalados sobre bastidores. Este sistema permite la instalación de paneles preplantados con variedades de *sedum*, obteniendo una superficie verde desde el primer momento de la instalación o la plantación de especies vegetales una a una según el diseño deseado



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: Capa aislante con impermeabilización de espuma de poliuretano 35Kg/m³, de 20 mm de espesor

Capa 1: Estructura portante, perfilaría de aluminio

Capa 2: Panel leaf.box, realizados en varilla metálica, cerrados con alambre galvanizado, electro-soldado y plastificado

Capa 3: Sistema de riego exudante

Capa 4: Vegetación en módulo de plantación

PESO DEL SISTEMA:

Peso total 45-60 kg/m² (plantado y saturado de agua)

CAPACIDAD DEL SISTEMA

40 plantas/m²

SUSTRATO.

De fibras vegetales de musgo *Sphagnum maguellanicum* deshidratado, no fosilizado ni descompuesto.

SISTEMA DE RIEGO:

Mediante tubo poroso exudante el cual riega a lo largo de todo su recorrido.

1.2.2. Sistema Filtros Geotextiles

Los Sistemas de filtros geotextiles utilizan una doble capa de filtro, por el medio de la cual se realiza el fertirriego por goteo. Sobre la segunda capa geotextil se realizan pequeños orificios que sirven como apoyo al material vegetal. Estas mallas de filtro se anclan a la pared mediante una estructura metálica.

1.2.2.i. Muros Vegetados-Patric Blanc

PATRIC BLANC-PATENTE N°: FR2634971-A1

Geotextil

Paris-France

www.verticalgardenpatrickblanc.com

El sistema basado en los bosques tropicales consiste en la superposición de diferentes elementos que garantizan el crecimiento y fijación de las raíces de las plantas sobre una superficie con sistema de fertirrigación.

Para ello se grapan 2 capas de filtro de poliamida sobre unas planchas de PVC expandido y se fijan sobre una estructura metálica que asegura el aislamiento con el muro "portador". Sobre este filtro, se desarrollan las raíces de las plantas. Éstas se instalan en toda la altura del muro, con una densidad de veinte plantas por metro cuadrado. El mantenimiento es bajo ya que las malas hierbas no son capaces de invadir estas superficies verticales poco fertirrigadas.



Pasos en la construcción de una vivienda particular en Paris- 2006, mediante muro geotextil

COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: estructura metálica con cámara de aire sobre el muro "portador"

Capa 1: planchas de pvc expandido de 10 mm de grosor

Capa 2: doble capa de filtro de poliamida de gran capilaridad y retención de agua,

Capa 3: sistema de riego entre la capa de filtro

Capa 4: vegetación

PESO DEL SISTEMA: 30 kg/m²

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA 20 plantas/m²

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

El riego se efectúa a partir de un conjunto de tubos agujereados, superpuestos a partir de la cima del muro vegetal. El sistema está programado por electroválvulas acopladas a un distribuidor de solución nutritiva poco concentrada. El drenaje se recoge en la parte inferior y se puede recircular.

1.2.2.ii. *Floravelt panels*

URBAN ZEAL PLANTERS

Geotextil

www.uzplanters.com

1743 S. La Cienega Blvd. Los Angeles, CA 90035, USA

Estos paneles están realizados en fieltro sintético procedente del reciclado de botellas de plástico. Consiste en una doble capa de fieltro, sobre la primera capa se realizan bolsillos en los cuales se introduce en material vegetal, la segunda capa consiste en la parte trasera del sistema.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 film hidrófugo

Capa 1 bastidores traseros

Capa 2 paneles

Capa 3 material vegetal

Capa 4 sistema de fertirrigación y recirculación

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

1.2.2.iii. *Woolly pockets*

URBAN ZEAL PLANTERS

Geotextil

www.uzplanters.com

1743 S. La Cienega Blvd. Los Angeles, CA 90035, USA

Este sistema consiste en sacos o bolsillos de fieltro realizados a partir del reciclado de botellas de agua. Mediante este sencillo sistema se pueden crear rápidamente muros verticales. Se puede instalar tanto en el exterior como el interior. No tiene sistema de riego por lo que se riega de forma manual, aunque se puede instalar un automatismo.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0 film hidrófugo

Capa 1 bastidores traseros

Capa 2 sacos de fieltro

Capa 3 material vegetal

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

1.2.2.iv. *Pared Vegetal-Lushe*

<p>LUSHE URBAN GREENING</p>	<p>Geotextil</p>	<p>www.lushe.com.au</p> <p><i>Australia</i></p>
<p>Las plantas prevegetadas se colocan en bolsillos de fieltro procedente de botellas de plástico recicladas. Estos bolsillos son lo suficientemente grandes como para poder mantener las plantas y están lo suficientemente juntos para dar sensación de densidad. Las plantas se disponen en capas horizontales para acentuar los contrastes de color, texturas y tamaños de las hojas y flores diferentes. Este sistema de instalación utiliza plantas prevegetadas en vivero y un sistema de fertirrigación utilizado en el cultivo hidropónico</p>		
		
<p>COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:</p>		
<p>Capa 0 estructura metálica de base Capa 1 capa hidrófuga marina de 12 mm, junto a un revestimiento a prueba de agua Capa 2 fieltro reciclado de botella de plástico PET, 100% reciclado Capa 3 material vegetal prevegetado Capa 4 sistema de riego.</p>		
<p>CAPACIDAD DEL SISTEMA</p> <p>SISTEMA DE RIEGO:</p>	<p>plantas_/m2 (plantas cada 10-15cm)</p> <p>Sistema de fertirrigación por goteos, El sistema consiste en un depósito de agua y una bomba para recircular el agua</p>	

1.2.2.v. Sistema f+p

URBANABOLISMO

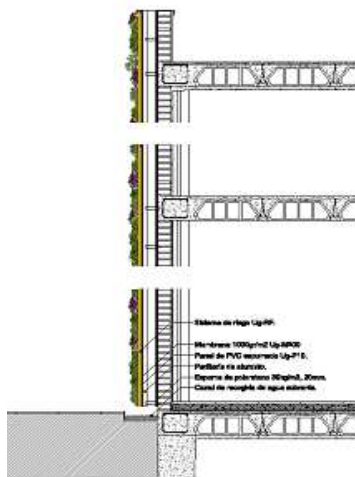
Geotextil

www.urbanarbolismo.es

Plaza Gabriel Miró nº18 3ºB. 03001-Alicante – Spain

Es un sistema de rápido montaje destinado a la plantación de especies vegetales con pendiente comprendidas entre 30º y 90º. Está compuesto por una estructura metálica portante con módulos rectangulares sobre una estructura impermeable,

El sistema está compuesto por de paneles impermeables anclados sobre bastidores, con sistema de doble cámara de aire que garantiza la estanqueidad del soporte base. Sobre los paneles se ancla una doble capa sintética de material no tejido por donde discurre una solución hidropónica.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: Sistema de rastreles de acero galvanizado o aluminio anclados al soporte.

Capa 1: Panel de PVC espumado espesor 10mm.

Capa 2: Doble capa sintética, y riego

Capa 3: Vegetación.

PESO DEL SISTEMA:

35 kg /m²

CAPACIDAD DEL SISTEMA

40 plantas/ m².

SUSTRATO.

sustrato mineral polifeltro de pH6 y espesor de 3mm

SISTEMA DE RIEGO:

Riego con líneas tech-line cada 5 cm con goteo autocompensantes 0,2 l/h y una separación de 3 m entre las líneas. Las líneas están conectadas a los 2 tubos principales para garantizar una presión igual en todos los goteos.

1.3. Sistemas de contención con muros vegetales

Sistemas destinados a soportar un empuje, fundamentalmente horizontal que proviene del terreno cuyo deslizamiento se pretende contener. El Muro Verde de contención es un muro que presenta la particularidad de que su superficie vista, inclinada, se cubre totalmente por plantas herbáceas y arbustivas.

1.3.1. Sistemas Tresma Verde

TRESMA VERDE	Contención	www.abianchini.es <i>Calle Diputació 279 1º 3ª- 08007 Barcelona-Spain</i>
<p>Es un sistema de contención de taludes constituido por un enrejado metálico con mallas hexagonales de Triple Torsión de tipo 8x10 galvanizado y revestido con P.V.C. gris.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tipo “Tierra” está formado por una manta orgánica de fibra de coco reforzado con malla plástica • Tipo “Agua” está formado por una geomalla en polipropileno 		
		
<p>Hotel Armentia-Vitoria 2010</p>	<p>Gato de Móstoles</p>	

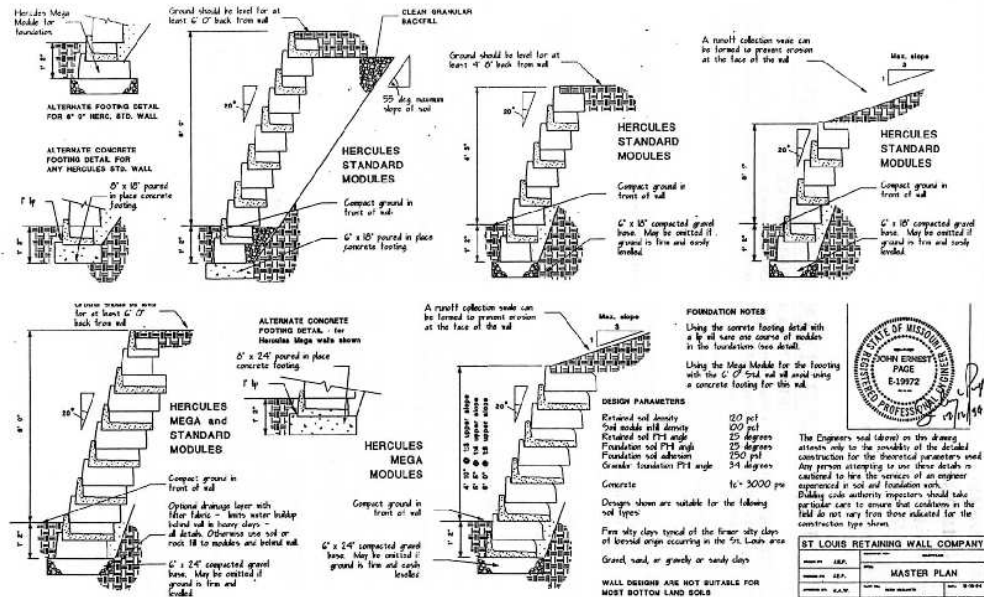
1.3.2. Sistema Hercules

ST. LOUIS RETAINING WALL COMPANY

www.herculesmfg.com

12901 Saint Charles Rock Road Bridgeton MO 63044

MASTERPLAN FOR RESIDENTIAL RETAINING WALLS OF HERCULES STANDARD AND MEGA MODULES



3916 Geraldine Ave.
 St. Louis, MO 63115
 phone: 314-389-9255 • fax: 314-389-6416
www.herculesmfg.com

STATE OF MISSOURI
 JOHN EINHORN
 PAGE 8-19972
 PROFESSIONAL ENGINEER

The Engineers seal (shown) on this drawing attests only to the readability of the detailed construction for the theoretical parameters used. Any person attempting to use these details is cautioned to hire the services of an engineer experienced in soil and foundation work. Pulling code authority inspectors should take particular care to ensure that conditions in the field do not vary from those indicated for the construction type shown.

ST. LOUIS RETAINING WALL COMPANY			
PROJECT:	REP:	MASTER PLAN	
DATE:	DATE:	DATE:	DATE:
BY:	BY:	BY:	BY:
SCALE:	SCALE:	SCALE:	SCALE:



1.3.3. Sistema Drivable Grass

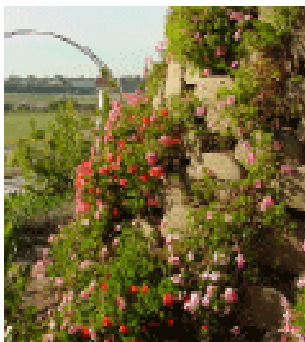
SOIL RETENTION

Contención

www.soilretention.com

2501 State Street Carlsbad, CA 92008 800-346-7995

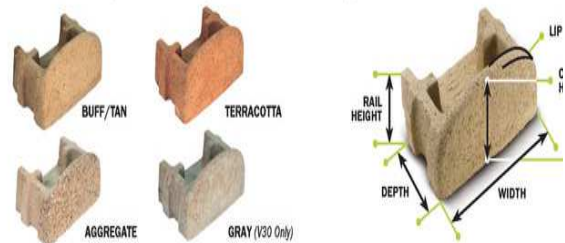
Este sistema se utiliza para realizar muros de contención o gravedad, se basa en bloques geosintéticos con refuerzo Posi-Duror® para crear paredes de altura deseada. El diseño estándar consiste en bloques con refuerzo geosintéticos de diferentes medidas



THE BASICS	VERDURA® 10	VERDURA® 30
CH-Crown Height	6"	9.5"
RH-Rail Height	4"	6.5"
W-Width	12"	18"
D-Depth	8"	12"
Block Weight	23 lbs.	70 lbs.
Maximum Spacing Between Blocks	6"	9"
Area Covered Per Block*	0.5 sq ft	1.25 sq ft

* # Blocks are spaced apart

Choose the size, finish & style of block to fit your needs



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: bloque

Capa 1: tierra

Capa 2: vegetación

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SISTEMA DE RIEGO:

Agua de lluvia

1.4. Pantallas antirruído con muros vegetales

1.4.1. Barreras antirruído de madera

METROLIGHT P.I. VALDECONSEJO

www.metrolight-es.com

Calle Guara, Parcela 5E. 50410 Cuarte de Huerva, Zaragoza - Spain

Este sistema está compuesto por una doble pared de madera que tiene tierra en su interior donde posteriormente se coloca el material vegetal. Son barreras protectoras contra los ruidos ya que proporcionan aislamiento acústico gracias al cerramiento hermético de las juntas.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: doble panel de troncos de madera

Capa 1: sustrato

Capa 2: vegetación

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Agua de lluvia

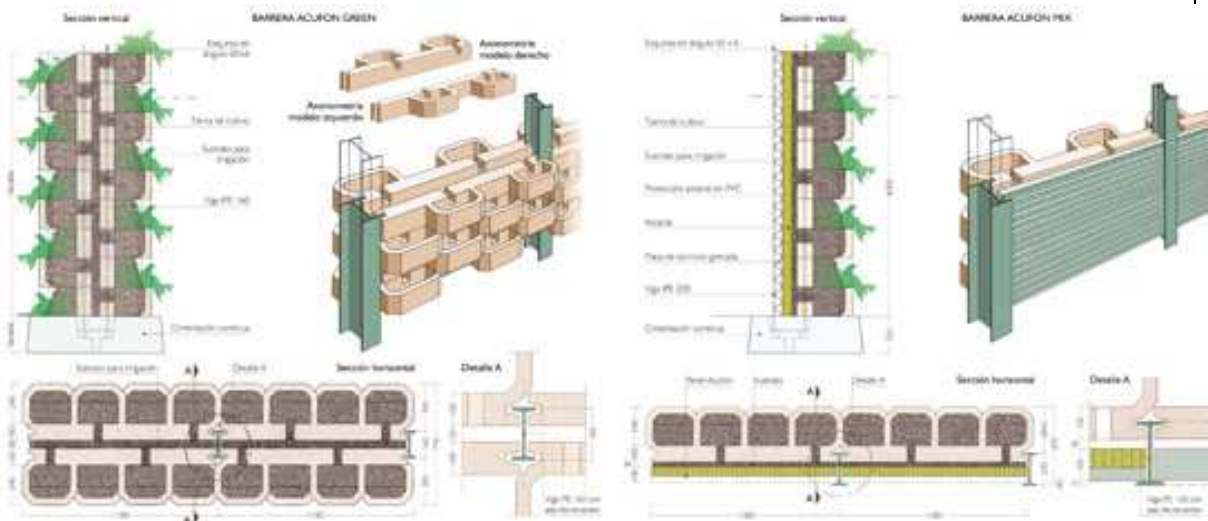
1.4.2. Barrera de hormigón y vegetación

METROLIGHT P.I. VALDECONSEJO

www.metrolight-es.com

Calle Guara, Parcela 5E. 50410 Cuarte de Huerva, Zaragoza - Spain

Este sistema está compuesto por dos paredes de módulos de hormigón, en los que se introduce la vegetación junto con el sustrato necesario y el retenedor de agua para proporcionar humedad. Entre ambas existe una cámara de aire que contribuye aún más al aislamiento acústico necesario.



COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: doble panel de troncos de madera

Capa 1: sustrato

Capa 2: vegetación

PESO DEL SISTEMA:

MEDIDAS DEL SISTEMA:

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Agua de lluvia

1.4.3. NoinStop green

ROCKWOOL

www.rockwool.es

Calle Bruc 50-3^a-3^a-08010 Barcelona-Spain

El sistema Noinstop Gren es cerramiento verde con postes de madera o acero que producen una barrera acústica. Esta realizada sobre una estructura metálica galvanizada, con núcleo de lana de roca y red de polietileno verde, sobre la cual se desarrolla el material vegetal. Es fácil de montar ya que es una construcción delgada y ligera, de dimensiones variables y de fácil manejo.

- Con la vegetación al pie.

En este tipo la barrera acústica se recubre por especies trepadoras que se plantan al pie de la valla y que crecen utilizando la red de acero galvanizado como soporte. En estas pantallas, la lana de roca no solo sirve para absorber y neutralizar el ruido del ambiente, sino que además se ocupa de retener en su interior el agua de lluvia, convirtiéndose en una reserva de humedad de gran valor para facilitar el crecimiento de la vegetación asociada.

- Con la vegetación en el interior. Modelo Intensive.

En este tipo de pantallas, la vegetación se coloca en el interior de la pantalla utilizando la lana de roca como apoyo para el enraizamiento de las plantas. Incorpora un sistema de fertirriego por goteo que garantiza el grado de humedad y el aporte de nutrientes necesarios para la planta.





COMPOSICIÓN DEL SISTEMA:

Capa 0: una estructura metálica galvanizada, y

Capa 1: con núcleo de lana de roca

Capa 2: red de polietileno verde

Capa 3: vegetación

PESO DEL SISTEMA:

1000x450x115 1000x900x115

MEDIDAS DEL SISTEMA:

2000x450x115 2000x900x115

CAPACIDAD DEL SISTEMA

SUSTRATO.

SISTEMA DE RIEGO:

Agua de lluvia

INSONORIZACIÓN

21 dB según EN-1793

AISLAMIENTO

24 dB según ISO 717-1.

Bibliografía

- [1] The R Core Team, A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2012.
- [2] S.D. Eurostat, Energy statistics - Supply, transformation, consumption (2010).
- [3] Spanish National Statistics Institute, Spanish National Statistics Institute, (2013).
- [4] European Parliament and Council, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union. L153 (2010) 13-35.
- [5] Millenium ecosystem assessment. Strengthening capacity to manage ecosystems sustainably for human well-being (2014).
- [6] R. Petela, An approach to the exergy analysis of photosynthesis, Solar Energy. 82 (2008) 311-328.
- [7] C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, Energy Build. 42 (2010) 959-965.
- [8] X. Zhu, S.P. Long, D.R. Ort, What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?, Curr. Opin. Biotechnol. 19 (2008) 153-159.
- [9] E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, Energy Build. 27 (1998) 29-36.
- [10] E.A. Eumorfopoulou, K.J. Kontoleon, Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes, Build. Environ. 44 (2009) 1024-1038.
- [11] N.H. Wong, A.Y. Kwang Tan, Y. Chen, K. Sekar, P.Y. Tan, D. Chan, K. Chiang, N.C. Wong, Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, Build. Environ. 45 (2010) 663-672.
- [12] G. Pérez, L. Rincón, A. Vila, J.M. González, L.F. Cabeza, Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings, Appl. Energy. 88 (2011) 4854-4859.
- [13] C.Y. Cheng, K.K.S. Cheung, L.M. Chu, Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls, Build. Environ. 45 (2010) 1779-1787.
- [14] H. He, C.Y. Jim, Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem, Ecol. Model. 221 (2010) 2949-2958.

- [15] K. Perini, M. Ottelé, A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri, Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope, *Build. Environ.* 46 (2011) 2287-2294.
- [16] I. Susorova, M. Angulo, P. Bahrami, Brent Stephens, A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance, *Build. Environ.* 67 (2013) 1-13.
- [17] W.J. Stec, A.H.C. van Paassen, A. Maziarz, Modelling the double skin façade with plants, *Energy Build.* 37 (2005) 419-427.
- [18] T. Koyama, M. Yoshinaga, H. Hayashi, K. Maeda, A. Yamauchi, Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls, *Build. Environ.* 66 (2013) 96-103.
- [19] D.I. Cook, D.F. Van Haverbeke, Suburban noise control with plant materials and solid barriers, NE: University of Nebraska, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station (1997) 234-241.
- [20] G. Grant, L. Engleback, B. Nicholson, Green Roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas., EcoSchemes Ltd in association with StudioEngleback. ed., Environmental Impacts Team. English Nature Research, London, 2003.
- [21] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth, *J. Sound Vibrat.* 331 (2012) 2404-2425.
- [22] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs, *Build. Environ.* 46 (2011) 729-738.
- [23] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, Numerical evaluation of sound propagating over green roofs, *J. Sound Vibrat.* 317 (2008) 781-799.
- [24] M. Connelly, M. Hodgson, Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs, *Appl. Acoust.* 74 (2013) 1136-1143.
- [25] H.S. Yang, J. Kang, M.S. Choi, Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level, *Build. Environ.* 50 (2012) 44-55.
- [26] N.H. Wong, A.Y. Kwang Tan, P.Y. Tan, K. Chiang, N.C. Wong, Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Build. Environ.* 45 (2010) 411-420.
- [27] T. Van Renterghem, M. Hornikx, J. Forssen, D. Botteldooren, The potential of building envelope greening to achieve quietness, *Build. Environ.* 61 (2013) 34-44.
- [28] Kirill V. Horoshenkov, Amir Khan and Hadj Benkreira, Acoustic properties of low growing plants, *Journal of the Acoustical Society of America.* 133 (2013) 2554-2565.

- [29] N. Beckstead, How much could refuges help us recover from a global catastrophe?, *Futures*.
- [30] C.S.B. Grimmond, H.A. Cleugh, T.R. Oke, An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes, *Atmospheric Environment. Part B, Urban Atmosphere*. 25 (1991) 311-326.
- [31] R.A. Francis, Wall ecology: A frontier for urban biodiversity and ecological engineering, *Prog. Phys. Geogr.* 35 (2011) 43-63.
- [32] H. Sukopp, Human-caused impact on preserved vegetation, *Landscape Urban Plann.* 68 (2004) 347-355.
- [33] R.A. Francis, J. Lorimer, Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls, *J. Environ. Manage.* 92 (2011) 1429-1437.
- [34] J.T. Lundholm, P.J. Richardson, Habitat analogues for reconciliation ecology in urban and industrial environments, *J. Appl. Ecol.* 47 (2010) 966-975.
- [35] D. Despommier, Farming up the city: the rise of urban vertical farms, *Trends Biotechnol.* 31 (2013) 388-389.
- [36] G. Grant, Extensive green roofs in London., *Urban Habitats*. 4 (2006) 51-65.
- [37] G. Carrus, M. Scopelliti, R. Laforteza, G. Colangelo, F. Ferrini, F. Salbitano, M. Agrimi, L. Portoghesi, P. Semenzato, G. Sanesi, Go greener, feel better? The positive effects of biodiversity on the well-being of individuals visiting urban and peri-urban green areas, *Landscape Urban Plann.* 134 (2015) 221-228.
- [38] F. Madre, P. Clergeau, N. Machon, A. Vergnes, Building biodiversity: Vegetated façades as habitats for spider and beetle assemblages, *Global Ecology and Conservation*. 3 (2015) 222-233.
- [39] P. Næss, Residential location affects travel behavior—but how and why? The case of Copenhagen metropolitan area, *Progress in Planning*. 63 (2005) 167-257.
- [40] M. Clark, The Compact City: European Ideal, Global Fix or Myth?, *Global Built Environment Review*. 4 (2005) 1-11.
- [41] J. Ahern, S. Cilliers, J. Niemelä, The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation, *Landscape Urban Plann.* 125 (2014) 254-259.
- [42] E.V. White, B. Gatersleben, Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty?, *J. Environ. Psychol.* 31 (2011) 89-98.
- [43] B. William, E.F. Connelly, M. Fraser Cook, J. Goldstein, J. Pauly, *The Costs and Benefits of Green Affordable Housing*, New Ecology, Boston, 2005.

- [44] R. Kaplan, Impact of urban nature: A theoretical analysis, *Urban Ecology*. 8 (1984) 189-197.
- [45] R. Kaplan, Employees' reactions to nearby nature at their workplace: The wild and the tame, *Landscape Urban Plann.* 82 (2007) 17-24.
- [46] M.S.F. Rosley, S.R.A. Rahman, H. Lamit, Biophilia Theory Revisited: Experts and Non-experts Perception on Aesthetic Quality of Ecological Landscape, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 153 (2014) 349-362.
- [47] J. Johnston, J. Newton, *Building green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements.*, London, 2004.
- [48] Government of Western Australia. *Graffiti Prevention*. 2015 (2015).
- [49] A. Van Herzele, S. De Vries, Linking green space to health: a comparative study of two urban neighbourhoods in Ghent, Belgium, *Popul Environ.* 34 (2012) 171-193.
- [50] S. de Vries, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, P. Spreeuwenberg, Natural environments - Healthy environments? An exploratory analysis of the relationship between greenspace and health, *Environ. Plann. A*. 35 (2003) 1717-1731.
- [51] J. Maas, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, S. De Vries, P. Spreeuwenberg, Green space, urbanity, and health: How strong is the relation?, *J. Epidemiol. Community Health*. 60 (2006) 587-592.
- [52] A.E. van den Berg, J. Maas, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, Green space as a buffer between stressful life events and health, *Social Science and Medicine*. 70 (2010) 1203-1210.
- [53] R.S. Ulrich, Human responses to vegetation and landscapes, *Landscape Urban Plann.* 13 (1986) 29-44.
- [54] T.S. Nielsen, K.B. Hansen, Do green areas affect health? Results from a Danish survey on the use of green areas and health indicators, *Health and Place*. 13 (2007) 839-850.
- [55] J. Maas, S.M.E. van Dillen, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, Social contacts as a possible mechanism behind the relation between green space and health, *Health and Place*. 15 (2009) 586-595.
- [56] E.A. Richardson, R. Mitchell, Gender differences in relationships between urban green space and health in the United Kingdom, *Social Science and Medicine*. 71 (2010) 568-575.
- [57] S.A. Sherman, J.W. Varni, R.S. Ulrich, V.L. Malcarne, Post-occupancy evaluation of healing gardens in a pediatric cancer center, *Landscape Urban Plann.* 73 (2005) 167-183.

- [58] V. Tsilini, S. Papantoniou, D. Kolokotsa, E. Maria, Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island, *Sustainable Cities and Society*. 14 (2015) 323-333.
- [59] P.A. Mirzaei, F. Haghghat, Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations, *Build. Environ.* 45 (2010) 2192-2201.
- [60] E.J. Gago, J. Roldan, R. Pacheco-Torres, J. Ordóñez, The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25 (2013) 749-758.
- [61] J.K.W. Wong, L.S. Lau, From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong, *Habitat International*. 39 (2013) 25-35.
- [62] M. Santamouris, K. Pavlou, A. Synnefa, K. Niachou, D. Kolokotsa, Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households, *Energy Build.* 39 (2007) 859-866.
- [63] M. Santamouris, Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments, *Solar Energy*. 103 (2014) 682-703.
- [64] S. Parizotto, R. Lamberts, Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil, *Energy Build.* 43 (2011) 1712-1722.
- [65] E. Alexandri, P. Jones, Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results, *Build. Environ.* 42 (2007) 2835-2849.
- [66] E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Build. Environ.* 43 (2008) 480-493.
- [67] A. Teemusk, Ü Mander, Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia, *Build. Environ.* 44 (2009) 643-650.
- [68] R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi, Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate, *Build. Environ.* 45 (2010) 1890-1904.
- [69] W. Yang, D. Li, T. Sun, G. Ni, Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs, *Ecol. Eng.* 74 (2015) 327-336.
- [70] E. Schroll, J. Lambrinos, T. Righetti, D. Sandrock, The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate, *Ecol. Eng.* 37 (2011) 595-600.

- [71] J. Mentens, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landscape Urban Plann.* 77 (2006) 217-226.
- [72] A. Hoyano, Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building, *Energy Build.* 11 (1988) 181-199.
- [73] E.P. Weijers, A.Y. Khlystov, G.P.A. Kos, J.W. Erisman, Variability of particulate matter concentrations along roads and motorways determined by a moving measurement unit, *Atmos. Environ.* 38 (2004) 2993-3002.
- [74] A. Brüll, H. van Bohemen, R. Costanza, W.J. Mitsch, R. van den Boomen, N. Chaudhuri, J. Heeb, P. Jenssen, M. Kalin, A. Schönborn, Benefits of ecological engineering practices, *Procedia Environmental Sciences.* 9 (2011) 16-20.
- [75] G. Hoek, G. Kos, R. Harrison, J. de Hartog, K. Meliefste, H. ten Brink, K. Katsouyanni, A. Karakatsani, M. Lianou, A. Kotronarou, I. Kavouras, J. Pekkanen, M. Vallius, M. Kulmala, A. Puustinen, S. Thomas, C. Meddings, J. Ayres, J. van Wijnen, K. Hameri, Indoor-outdoor relationships of particle number and mass in four European cities, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 156-169.
- [76] M. Ottelé, H.D. van Bohemen, A.L.A. Fraaij, Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls, *Ecol. Eng.* 36 (2010) 154-162.
- [77] P. Yok Tan, A. Sia, A pilot green roof research project in Singapore. 3 (2005) 399-415.
- [78] J. Yang, Q. Yu, P. Gong, Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 7266-7273.
- [79] M. Köhler, Green facades—a view back and some visions, *Urban Ecosystems.* 11 (2008) 423-436.
- [80] H. Taha, Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin, *Atmos. Environ.* 30 (1996) 3423-3430.
- [81] E. Velasco, M. Roth, Cities as net sources of CO₂: Review of atmospheric CO₂ exchange in urban environments measured by eddy covariance technique, *Geography Compass.* 4 (2010) 1238-1259.
- [82] M. Demuzere, K. Orru, O. Heidrich, E. Olazabal, D. Geneletti, H. Orru, A.G. Bhave, N. Mittal, E. Feliu, M. Faehnle, Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure, *J. Environ. Manage.* 146 (2014) 107-115.
- [83] L.J. Whittinghill, D.B. Rowe, R. Schutzki, B.M. Cregg, Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems, *Landscape Urban Plann.* 123 (2014) 41-48.

- [84] I. Senitkova, Impact of indoor surface material on perceived air quality, *Materials Science and Engineering: C*. 36 (2014) 1-6.
- [85] L. Carazo Fernández, R. Fernández Alvarez, F.J. González-Barcala, J.A. Rodríguez Portal, Indoor Air Contaminants and Their Impact on Respiratory Pathologies, *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*. 49 (2013) 22-27.
- [86] World Health Organization. Regional office for Europe 2010. Guidelines for indoor air quality: select pollutants. (2014).
- [87] L.C. Ng, A. Musser, A.K. Persily, S.J. Emmerich, Indoor air quality analyses of commercial reference buildings, *Build. Environ.* 58 (2012) 179-187.
- [88] World Health Organization. The World Health Report 2002: Reducing risks, Promoting Healthy Life. 2014.
- [89] T. Oyabu, A. Sawada, T. Onodera, K. Takenaka, B. Wolverton, Characteristics of potted plants for removing offensive odors, *Sensors Actuators B: Chem.* 89 (2003) 131-136.
- [90] B.C. Wolverton, J.D. Wolverton, Plants and soil microorganisms: Removal of formaldehyde, xylene, and ammonia from the indoor environment, *Journal of the Mississippi Academy of Sciences*. 38 (1993) 11-15.
- [91] B.C. Wolverton, *How to Grow Fresh Air: 50 House Plants that Purify Your Home or Office*, Penguin books, 1997.
- [92] D. Saelens, S. Roels, H. Hens, Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, *Build. Environ.* 43 (2008) 638-650.
- [93] P. Seferis, P. Strachan, A. Dimoudi, A. Androutsopoulos, Investigation of the performance of a ventilated wall, *Energy Build.* 43 (2011) 2167-2178.
- [94] N. Safer, M. Woloszyn, J.J. Roux, Three-dimensional simulation with a CFD tool of the airflow phenomena in single floor double-skin facade equipped with a venetian blind, *Solar Energy*. 79 (2005) 193-203.
- [95] L. Zalewski, M. Chantant, S. Lassue, B. Duthoit, Experimental thermal study of a solar wall of composite type, *Energy Build.* 25 (1997) 7-18.
- [96] T. Pasquay, Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy, *Energy Build.* 36 (2004) 381-389.
- [97] V. Gavan, M. Woloszyn, F. Kuznik, J.-. Roux, Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with venetian sun-shading device: A full-scale investigation in controlled environment, *Solar Energy*. 84 (2010) 183-195.

- [98] E. Gratia, A. De Herde, Optimal operation of a south double-skin facade, *Energy Build.* 36 (2004) 41-60.
- [99] C. Balocco, A simple model to study ventilated facades energy performance, *Energy Build.* 34 (2002) 469-475.
- [100] C. Popa, D. Ospir, S. Fohanno, C. Chereches, Numerical simulation of dynamical aspects of natural convection flow in a double-skin façade, *Energy Build.* 50 (2012) 229-233.
- [101] C. Cianfrini, M. Corcione, E. Habib, A. Quintino, Energy performance of a lightweight opaque ventilated façade integrated with the HVAC system using saturated exhaust indoor air, *Energy Build.* 50 (2012) 26-34.
- [102] E. Giancola, C. Sanjuan, E. Blanco, M.R. Heras, Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate, *Energy Build.* 54 (2012) 363-375.
- [103] C. Sanjuan, M.J. Suárez, M. González, J. Pistono, E. Blanco, Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade, *Solar Energy.* 85 (2011) 1851-1863.
- [104] Vandaele. L, Wouters. P, The PASSYS Services: Summary report. BBRI & European Commission – Directorate - General (1994).
- [105] E. Hahne, R. Pfluger, Improvements on PASSYS test cells, *Solar Energy.* 58 (1996) 239-246.
- [106] ISO 9869, Thermal Insulation. Building Elements. In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance (1994).
- [107] M.J. Jiménez, H. Madsen, J.J. Bloem, B. Dammann, Estimation of non-linear continuous time models for the heat exchange dynamics of building integrated photovoltaic modules, *Energy Build.* 40 (2008) 157-167.
- [108] K.M. Letherman, C.J. Palin, P.M. Park, The measurement of dynamic thermal response in rooms using pseudo-random binary sequences, *Build. Environ.* 17 (1982) 11-16.
- [109] N. Friling, M.J. Jiménez, H. Bloem, H. Madsen, Modelling the heat dynamics of building integrated and ventilated photovoltaic modules, *Energy Build.* 41 (2009) 1051-1057.
- [110] M.J. Jiménez, H. Madsen, Models for describing the thermal characteristics of building components, *Build. Environ.* 43 (2008) 152-162.

- [111] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Estimation of building component UA and gA from outdoor tests in warm and moderate weather conditions, *Solar Energy*. 82 (2008) 573-587.
- [112] N.R. Kristensen, H. Madsen, S.B. Jørgensen, Parameter estimation in stochastic grey-box models, *Automatica*. 40 (2004) 225-237.
- [113] M.J. Jiménez, B. Porcar, M.R. Heras, Application of different dynamic analysis approaches to the estimation of the building component U value, *Build. Environ*. 44 (2009) 361-367.
- [114] H. Madsen, J. Holst, Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy Build*. 22 (1995) 67-79.
- [115] O. Mejri, E. Palomo Del Barrio, N. Ghrab-Morcos, Energy performance assessment of occupied buildings using model identification techniques, *Energy Build*. 43 (2011) 285-299.
- [116] E. Palomo Del Barrio, G. Guyon, Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools, *Energy Build*. 35 (2003) 985-996.
- [117] M.J. Jiménez, H. Madsen, K.K. Andersen, Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, *Build. Environ*. 43 (2008) 170-180.
- [118] U. Norlén, Estimating thermal parameters of outdoor test cells, *Build. Environ*. 25 (1990) 17-24.
- [119] M.J. Jiménez, M.R. Heras, Application of multi-output ARX models for estimation of the U and g values of building components in outdoor testing, *Solar Energy*. 79 (2005) 302-310.
- [120] P.H. Baker, H.A.L. van Dijk, PASLINK and dynamic outdoor testing of building components, *Build. Environ*. 43 (2008) 143-151.
- [121] A.P. Ramallo-González, M.E. Eames, D.A. Coley, Lumped parameter models for building thermal modelling: An analytic approach to simplifying complex multi-layered constructions, *Energy Build*. 60 (2013) 174-184.
- [122] D.A. Coley, S. Schukat, Low-energy design: combining computer-based optimisation and human judgement, *Build. Environ*. 37 (2002) 1241-1247.
- [123] T. Kershaw, M. Eames, D. Coley, Assessing the risk of climate change for buildings: A comparison between multi-year and probabilistic reference year simulations, *Build. Environ*. 46 (2011) 1303-1308.
- [124] J.J. Bloem, *System Identification Applied to Building Performance Data*, 1994.

- [125] M.G. Davies, Optimum design of resistance and capacitance elements in modelling a sinusoidally excited building wall, *Build. Environ.* 18 (1983) 19-37.
- [126] M.M. Gouda, S. Danaher, C.P. Underwood, Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization, *Build. Environ.* 37 (2002) 1255-1265.
- [127] S. Hammarsten, D. van Hattem, H. Bloem, R. Colombo, Passive solar component testing with identification methods, *Solar Energy.* 41 (1988) 5-13.
- [128] O. Gutschker, Dynastee Scientific Conference. Parameter identification under difficult conditions- How much information is contained in the objective function? (2005).
- [129] O. Gutschker, Parameter identification with the software package LORD, *Build. Environ.* 43 (2008) 163-169.
- [130] A. Rabl, Parameter estimation in buildings: Methods for dynamic analysis of measured energy use., *Journal of Solar Energy Engineering.* 110 (1988) 52-66.
- [131] D. Van Dijk, G. Van der Linden, MRQT user guide; manual for MRQT and the package MRQT/PASTA (1994) 3-40.
- [132] R.E. Kalman, A new approach to linear filtering and prediction problems., - *Journal of Basic Engineering.* 82 (1960) 35-45.
- [133] H. Melgaard, H. Madsen, CTLSM: continuous time linear stochastic modelling. (1994) 41-71.
- [134] N.R. Kristensen, H. Madsen, Continuous time stochastic modelling. CTSM 2.3—user's guide, Technical University of Denmark, 2003.
- [135] K.K. Andersen, H. Madsen, L.H. Hansen, Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations, *Energy Build.* 31 (2000) 13-24.
- [136] Juhl.R, CTSM for R, r package version 0.5.0-12 (2012).
- [137] P. Bacher, H. Madsen, Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, *Energy Build.* 43 (2011) 1511-1522.
- [138] M. Urrestarazu, S. Burés, Sustainable green walls in agriculture, *Journal of Food, Agriculture & Environment.* 10 (2012) 792-794.
- [139] D. Antunes Viegas, A. Palmeira-de-Oliveira, L. Salgueiro, J. Martinez-de-Oliveira, R. Palmeira-de-Oliveira, *Helichrysum italicum*: From traditional use to scientific data, *J. Ethnopharmacol.* 151 (2014) 54-65.
- [140] G.P. van der Linden, H.A.L. van Dijk, A.J. Lock, F. van der Graaf, COMPASS Installation guide HFS Tiles for the PASSYS Test cells (1995).

- [141] PASSYS Operations Manual (1993).
- [142] H.A.L. van Dijk, G.P. van der Linden, PASLINK Calibration and Component Test Procedures (1995).
- [143] P.G. Cesaratto, M. De Carli, S. Marinetti, Effect of different parameters on the in situ thermal conductance evaluation, *Energy Build.* 43 (2011) 1792-1801.
- [144] S. Gil, M. Mayochi, L.J. Pellizza, Experimental estimation of the luminosity of the Sun, *American Journal of Physics.* 74 (2006) 728-733.
- [145] Y. Çengel, Heat and mass transfer. A practical approach, 2007.
- [146] L. Chaerle, D. Van Der Straeten, Imaging techniques and the early detection of plant stress, *Trends Plant Sci.* 5 (2000) 495-501.
- [147] L. Chaerle, W. Van Caeneghem, E. Messens, H. Lambers, M. Van Montagu, D. Van Der Straeten, Presymptomatic visualization of plant-virus interactions by thermography, *Nat. Biotechnol.* 17 (1999) 813-816.
- [148] L. Chaerle, D. Van Der Straeten, Seeing is believing: Imaging techniques to monitor plant health, *Biochimica et Biophysica Acta - Gene Structure and Expression.* 1519 (2001) 153-166.
- [149] M. Lindenthal, U. Steiner, H.-. Dehne, E.-. Oerke, Effect of downy mildew development on transpiration of cucumber leaves visualized by digital infrared thermography, *Phytopathology.* 95 (2005) 233-240.
- [150] E.-. Oerke, U. Steiner, H.-. Dehne, M. Lindenthal, Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions, *J. Exp. Bot.* 57 (2006) 2121-2132.
- [151] H.G. Jones, Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology, *Adv. Bot. Res.* 41 (2004) 107-163.
- [152] M. Wang, N. Ling, X. Dong, Y. Zhu, Q. Shen, S. Guo, Thermographic visualization of leaf response in cucumber plants infected with the soil-borne pathogen *Fusarium oxysporum* f. sp. *cucumerinum*, *Plant Physiology and Biochemistry.* 61 (2012) 153-161.
- [153] Applications of a thermal imaging technique in the study of the ascent of sap in woody species, *Plant Cell Environ.* 16 (1993) 997-1001.
- [154] P.J. Fito, M.D. Ortolá, R. De los Reyes, P. Fito, E. De los Reyes, Control of citrus surface drying by image analysis of infrared thermography, *J. Food Eng.* 61 (2004) 287-290.

- [155] R.S. Pearce, M.P. Fuller, Freezing of barley studied by infrared video thermography, *Plant Physiol.* 125 (2001) 227-240.
- [156] M. Wisniewski, S.E. Lindow, E.N. Ashworth, Observations of ice nucleation and propagation in plants using infrared video thermography, *Plant Physiol.* 113 (1997) 327-334.
- [157] H.G. Jones, M. Stoll, T. Santos, C.D. Sousa, M.M. Chaves, O.M. Grant, Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine, *J. Exp. Bot.* 53 (2002) 2249-2260.
- [158] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy Build.* 33 (2001) 719-729.
- [159] M. Hazbei, O. Nematollahi, M. Behnia, Z. Adib, Reduction of energy consumption using passive architecture in hot and humid climates, *Tunnel. Underground Space Technol.* 47 (2015) 16-27.
- [160] E. Rodriguez-Ubinas, C. Montero, M. Porteros, S. Vega, I. Navarro, M. Castillo-Cagigal, E. Matallanas, A. Gutiérrez, Passive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses, *Energy Build.* 83 (2014) 10-22.