UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

**INFLUENCIA DE LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE LA
ENVOLVENTE EN EL CONFORT TÉRMICO DE UN
EDIFICIO BIOCLIMÁTICO**

TESIS DOCTORAL

Rubén Felices Puértolas

Arquitecto Técnico

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

2017

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN

INFLUENCIA DE LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE LA
ENVOLVENTE EN EL CONFORT TÉRMICO DE UN
EDIFICIO BIOCLIMÁTICO

TESIS DOCTORAL

Rubén Felices Puértolas

Arquitecto Técnico

Máster en Innovación Tecnológica en Edificación

Directores:

Carmen Viñas Arrebola

Doctora por la Universidad Complutense de Madrid

Juan Carlos Losada González

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid

2017

TESIS DOCTORAL

**TITULO: “INFLUENCIA DE LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE LA
ENVOLVENTE EN EL CONFORT TÉRMICO DE UN EDIFICIO
BIOCLIMÁTICO”**

TRIBUNAL NOMBRADO POR EL SR. RECTOR MAGFCO. DE LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, EL
DÍA.....DE..... DE 2017.

PRESIDENTE

D/D^a

VOCALES

D/D^a

D/D^a

D/D^a

SECRETARIO

D/D^a

REALIZADO EL ACTO DE DEFENSA Y LECTURA DE LA TESIS EL
DÍA..... DE..... DE..... EN LA ESCUELA
TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN, ACUERDA OTORGARLE
LA CALIFICACIÓN DE:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

AGRADECIMIENTOS

Al Ayuntamiento de Pozuelo de Alarcón, por suscribir el convenio con la Universidad Politécnica de Madrid que ha permitido llevar a cabo la investigación en el Aula de Educación Ambiental.

A los trabajadores del Aula de Educación Ambiental, por su colaboración infinita a la hora de poner todos los medios posibles a nuestra disposición. Gracias por las facilidades dadas para la realización de todas las campañas de monitorización llevadas a cabo desde el año 2013 en el edificio CREAS.

A Antonio Baño, arquitecto del edificio, por haber diseñado esa obra de arte que ha pasado a formar parte de mi vida.

A la Escuela Técnica Superior de Edificación, y a los Departamentos de Tecnología de la Edificación y de Construcciones Arquitectónicas y su Control, que nos han facilitado todos los instrumentos de medida y equipos que se han empleado para llevar a cabo las investigaciones.

A mis compañeros de la ETSEM: Pablo, Alejandro, Luisa, Naiane y Eugenia, por colaborar conmigo en la fase experimental de la investigación y por darme ánimos en los largos días de redacción de esta tesis.

A Carmen y Juan Carlos, mis directores de tesis. Sin su experiencia, su colaboración y sus ánimos estoy seguro de que ahora mismo no estaría escribiendo estas líneas.

A Bea, quien durante estos cinco años me ha ayudado siempre que lo necesitaba, en los buenos y en los malos momentos.

A mi familia, mi padre, mi madre y mi hermano, por darme la libertad de poder hacer lo que me gusta y haberse mostrado siempre orgullosos por todo lo que he ido consiguiendo en la vida.

Muchas gracias a todos

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	1
RESUMEN	5
ABSTRACT	7
I. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO	9
II. OBJETIVOS	10
III. INTRODUCCIÓN	11
1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	13
1.1. ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA	13
1.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA. 15	
1.3. PROPUESTAS CONSTRUCTIVAS USADAS EN EL EDIFICIO BASADAS EN CRITERIOS BIOCLIMÁTICOS	18
1.3.1. Orientación y aberturas	19
1.3.2. Espacios invernadero	23
1.3.3. Muro Trombe	26
1.3.4. El suelo como acumulador de energía térmica	30
1.3.5. Ventilación por medios naturales	33
1.3.6. Edificio semienterrado con muro de tierra	37
1.3.7. Técnicas para la prevención del sobrecalentamiento por sombreamiento	41
1.3.8. Cubierta con cobertura vegetal	44
2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN EDIFICIO	50
2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	51
2.1.1. Mecanismo de transferencia de calor: Conducción	51
2.1.2. Mecanismo de transferencia de calor: Convección	53
2.1.3. Mecanismo de transferencia de calor: Radiación	53
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE DE UN EDIFICIO	56
2.2.1. Procedimiento de cálculo de la demanda energética	58
2.2.2. Procedimiento de evaluación de la sensación térmica	60
2.3. MARCO NORMATIVO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. REQUERIMIENTOS ACTUALES	65

2.3.1.	Directiva europea 2010/31.....	66
2.3.2.	Normativa y reglamentación española	67
2.3.3.	Descripción de otros procedimientos: DOE-2, LEED, PASSIVHAUS... ..	68
2.4.	MONITORIZACIÓN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS....	70
2.4.1.	Monitorización de edificios	70
2.4.2.	Simulación del comportamiento energético de edificios.....	74
2.4.3.	Validación de los resultados obtenidos por las simulaciones.....	85
2.4.4.	Diferencias entre los datos experimentales y los resultados simulados ...	86
3.	METODOLOGÍA	87
3.1.	UBICACIÓN DEL EDIFICIO ESCOGIDO PARA LA INVESTIGACIÓN .	87
3.1.1.	Descripción del edificio CREAS.....	88
3.2.	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN	96
3.2.1.	Propuesta experimental: Del diseño completo del edificio a la influencia de cada sistema constructivo	96
3.2.2.	Procesos experimentales de ensayos y evaluación de los equipos empleados.....	97
3.2.3.	Monitorización del edificio	101
3.2.4.	Descripción del procedimiento seguido para la creación del modelo simulado108	
4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	111
4.1.	CARACTERIZACIÓN DEL EDIFICIO POR PATRONES ESTACIONALES Y DE OCUPACIÓN	111
4.2.	CAMPAÑAS ESTACIONALES PARA LA MONITORIZACIÓN DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PASIVOS ESTUDIADOS	113
4.2.1.	Comportamiento térmico del módulo 1: Invernadero, aula y oficina.....	113
4.2.2.	Cubierta vegetal	145
4.2.3.	Muro Trombe.....	156
4.3.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO A LO LARGO DE UN AÑO COMPLETO	164
4.3.1.	Implantación del sistema de monitorización en el edificio	164
4.3.2.	Incidencias durante la campaña de monitorización.....	166
4.3.3.	Campaña anual de monitorización en el edificio.....	167
4.3.4.	Consumo energético del edificio a lo largo del año	193

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EDIFICIO	194
5.1. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO GENERADO DEL EDIFICIO	195
5.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS EN EL EDIFICIO	198
5.2.1. Aleros del edificio	199
5.2.2. Invernaderos	205
5.2.3. Cubierta vegetal	211
5.2.4. Renovación de aire	214
5.2.5. Orientación del edificio	219
5.2.6. Edificio sin envolvente enterrada	229
6. CONCLUSIONES.....	233
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	238
ÍNDICE DE CALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA EN ESTA TESIS.....	239
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	240
GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS	252
LISTA DE FIGURAS.....	254
LISTA DE TABLAS.....	265
ANEXOS	266
ANEXO A. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DEL EDIFICIO EN ESTUDIO	266
ANEXO B. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA CAMPAÑA ANUAL DE MONITORIZACIÓN DEL EDIFICIO	274
ANEXO C. MODELIZACIÓN DEL EDIFICIO CON EL PROGRAMA DESIGNBUILDER	301

RESUMEN

El avance de la ciencia y la tecnología en las últimas décadas ha diversificado enormemente las soluciones constructivas que se pueden adoptar en un edificio. A su lado, la normativa a escala nacional e internacional se ha ido enriqueciendo del conocimiento, por lo que el estándar constructivo también ha ido mostrando un aumento en los requerimientos exigidos a la hora de construir los edificios. Sin embargo, muchas de las soluciones constructivas que se adoptan en los edificios no dejan de ser redefiniciones de estrategias constructivas que se llevan adoptando desde siempre.

Actualmente, no solo encontramos corrientes constructivas en que todas las necesidades de un edificio se resuelvan con tecnologías avanzadas, sino que también encontramos una corriente constructiva en que la única premisa es el aprovechamiento de las condiciones circundantes al edificio y la simplicidad en su diseño.

El trabajo realizado en esta tesis se enmarca dentro del análisis del comportamiento térmico y energético de un edificio en el que se han incorporado, en la fase diseño, estrategias pasivas que permitan cumplir los requerimientos expuestos en las normativas vigentes a través de soluciones que no provoquen un importante impacto ambiental.

La metodología empleada en esta investigación se inicia con el estudio del estado actual del conocimiento centrado en la búsqueda de estudios experimentales y teóricos que incorporen algún sistema pasivo en el ámbito de la edificación. En este trabajo de investigación se ha elegido al edificio denominado como Centro de Recursos de Educación Ambiental para la Sostenibilidad (CREAS) como caso de estudio, al tratarse de un edificio en el que se han incorporado la mayoría de sistemas pasivos encontrados en la literatura.

El análisis del edificio se ha realizado mediante un modelo experimental y un modelo simulado. Entre los años 2013 y 2016 se llevaron a cabo diversas campañas de monitorización, centradas en algunas de las estrategias pasivas empleadas en su diseño; así como una campaña anual de monitorización para completar el conocimiento del comportamiento térmico conseguido en el edificio, como consecuencia de la incorporación de las estrategias pasivas. Finalizada la campaña experimental y el análisis del registro de datos obtenido, se incorporó a la investigación un modelo de simulación numérica, con el propósito de contrastar los resultados numéricos con los datos experimentales.

Los resultados experimentales obtenidos muestran cómo se alcanzan mayores temperaturas en el edificio en invierno que en verano. La influencia de la longitud de los aleros, que bloquean la radiación solar en verano pero la permiten en invierno, es fundamental para conseguir este resultado. Debido a su horario de apertura, la estrategia de ventilación nocturna resulta necesaria para el verano. Dado el empleo de materiales naturales y soluciones simples, una mayor estanqueidad en invierno sería requerida para

conseguir mejores resultados en el confort térmico. La estrategia de ubicar al edificio completamente orientado hacia el sur resulta en una solución óptima para la reducción del consumo energético sin provocar temperaturas excesivas en el interior del edificio. Del mismo modo, el haberlo construido semienterrado por su cara norte le confiere de una protección sobre las condiciones climáticas exteriores, mejorando su consumo energético y reduciendo las temperaturas en verano. No todas las estrategias empleadas suponen ventajas a lo largo de todo el año, pero no acarrearán perjuicios severos en el comportamiento térmico del edificio durante el resto del año. Para la cuantificación de la influencia de las estrategias pasivas, es necesario un modelo simulado del edificio.

ABSTRACT

The great advances made in science and technology during the last decades has diversified the constructive solutions than can be adopted in a building. At the same time, national and international regulations have enhanced their technical requirements when a building is designed. However, many of the constructive solutions that are adopted in the buildings are no more than redefinitions of constructive strategies that have been adopted since always.

Currently, we can find trends about constructive completely based in the recent advances in technology. But we can also find constructive trends in which the only premise is the use of the surrounding conditions of the building site, and the simplicity in its design.

The research carried out in this thesis is framed by the analysis of the thermal behavior, the thermal comfort and the energy use of a bioclimatic building. In the design phase, passive strategies were incorporated as alternative solutions to meet the requirements established by the current regulations. Also, the carbon footprint was considered, in order to minimize and adopt the right construction systems employed in the building.

The methodology used in this research begins with the study of the current state of knowledge, focused on the search for experimental and theoretical studies that incorporate passive strategies in the field of building. In this research, the building called the Environmental Education Resource Center for Sustainability (CREAS) has been chosen as a case study, since it is a building in which the majority of passive strategies found in the literature have been incorporated.

The analysis of the building was made carrying out monitoring campaigns and a simulated model using DesignBuilder. Between the years 2013 and 2016, several monitoring campaigns were carried out, focusing on some of the passive strategies of the building. As well as an annual monitoring campaign to achieve a general knowledge of the thermal behavior in the building. After the monitoring campaigns and the analysis of the obtained data, a numerical simulation model was added to the research in order to compare the numerical results with the experimental data, in order to show some numerical conclusions about the influence of the passive strategies employed in the building.

The experimental results obtained show higher temperatures in the building in winter than in summer. The influence of the length of the eaves, which block the solar radiation in summer but allow it in winter, is fundamental to achieve this result. The building is open from 8AM to 3PM, so the strategy of night ventilation cannot be applied in the summer. Greater air tightness would be required to achieve better results in thermal comfort in winter. Locating the building completely oriented towards the south results in an optimal solution for the reduction of the energy consumption,

without overheating inside the building. Having built it half-buried by its north face gives it a protection against external climatic conditions, reducing its energy consumption in winter and enhancing warm temperatures in summer. Not all of the strategies used in this building cause advantages the whole year, but they do not cause severe damage to the thermal behavior of the building during the rest of the year. The evaluation of the influence due to the passive strategies requires a simulated model of the building for its quantification.

I. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

La Directiva Europea 2010/31/UE, considera que un edificio de consumo de energía casi nulo es un edificio “que tiene un nivel de eficiencia energética muy alto porque requiere un nivel de energía casi nula o muy baja para funcionar y que en muy amplia medida esta energía procede de fuentes de energía renovables, bien producidas in situ valorando las condiciones climáticas tanto generales como locales del lugar donde se edifica”.

Esta directiva, también, establece la obligatoriedad para la construcción, de este tipo de edificios de bajo consumo energético, a partir de 2020 y en el caso de edificios públicos partir de 2018. Paulatinamente, los edificios existentes también se irán transformando en edificios con demanda de energía casi nula, con el fin de favorecer la eficiencia energética en la edificación, de acuerdo a los planes nacionales que se establezcan en los países miembros de la Unión Europea.

Todavía, no se ha definido de forma clara en España un “Edificio de consumo de energía casi nulo”. No obstante, encontramos bastantes ejemplos en los que se incorporan características y sistemas que permiten necesitar poca energía para funcionar, que utilicen recursos naturales del lugar donde se ubican y que son respetuosos con el medio ambiente. Todos estos aspectos son más que una tendencia, que están marcando el presente y el futuro del parque de viviendas tanto residencial, como en el ámbito de edificación terciaria pública y privada.

Actualmente, a la hora de diseñar un edificio, bajo parámetros de energía casi nula, el técnico cuenta, por un lado, de gran libertad en el diseño y de tecnología constructiva eficiente, pero por otro tiene que dar respuesta tanto a normativas europeas como a normativas propias del país que le obligan a cumplir requerimientos que debe de justificar, llegando frecuentemente a plantearse soluciones contradictorias.

El desarrollo de herramientas informáticas para análisis de datos y para simulación numérica está permitiendo evaluar un edificio construido con criterios que den respuesta, en alguna medida, al edificio de consumo de energía muy baja. Los resultados obtenidos, en realidad, no tienen un refrendo experimental que justifique la veracidad de los resultados. Por otro lado, no se han constatado análisis de edificaciones construidas con criterios que convergen a una optimización de edificio con consumo de energía muy baja y que demuestren los buenos resultados obtenidos. Este contexto motiva la realización de esta tesis doctoral y la justificación de su desarrollo.

II. OBJETIVOS

El **objetivo general** se enmarca en analizar y cuantificar con profundidad la contribución de un edificio diseñado con criterios bioclimáticos, tanto para mejorar el confort térmico de los usuarios como para su contribución en la disminución del consumo energético.

Como objetivo general, también, se valora la fiabilidad de los métodos utilizados habitualmente para cuantificar el confort térmico en el interior de un edificio.

Finalmente, se pretende extrapolar los resultados obtenidos al resto del parque inmobiliario actual, tanto a edificios residenciales como a edificios terciarios, públicos y privados.

Los objetivos generales se conseguirán a través de los siguientes **objetivos específicos**:

- La selección de un edificio en cuyo diseño haya utilizado estrategias pasivas en su envolvente y la caracterización completa de cada uno de los sistemas constructivos diseñados en el edificio.
- La elección de instrumentos de medida adecuados para el objetivo general establecido y la generación de un procedimiento de monitorización adecuado al edificio, que incluya la justificación de la elección de los intervalos de toma de datos y la posición de los instrumentos de medida.
- Establecer patrones de comportamiento del edificio y los usuarios para el diseño del modelo experimental, así como un registro de la base de datos de las variables físicas a analizar durante el estudio estrategias pasivas elegidas.
- Realizar, por un lado, campañas de monitorización diferentes en función de las estrategias pasivas estudiadas en cada caso, y por otro una campaña general de monitorización del edificio, con el objeto de identificar la influencia de cada estrategia pasiva dentro del comportamiento general del edificio.
- Análisis cualitativo y cuantitativo, en la fase experimental, del confort térmico del edificio, según periodos estacionales y constatación de los métodos utilizados para la caracterización.
- Validar un modelo simulado del edificio elegido, realizando su calibración en base a los registros de datos obtenidos en la fase experimental.
- El modelo numérico simulado del edificio debe permitir la inserción de modificaciones en los modelos numéricos que permitan observar la influencia de cada una de las estrategias pasivas incorporadas al edificio.
- A través de estos modelos numéricos simulados del edificio se debe poder cuantificar su aportación al confort térmico y el ahorro energético que se consigue con la incorporación, al diseño de un edificio, de las estrategias pasivas descritas en esta investigación.

III. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, según la latitud y el clima en la región, las soluciones constructivas adoptadas han nacido con motivaciones completamente opuestas. Mientras que en el norte de Europa se minimizaba la exposición del edificio a la intemperie para impedir la pérdida de energía térmica, en las regiones cálidas se adoptaba esa misma solución para evitar la ganancia de energía térmica a través de la envolvente. Al tiempo que en oriente medio se cerraban las aperturas de huecos con orientación hacia el sol, en zonas templadas de Europa se promovía la creación de espacios acristalados, que consiguiesen un efecto invernadero, para aumentar la cantidad de energía térmica en el interior de los edificios. En la actualidad, desde los países del norte de Europa se están desarrollando corrientes constructivas que buscan la estanqueidad del edificio hacia el exterior, mientras que en regiones tropicales se sigue imponiendo la apertura completa del edificio para rebajar la sensación térmica de calor.

En nuestro país nos encontramos a medio camino entre las condiciones climáticas que motivan unas y otras estrategias, con un invierno severo debido a nuestra elevada latitud, aunque también contamos con un verano muy cálido. Por lo tanto, es un campo de trabajo perfecto para aglutinar todas las estrategias pasivas que se han desarrollado en todo el mundo.

Mientras que la mayoría de edificios construidos en la actualidad se centran en su diseño siguiendo solamente alguna de las estrategias pasivas, en esta tesis traemos la investigación sobre un único edificio bioclimático en el que se encuentran la mayoría de las estrategias que podemos encontrar a lo largo de todo el mundo.

Por ello, hemos decidido estructurar la tesis comenzando por el estudio de la experiencia que existe sobre las estrategias pasivas que nos hemos encontrado en el edificio estudiado. Una vez conocido el potencial que se puede esperar de cada una de ellas, hemos establecido un programa de experimentación con el objeto de poder dar respuesta a muchas de las propuestas de mejora encontradas durante el estudio de las estrategias pasivas. También ha sido encaminado a poder determinar de forma separada la influencia de cada una de las estrategias pasivas incorporadas al edificio dentro del comportamiento térmico general.

Además, el análisis experimental ha sido enfocado desde el cumplimiento por el edificio estudiado de las normativas vigentes, tanto a nivel nacional como internacional, para poder abstraer los resultados conseguidos a otros campos y lugares de estudio donde los requerimientos sean diferentes a los que nos encontramos en España.

Como último paso en esta investigación, se ha contemplado el empleo de una herramienta informática para la simulación de edificios utilizada a nivel mundial, de forma que se pueda cuantificar la importancia de las estrategias pasivas diseñadas en el edificio bioclimático estudiado.

Pocas investigaciones se realizan, en edificios a escala real, de forma simultánea en el campo experimental y en el campo simulado, por lo que, de la mayoría de estrategias pasivas se conocen sus bondades por estimaciones y se decide su incorporación al diseño en función de las tradiciones constructivas. En esta tesis, hemos querido aunar la vertiente experimental y la de modelización informática, con el fin de poder demostrar y cuantificar cuál es la importancia real de todas las estrategias seguidas en el diseño del edificio. El cual, aún con su singularidad en cuanto al diseño bioclimático presenta soluciones constructivas tan simples que pueden ser implementadas de forma sencilla a la mayoría del parque inmobiliario actual.

1. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

A lo largo de este capítulo intentamos realizar una definición precisa de lo que se entiende actualmente sobre la arquitectura bioclimática, que será de utilidad para comprender la investigación desarrollada a lo largo de esta tesis. Vamos a abordar el análisis de la arquitectura bioclimática desde diferentes puntos de vista: históricos, evolutivos, sociales, técnicos, tecnológicos y antropomórficos.

Entendemos por arquitectura bioclimática al diseño del edificio teniendo en cuenta la calidad del ambiente interior y la reducción del impacto sobre el entorno. La calidad del ambiente interior engloba las condiciones de temperatura, humedad, confort lumínico, salubridad, aislamiento acústico y la calidad del aire en su interior. La reducción del impacto sobre el entorno se consigue al adaptar el diseño y los sistemas constructivos empleados en función de la disponibilidad de determinados materiales en el entorno de la ubicación del edificio. En los últimos años, el avance tecnológico ha permitido superar muchos límites básicos en las condiciones de habitabilidad de los edificios, pero también ha servido para conocer el gran potencial que se nos brinda desde la propia tierra. En este sentido, también la generación de energía por medios naturales ha permitido reducir de forma importante el impacto de la edificación en el medio ambiente.

1.1. ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

La concepción de un edificio bajo premisas bioclimáticas se encuentra mucho más extendida de lo que aparenta, ya que la mayoría de soluciones constructivas que se adoptan en un proyecto buscan de forma indirecta la satisfacción de estas necesidades. Ya desde la época antigua, se han recogido recomendaciones para satisfacer las necesidades de los usuarios en el interior de la vivienda, como “Los diez libros de arquitectura” (Figura 1). Un tratado de arquitectura de Marco Vitruvio Polión (Polion, 1985), quien realiza un compendio de todos los aspectos a considerar al construir un edificio. En su libro, desarrolla la teoría constructiva en función de la adaptación al lugar de construcción, los materiales que se han emplear, sus procesos constructivos y las condiciones interiores de salubridad. Desde entonces, multitud de trabajos han ido aportando apreciaciones al respecto de las condiciones a cumplir en el diseño de un edificio. La técnica y la tecnología han conseguido avances para favorecer la habitabilidad de los edificios. Estos avances, junto con la normativa desarrollada en los últimos años, han mejorado significativamente el estándar de construcción conseguido en cualquier proyecto de edificación.

Figura 1. Los diez libros de arquitectura (Vitruvio). Fuente: Alianza forma

Actualmente, el estudio de la fachada de un edificio no se limita a sus formas, a la disposición de las columnas o a la proporción entre altura y anchura, como expone Vitruvio. En el último siglo, la normativa vigente ha incorporado límites en cuanto a la transferencia de calor a través de la envolvente, lo que ha llevado a la introducción de capas de aislamiento en la fachada. Pero en los últimos años, este límite se ha elevado hasta llegar a la resolución de detalles constructivos. La eliminación de los puentes térmicos del edificio, la elección de los materiales para la envolvente en función de la condensación de la humedad, o la mejora en la carpintería utilizada en el proyecto, ayudan a obtener unas mejores condiciones interiores. Todos ellos se consideran integrados dentro del concepto de arquitectura bioclimática.

También se considera arquitectura bioclimática a aquellas estrategias que conllevan la reducción de la huella ecológica del edificio. Queda recogido en la normativa desarrollada en los últimos años la cuantificación de la energía consumida en todo el proceso constructivo: desde la extracción y fabricación hasta el transporte y colocación de los materiales en el lugar de construcción. Como parte de esta estrategia de arquitectura bioclimática se entiende la utilización de los materiales propios de la región, como la madera en el norte de Europa, piedra en España o adobe en África.

Del mismo modo, edificios bioclimáticos se consideran a aquellos que se adaptan morfológicamente a la orografía circundante, como en el caso de las cuevas excavadas en las laderas, encontradas en el sur de España, en Antioquía o en el norte de África. A la tipología constructiva y edificatoria desarrollada históricamente en cada región del mundo se la conoce como arquitectura vernácula.

Otra forma de entender la arquitectura bioclimática también consiste en aprovechar las condiciones climáticas del lugar, en beneficio del funcionamiento del edificio. En este sentido, encontramos ejemplos como el aprovechamiento del agua de lluvia, la orientación del edificio en función de la dirección predominante del viento, o su orientación para el aprovechamiento de la radiación solar.

A partir de la revolución industrial, el desarrollo de nuevas tecnologías también ha influido en la forma de avanzar en el estudio de estas estrategias, y en la optimización

de la ejecución de las mismas. Las diferencias encontradas en la concepción de los edificios desde hace miles de años son debidas a las condiciones climáticas exteriores, y sólo en los últimos años se han encontrado ejemplos que sumen las ventajas de las estrategias encontradas en varias zonas del mundo, como es el caso que se analiza en esta tesis. Por todo ello, un análisis histórico de los diferentes casos de arquitectura bioclimática encontrados, y su evolución, se hace necesario para comprender el estado actual del conocimiento para el diseño bioclimático de un edificio.

1.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

En función de la latitud en la que nos encontremos, las condiciones climáticas condicionan las estrategias constructivas que se pueden aplicar al edificio. A las estrategias constructivas que pretenden aprovechar las condiciones circundantes a la ubicación del edificio, se las conoce como estrategias pasivas.

En zonas de elevada latitud, encontramos edificaciones muy antiguas (arquitectura vernácula) que se adaptaron a las condiciones circundantes para la construcción de edificios, aunque en la actualidad se siguen encontrando ejemplos que imitan esas circunstancias.

La Figura 2 muestra dos ejemplos de arquitectura vernácula en Escandinavia, en ellas se emplea la solución constructiva de cubiertas con cobertura de tierra y vegetación, de menor conductividad que la piedra, debido a la necesidad de protegerse de las temperaturas significativamente bajas. En cuanto a la orientación se consideraba la dirección predominante del viento, mejorando su aerodinámica para reducir el impacto y la difusividad térmica del aire sobre la envolvente. La apertura de huecos se realizaba en función del recorrido solar, para permitir la máxima radiación posible. Por otra parte, el uso de maderas en el interior, con una buena inercia térmica, permite que el calor generado permanezca en el interior del edificio durante más tiempo.

Figura 2. Arquitectura vernácula en Escandinavia. Fuente: DelToro&Antunez

En la actualidad se pueden seguir encontrando edificios de similares características (Figura 3). Las diferencias entre las construcciones actuales y las antiguas radican en la calidad de los materiales y en la integración de los avances tecnológicos en el edificio,

lo que permite optimizar la captación de la energía solar con la apertura de mayores huecos orientados al sur.

Figura 3. Arquitectura bioclimática moderna en Escandinavia. Fuente: blog.arquitecturadecasas.info

En latitudes cercanas al trópico, donde el condicionante climático es el calor, las estrategias para combatir las altas temperaturas se centraban en evitar la entrada de la radiación solar y la acumulación del aire caliente en su interior. Sus calles eran muy estrechas, para evitar el impacto solar, y las casas se componían de varios niveles, con un patio interior que forzaba la ventilación natural por diferencia de densidad del aire. Otro criterio empleado fue ejecutar los edificios enterrados, que permiten protegerse de la temperatura ambiente aprovechando la inercia térmica del terreno. Combinando todas estas estrategias surgieron diferentes formas arquitectónicas, como se puede ver en la Figura 4.

Figura 4. Arquitectura vernácula en África y Oriente Medio. Fuente: google.es, sin referencia explícita

Actualmente, el paradigma de un proyecto que se adapte a las condiciones climáticas de estas latitudes lo encontramos en la ciudad de Masdar (Figura 5), situada en el Emirato Árabe de Abu Dabi. Se trata de una ciudad concebida por completo como ecológica, eficiente, bioclimática y dedicada a la investigación.

En ella se observan las mismas estrategias que en la época antigua: el túnel del viento como método de difusión del aire caliente y la protección solar de la envolvente, con aberturas orientadas, para evitar la radiación solar directa.

Figura 5. Ciudad de Masdar, Abu Dabi. Fuente: Foster&partners

En climas templados, para latitudes entre 35° y 60° , se da una mezcla entre los ejemplos mostrados previamente. La intensidad de radiación solar y las temperaturas no son tan extremas en verano, pero generan una demanda de refrigeración en los edificios. En invierno, la temperatura media exterior se encuentra por debajo de la temperatura de confort térmico que establece la normativa española y europea. En estas zonas, la mayor superficie de huecos debe de ser proyectada en la fachada orientada hacia el sol, para aprovechar la radiación solar en invierno. La protección solar en verano se consigue de forma similar a la utilizada en los climas cálidos. Ambas soluciones constructivas se muestran en la Figura 6.

**Figura 6. Arquitectura tradicional en climas templados (casa de campo en Inglaterra y patio cordobés).
Fuente: google.es, sin referencia explícita**

En las últimas décadas se han desarrollado multitud de proyectos que solventan, con ayuda de la tecnología, los rigores del clima, orientando las aberturas hacia el sur para permitir la radiación solar en invierno y evitar la radiación solar directa en verano, con la ayuda de protecciones solares, innovadoras en algunos casos. Sin salir de la comunidad de Madrid, encontramos dos claros ejemplos, mostrados en la Figura 7.

Figura 7. Arquitectura moderna en la Comunidad de Madrid. Fuente: 100x100 madera y Telefónica

Para climas tropicales, las estrategias llevadas a cabo cambian radicalmente debido a que el clima predominante se caracteriza por altas temperaturas y humedad. Las estrategias de edificación tienden a evitar la acumulación de calor en el interior, permitiendo la transición del aire (Figura 8). Como consecuencia de las altas temperaturas constantes, la única manera de evitar la sensación de calor es aumentar la renovación del aire (permitiendo su entrada de forma natural) para favorecer la difusividad térmica y disminuir la sensación de calor.

Figura 8. Arquitectura tradicional y moderna en Indonesia. Fuente: google.es, sin referencia explícita

1.3. PROPUESTAS CONSTRUCTIVAS USADAS EN EL EDIFICIO BASADAS EN CRITERIOS BIOCLIMÁTICOS

Descrita la evolución de la arquitectura bioclimática en diferentes regiones del mundo, en este apartado se explican, de forma detallada, las estrategias pasivas dentro de la disciplina de la arquitectura bioclimática que han sido empleadas en el edificio elegido para su investigación en esta tesis. Cada una de ellas afecta de manera diferente al edificio y su influencia puede ser diferente para cada estación del año, por lo que su descripción va a ser de forma estacional.

En un país como España, donde los climas dominantes son el templado continental y el mediterráneo, las estrategias a realizar en un edificio son diferentes para las estaciones de invierno y de verano. Durante el invierno, las estrategias deben estar concentradas en la captación solar por la envolvente, para disminuir la demanda energética de calefacción del edificio. En este sentido podemos encontrar estrategias de captación

solar directa por los huecos y aberturas, con lazo conductivo para distribuir la energía térmica hacia el interior del edificio, o retardadas que mantengan el calor en la masa térmica en el periodo nocturno. Durante el verano, estas estrategias provocan problemas en el edificio, fundamentalmente de sobrecalentamiento, y deben estar acompañadas por otras que modifiquen su comportamiento en la época estival; la colocación de cortinas y aleros previenen del sobrecalentamiento en el interior del edificio, actuando sobre la radiación solar directa. Por efecto de evapotranspiración nos encontramos con la disposición de coberturas vegetales en el edificio. Otra estrategia empleada, de utilidad durante el verano, es la eliminación del sobrecalentamiento por difusión del aire, mediante ventilación natural. Todas ellas han sido incluidas en el edificio elegido para la realización de esta tesis y van a ser descritas desde un punto de vista constructivo.

Para realizar una clasificación estandarizada de los sistemas constructivos empleados, se ha usado como referencia la propuesta por F. Javier Neila González en su libro “Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible” (Neila González, 2004).

1.3.1. Orientación y aberturas

A pesar de contar en España con un clima donde la relevancia del verano es importante, la demanda calorífica invernal supera, en gran parte de la península, a la estival. Es por ello que la configuración arquitectónica idónea de un edificio bioclimático debe seguir el recorrido solar. En España el sol se encuentra en la orientación sur del edificio, saliendo por el este y poniéndose por el oeste. El recorrido solar en el edificio estudiado se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Recorrido solar en Madrid (solsticio de invierno). Fuente: Elaboración propia

Con esta estrategia se pretende actuar sobre la captación solar directa del edificio, provocando el calentamiento del aire interior y el aprovechamiento de la energía térmica que penetra a través de la envolvente. En el edificio estudiado se han empleado ventanales en la fachada sur y tragaluces en el techo del edificio.

Una recomendación general para nuestra latitud establece que los recintos calefaccionados deben orientarse preferentemente hacia el sur, así como la orientación de los espacios comunes y los no calefaccionados hacia el norte. Un ejemplo muy claro se puede encontrar en Móstoles (Madrid), con el edificio Hemiciclo solar (Figura 10), diseñado por RUIZ-LARREA & ASOCIADOS.

Figura 10. Hemiciclo solar, orientación sureste a la izqda. y noroeste a la dcha. Fuente: RuizLarrea.com

En este edificio, la apertura de huecos con orientación sureste permite que la radiación solar impacte en las primeras horas del día, hecho que coincide habitualmente con las temperaturas más bajas en un día invernal. Por el contrario, la orientación noroeste coincide con las horas de temperaturas más altas en verano y con la menor radiación solar directa en invierno, por lo que se han ubicado en este edificio servicios de comunicación, que no condicionan la actividad de los usuarios durante esas horas.

Para edificaciones de viviendas, las orientaciones norte y oeste son las habitualmente elegidas para la ubicación de cuartos húmedos como baños y cocina, siendo las sur y este las apropiadas para cuartos de estar y dormitorios. En el caso de edificios terciarios de oficinas, las orientaciones norte y oeste son recomendables para la disposición de recintos comunes, espacios de distribución vertical del edificio y recintos con usos puntuales; dejando los despachos para la orientación sur.

En otras edificaciones terciarias, como son centros comerciales o deportivos, el aprovechamiento solar se suele realizar por la cubierta, debido a sus elevadas superficies de cubierta en comparación con la altura. En este caso, el material empleado para permitir la entrada de radiación son los vidrios, quienes a efecto de la luz de onda visible son transparentes (Figura 11). El vidrio es un material amorfo cuya transmitancia es mayor que la mayoría de sólidos no metálicos, por ello se han desarrollado tecnologías, en los últimos años, para reducir la pérdida de energía térmica por su superficie. En este sentido, hace medio siglo se empezaron a utilizar doubles vidrios para disminuir esta pérdida de energía térmica, mientras que en la actualidad se encuentran soluciones triples de vidrio, con una transmitancia similar a la de un muro opaco.

La mejora en el conocimiento de las características del vidrio ha permitido reducir la cantidad de energía emitida hacia el exterior. La reducción de la emisividad en la cara interior de estos vidrios minimiza en un alto porcentaje la cantidad de energía que se

pierde por radiación a través del vidrio, entre el interior y el exterior del edificio, produciéndose un efecto invernadero.

Figura 11. Efecto de la radiación solar sobre muros y ventanas. Fuente: Elaboración propia

Esta mejora en las características de la carpintería también se ha plasmado en la mejora de la conexión de las ventanas con el sistema constructivo opaco, reduciendo los puentes térmicos entre ellas, así como la cantidad de aire que se introduce por filtración a través del marco de las ventanas. Conceptos como rotura de puente térmico ya se han implementado en las regulaciones que establecen el tipo de ventana que se ha de colocar en un edificio.

Todas estas consideraciones han sido recogidas en diferentes estudios, relacionando la influencia de la orientación de las aberturas y del edificio con el consumo final de energía. Una publicación de Edna Shaviv (Shaviv, 1981) determina la influencia de la orientación de la superficie acristalada en el consumo energético total de un edificio. Los análisis se llevaron a cabo sobre un recinto de oficina con las condiciones climáticas de Tel Aviv, que originariamente fue situado con orientación sur. Sobre esta orientación realizaron modificaciones de 30° hacia el este y hacia el oeste. Los resultados numéricos de su estudio determinaron que la mejor orientación en ambas estaciones del año era la del sur, mientras que las conclusiones respecto de las variaciones en el ángulo se modifican en función de la estación del año. Durante el invierno, la orientación al este mostraba un incremento en el consumo energético del 24%, mientras que en el oeste era del 18%. Para la demanda de energía en verano, la orientación de 30° hacia el este sólo mostraba un incremento del 2% en consumo respecto de la orientación sur, mientras que la orientación de 30° hacia el oeste incrementaba el consumo en un 26%.

Un estudio sobre el consumo de energía calorífica de un recinto, llevado a cabo por Teoman Aksoy y Anilli (Aksoy & Inalli, 2006), concluye que la orientación del recinto influye en el consumo anual, siendo la orientación sur la que menos demanda de energía genera en el edificio. Para llegar a esta conclusión realizaron simulaciones numéricas

sobre el modelo de un recinto con diferentes formas, calculando la demanda energética en cada orientación durante un año completo. Los modelos empleados son cuadrados y rectangulares, con dos versiones en función de la situación de los lados largos y los lados cortos (relación de forma 2:1 ó 1:2). Todos ellos contaban con dos orientaciones protegidas por el edificio y dos expuestas a la intemperie. Cabe destacar en este trabajo que, para recintos rectangulares, la menor demanda se alcanza cuando el lado largo del rectángulo se orienta hacia el sur, mientras que para recintos cuadrados se produce cuando se orientan en forma de rombo, con las aberturas expuestas a la intemperie en las orientaciones sureste y al suroeste.

Florides et al. (Florides, Tassou, Kalogirou, & Wrobel, 2002) realizan una simulación dinámica sobre un modelo de edificio en el que cuantifican los flujos de energía en casas ubicadas en la isla de Chipre, con el propósito de examinar medidas que reduzcan la demanda calorífica de energía. Sobre el edificio modelado, la distribución interior divide la planta en cuatro recintos iguales, de manera que cada uno de ellos está expuesto a la intemperie por dos orientaciones. El resultado indica que, para un edificio de forma cuadrada, la demanda de energía es menor cuando se encuentra orientado por los cuatro puntos cardinales, mientras que para un edificio con forma rectangular, la menor demanda se produce cuando la menor área se orienta hacia el este ya que, aunque el resultado es que el área de fachada en la cara norte es mayor, también lo es en su cara sur, por lo que maximiza la ganancia de energía a través de esta cara.

Hasta ahora, las investigaciones se han centrado en la relación de forma del edificio, sin importar su altura. La investigación realizada por Morrissey et al. (Morrissey, Moore, & Horne, 2011) sí que estudia esta característica a través del análisis del comportamiento térmico de 81 formas básicas de edificaciones de una sola planta, con las respectivas modificaciones en la orientación de cada modelo simulado en intervalos de 45°. Los resultados indican que las casas compactas en la relación superficie-altura son menos influenciadas por las modificaciones en la orientación que aquellas casas con gran superficie en planta, aunque hayan sido diseñadas con un alto nivel de eficiencia energética.

Como indican Martínez et al. (Martínez, Pacheco, & Ordó, 2012) en su revisión sobre el diseño eficiente de los edificios. Multitud de artículos, como el de Littlefair (Littlefair, 2001) e incluso guías y manuales, como la editada por las fuerzas aéreas de los Estados Unidos de América (Base, 1993) consensuan que la mejor orientación para un edificio es la sur, encontrando el límite en la desviación respecto del sur en los 30°. A partir de ese ángulo, el ahorro no significa un porcentaje tan elevado como el encontrado en el intervalo de entre 20° y 30° en torno a la orientación sur. En cuanto a la desviación hacia el este o el oeste, se visto cómo la orientación hacia el este es la que requiere más demanda de energía para su calefacción y la del oeste la que genera más demanda de refrigeración.

1.3.2. Espacios invernadero

Los invernaderos tienen su origen en la agricultura, ya que servían como espacios semicerrados en los que se consiguen mejores condiciones higrotérmicas para el crecimiento de las plantas.

Como espacio invernadero en el ámbito de la construcción se define a un recinto adyacente a estancias interiores del edificio, en el que parte de su cierre se produce con vidrios. De esta manera, como ya se ha dicho, se permite la entrada de radiación solar pero se dificulta la salida de radiación hacia el exterior; esto es debido a que los vidrios permiten el paso de la radiación de onda visible, pero no de onda larga. Esto se produce porque, cuando la radiación solar es absorbida por un sólido opaco, éste la emite en la longitud de onda de radiación del sólido.

En los últimos 20 años se han realizado numerosos trabajos de investigación que estudian el comportamiento de los espacios invernadero y el potencial de energía que pueden captar. En 1997, M. Wall publicó los resultados de su investigación acerca de la distribución de la radiación solar en espacios acristalados adyacentes al edificio (Wall, 1997). Los resultados fueron hallados mediante la simulación numérica del mismo modelo constructivo con cuatro herramientas informáticas (DEROB-LTH, SUNREP (TRNSYS), FRES y tsbi3). Sus conclusiones se centraban en las diferencias entre los resultados numéricos respecto de la ganancia solar que se produce a través de estos recintos. Indica que los modelos simples descartan el efecto de reflexión sobre las superficies y que, para compensarlo, sobreestiman las ganancias solares. Este resultado de sobreestimación de las ganancias se produce con las cuatro herramientas empleadas, destacando también que son más precisos en cuanto a las condiciones resultantes en el edificio adyacente que en el propio espacio acristalado.

Durante el año 2000, N. Cardinale y F. Ruggiero (Cardinale & Ruggiero, 2000) publicaron la comparación de los resultados sobre un modelo constructivo de un edificio situado en Potenza (Italia). Los procedimientos empleados fueron la simulación con una herramienta informática (Method 5000) (Commission, 1986) y el procedimiento marcado por la normativa italiana para el cálculo de la demanda energética. Concluyeron que los resultados eran similares y más precisos que los obtenidos por M. Wall, aumentando la contribución de las ganancias solares en la simulación transitoria, por la inercia térmica del edificio. En este caso, la consideración final indicaba que los requerimientos energéticos de un edificio en el que se usasen estrategias bioclimáticas podía reducirse en un 50%, según los resultados de los cálculos comparativos llevados a cabo en su estudio.

Ese mismo año, G.C. Bakos y N.F. Tsagas (Bakos & Tsagas, 2000) publicaron un artículo sobre un espacio acristalado adyacente a un edificio en Xanthi (Grecia) (Figura 12). Se centraron en el cálculo del nuevo balance energético y el ahorro económico como consecuencia de cerrar la terraza de la casa estudiada. Asociado a esta solución constructiva, destacaron que la construcción de este sistema acristalado era más cara

que la de un muro tradicional, y que la eficiencia energética de la envolvente acristalada era baja y limitada. A pesar esto, su conclusión indicó que la difusión de su uso en el ámbito de la construcción podría constituir una solución económica para satisfacer la demanda de las viviendas.

Figura 12. Vivienda estudiada en Grecia. Fuente: Bakos y Tsagas

Los autores realizaron un trabajo posterior (2003) sobre el mismo edificio (Bakos, 2003). En esta extensión de su investigación, estimaron que el cerramiento de la terraza implicó un ahorro del 80% en la energía auxiliar eléctrica usada para calentar la vivienda por suelo radiante.

Con estas investigaciones se demostraba que, gracias al avance de la tecnología se empezaba a poder predecir de forma matemática el ahorro que aportaba un sistema constructivo, lo que en la actualidad se realiza de forma obligatoria para la predicción de la demanda energética en cualquier proyecto de edificio.

Basado en la simulación numérica de modelos, Mihalakakou (Mihalakakou, 2002) publicó un estudio en el que había simulado un modelo, compuesto por un espacio invernadero adyacente a un edificio, en cuatro ciudades del sur de Europa. Sus conclusiones indicaron que la reducción de la demanda energética en invierno es significativa; aunque debido a los problemas de sobrecalentamiento en el sur de Europa, propuso el uso combinado de esta estrategia con conductos geotérmicos, ventilación natural nocturna y elementos que proporcionen sombra al edificio.

Similares conclusiones son presentadas por Bataineh et al. (Bataineh & Fayez, 2011) al simular el comportamiento térmico de un modelo compuesto por un espacio acristalado adyacente a un edificio. Estudiado bajo el clima de Jordania, su investigación se centró en la relación entre el espacio acristalado y el cerramiento opaco que divide ambos recintos. Además de concluir con resultados similares en cuanto al ahorro aportado por esta solución constructiva, propuso el uso de cristales inclinados para minorar la ganancia solar en verano de forma natural. Centrados en similares soluciones

constructivas, Oliveti et al. (Oliveti, Arcuri, De Simone, & Bruno, 2012) estudiaron, en un espacio invernadero, la importancia del área acristalada respecto del área opaca en un espacio acristalado. Para esto, realizó diferentes configuraciones de un recinto, en las que fue modificando la disposición de superficies opacas o acristaladas en cada orientación del espacio y en su techo. Para la orientación sur, con cristales simples, el coeficiente de absorción es el mismo independientemente de si sólo está acristalada la cara sur o también en sus laterales. En el caso de emplear cristales dobles se incrementa el coeficiente de absorción, de media, un 10% respecto del mismo modelo con cristales simples. En otro estudio suyo (Oliveti, De Simone, & Ruffolo, 2008), avanza en la investigación al realizar modificaciones sobre la configuración constructiva de la superficie intermedia entre el recinto acristalado y el edificio. Para ello, realiza diferentes modelos y simulaciones numéricas con soluciones constructivas acristaladas y opacas. Concluye que el coeficiente de absorción de energía también varía en este sentido, para superficies que no cuentan con una absorptividad superficial de la radiación elevada, el coeficiente de absorción media mensual de la energía térmica es de un 0,4, mientras que para materiales con una alta absorptividad este coeficiente asciende a un 0,6.

Son pocos los estudios que incluyen la toma de datos experimental y su posterior validación y comparación con modelos simulados en el ámbito de la edificación. Mottard y Fissore (Mottard & Fissore, 2007) construyeron, para su investigación, un espacio invernadero del que tomaron medidas experimentales y simularon en estado transitorio. Concluyeron que los errores entre los resultados simulados y los datos tomados alcanzaron los 2.4°C puntualmente y cifran en un 11% el error total en cuanto a la energía transmitida al recinto adyacente. Debido a la magnitud del error que se puede encontrar en la comparación, Asdrubali et al. (Asdrubali, Cotana, & Messineo, 2012) centraron su estudio en la comparación de los diferentes procedimientos de cálculo o simulación respecto de los datos reales: Method 5000 (Commission, 1986) y UNE-EN ISO 13790 (Technic Comité AEN/CTN 92, 2011) para el análisis estacionario, y TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, 2016) y EnergyPlus (U.S. Department of Energy (DOE), 2016) para el análisis transitorio. La conclusión fue que los procedimientos de cálculo en estado transitorio consiguen resultados con menor error respecto de los datos reales que los análisis estacionarios.

El diseño de un espacio invernadero adyacente a edificios se muestra como un sistema constructivo pasivo que influye en el ahorro energético del edificio. También se ha constatado que este diseño constructivo provoca inconvenientes de sobrecalentamiento en regiones similares a la española; aunque en el edificio estudiado en esta tesis se han incorporado todas las recomendaciones descritas por otros autores, razón por la que se analiza la repercusión final que tienen todas las propuestas encontradas en el comportamiento térmico final de un espacio invernadero. También se han encontrado resultados contrastados en cuanto al método que debemos utilizar para la simulación numérica de un modelo basado en nuestro edificio.

1.3.3. Muro Trombe

El origen de este sistema constructivo fue desarrollado por Edward S. Morse, y patentado en 1881. En los años 60 del siglo pasado, el sistema constructivo fue desarrollado completamente por el ingeniero francés Félix Trombe y el arquitecto Jacques Michel, quienes diseñaron el primer Muro Trombe experimental (Figura 13) en Odeillo (Francia).

Figura 13. Primer Muro Trombe experimental. Fuente: google.es, sin referencia explícita

El Muro Trombe funciona bajo los mismos principios que el efecto invernadero, capta la energía solar a través de una envolvente acristalada. Sin embargo, esta energía no se transfiere de forma directa hasta el interior del edificio, sino que se acumula en el material opaco del sistema constructivo. Además, enlaza el aire situado en la cámara de aire intermedia con el interior del edificio, por medio de aberturas. De esta forma combina la transferencia de calor por conducción, convección y radiación (Figura 14).

Figura 14. Principio de funcionamiento del Muro Trombe clásico. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, el Muro Trombe clásico consta de una lámina de vidrio externa, una cámara de aire intermedia y un elemento masivo, que puede estar compuesto por diferentes tipos de materiales cuya única premisa es la alta capacidad de almacenamiento calorífico. Desde su creación, este sistema constructivo ha sido experimentado con modificaciones, con el objetivo de conseguir un mejor rendimiento. Entre ellas, cambios de material sólido por fluido en el elemento masivo, modificaciones en su geometría (muro Trombe en zigzag), adición de capas (muro Trombe compuesto) o la introducción

de fluidos altamente absorbentes de baja densidad en la cámara de aire intermedia (Figura 15) (Saadatian, Sopian, Lim, Asim, & Sulaiman, 2012).

Figura 15. Diferentes sistemas constructivos que pueden formar el Muro Trombe. Fuente: Elaboración propia

El principio de funcionamiento es prácticamente el mismo en todas sus variantes, y su funcionamiento energético puede ser calculado siguiendo el comportamiento físico de sus componentes (Duan, Jing, & Zhao, 2016). La masa captadora del Muro Trombe absorbe la radiación solar durante el día, acumulándose y transmitiéndose por el elemento masivo. Tras este proceso, el calor es introducido en el interior de la estancia mediante procesos de transferencia de calor, influyendo sobre el confort de los ocupantes.

Chen et al. (Chen et al., 2006) realizaron en China un estudio experimental, a escala real, en el que monitorizaron dos celdas de ensayo adyacentes: una con una envolvente tradicional, que se tomó como referencia, y la otra con un Muro Trombe en una de sus fachadas. El objetivo era observar el comportamiento en cuanto a la temperatura y la humedad relativa resultantes tanto en el interior de las capas que componen los sistemas constructivos como en el interior de las celdas. El estudio se llevó a cabo entre los meses de noviembre y febrero, para condiciones de clima continental, colocando termohigrómetros entre cada capa de los muros, en el interior de los recintos, y una estación meteorológica en el exterior del edificio. Destacan en su estudio que el contenido de humedad en la celda con muro Trombe desciende desde las condiciones

iniciales del estudio, ya que la humedad se deposita en la cámara de aire del muro y, posteriormente, se evapora por la ayuda de la radiación solar directa sobre el vidrio. De esta manera, mantiene unas condiciones salubres de ocupación en el interior de la celda con Muro Trombe. En el caso del muro tradicional, la humedad ambiental se transmite hacia ambas caras. En cuanto al estudio de la temperatura, la temperatura superficial interior del Muro Trombe está entre 3°C y 5°C por encima de la registrada en los muros de la celda de referencia; también se registran mayores fluctuaciones de la temperatura a lo largo de los días en estudio. En lo referente a la temperatura ambiente interior, entre ambas celdas no se encontraron diferencias mayores de 1°C, pero la alta humedad presente en la celda de referencia hizo que la sensación térmica fuera entre 3°C y 5°C mayor que la de la celda con muro Trombe. En la celda de referencia, la humedad también influyó de forma negativa cuando la temperatura exterior bajaba de 5°C, ya que la temperatura interior alcanzaba el punto de rocío, manifestándose en muros y carpinterías del recinto. Al mismo tiempo, en la celda con Muro Trombe el ambiente permaneció seco a lo largo de todo el estudio, sólo presentándose humedades intersticiales en la cara interior del cristal de Muro Trombe.

Hoy en día, muchos autores han utilizado herramientas informáticas de simulación numérica transitoria y de cálculo de la demanda energética para simular distintas configuraciones del muro Trombe. Para el clima mediterráneo, Abbassi et al. publicaron sendos artículos (Abbassi & Dehmani, 2015; Abbassi, Dimassi, & Dehmani, 2014), sobre investigaciones en Túnez, en los que analizaban el comportamiento de un muro Trombe. La motivación fue la utilización de este sistema constructivo en una región que, como se ha visto en la tipología constructiva, se tratan de viviendas compactas y cerradas al exterior para prevenir la entrada de radiación solar y la alta temperatura ambiente. En su primera investigación, sobre una celda de ensayo, analizaron experimentalmente y numéricamente el comportamiento de un muro Trombe. Posteriormente validaron el comportamiento térmico del muro Trombe en el procedimiento numérico respecto de los datos experimentales. En esta investigación, se concluyó que, una superficie de muro Trombe de entre 3 m² y 5 m² es suficiente para suplir la mitad de la demanda de energía de calefacción que requieren las viviendas de ese país. Estos autores sugieren en este mismo estudio que la colocación de 5 cm de aislamiento en el resto de fachadas reduciría casi por completo la demanda de energía calorífica para la tipología tradicional de vivienda. Con su segunda investigación, exploraron la posibilidad de colocar elementos verticales perpendiculares en la cara interior del Muro Trombe, imitando la forma de un radiador. Al igual que en los radiadores, su función debía ser disipar el calor desde el Muro Trombe hacia el interior de la edificación. Los resultados obtenidos indican que estos elementos reducen la temperatura en la cara exterior del muro Trombe, al mismo tiempo que aumentan la temperatura en la cara interior, concluyendo que un muro Trombe tipo radiador con una superficie de 2 m² sería suficiente para satisfacer la demanda de calefacción de una vivienda típica de Túnez.

En el mismo sentido, Jaber y Ajib (Jaber & Ajib, 2011) realizaron un estudio simulado con el que trataron de optimizar el diseño de un muro Trombe para el clima mediterráneo en Jordania. Sobre una tipología de vivienda que representa la mayoría de viviendas presentes en ese país calcularon con el programa TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, 2016) la demanda total de energía calorífica de la vivienda, resultando 15,27 kWh/m². Después de esto, propusieron la simulación numérica de variaciones constructivas sobre el área de la envolvente orientada al sur. La modificación consistía en insertar un muro Trombe en parte de la envolvente del edificio. Tras diversas modificaciones, los resultados indicaron que, si cambiaban un 37% del área del muro tradicional por un muro Trombe, la demanda anual de energía calorífica era de 10,36 kWh/m², lo que indica un ahorro de un 32% en la demanda de energía producida por sistemas auxiliares. En el afán de hallar el diseño óptimo del muro, compararon el coste de la instalación del Muro Trombe, por m² de superficie, con el ahorro de energía auxiliar multiplicada por su coste por kWh. Para superficies de muro Trombe superiores al 37% respecto del área total de la envolvente, el coste de ejecución del muro sería mayor que el coste de la energía ahorrada; por lo tanto, establecieron su punto óptimo en el 37% de superficie. Además de esto, recomendaban de forma paralela la colocación de cortinas enrollables en la cámara de aire del muro Trombe para evitar la radiación directa y el sobrecalentamiento en el interior de la vivienda. Precisamente para un clima mediterráneo similar, en Egipto, Dabaieh and Elbably (Dabaieh & Elbably, 2015) mostraron ahorros energéticos de 53kW y reducciones de emisiones de hasta 144 kg de CO₂ respecto del muro clásico Trombe añadiendo aislamiento, cortinas, cambio de acabados,...

El problema del sobrecalentamiento fue estudiado para un clima algo más templado, en Belgrado (Croacia), por Bajc et al. (Bajc, Todorovic, & Svorcan, 2014). En su caso, el estudio se basaba en la modelización con un programa de Dinámica de Fluidos Computerizada (CFD). Para resolverlo, propusieron la colocación de paneles fotovoltaicos integrados en el cristal del Muro Trombe clásico, de forma que produjeran energía al tiempo que provocaban el sombreamiento del muro. En sus conclusiones indicaron que, si bien conseguían rebajar la temperatura en el recinto interior adyacente hasta los 29,8°C, aún quedaba camino por recorrer hasta alcanzar los 26°C de temperatura interior recomendada en verano, según la normativa vigente en ese momento. Por el contrario, destacaron que la producción de energía eléctrica de un panel fotovoltaico orientado hacia el sur podía ser de 3,3 kWh/m². También expresaron que era necesario estudiar si era mayor la energía eléctrica producida por los paneles que el aumento de la demanda de energía de refrigeración provocada por la inserción de un muro Trombe.

Para un clima subtropical, en Brasil, Krüger et al. (Krüger, Suzuki, & Matoski, 2013) realizaron una investigación en la que se centraron en estudiar la conveniencia de la apertura o cierre de los huecos en el muro Trombe en función de la época del año. Concluyeron que la mejor configuración para el periodo frío era dejar las entradas de aire abiertas, favoreciendo la ventilación natural entre la cámara de aire y el interior. sin

embargo, cerrar las aberturas superiores durante el periodo nocturno mejoraba los resultados en un 10-20%.

Para terminar, resaltar que son pocos los trabajos que realizan un estudio completo de un muro Trombe que incluya la monitorización experimental para la validación de un modelo simulado numéricamente. Cabe destacar el realizado por W. He, Z. Hu et al. (He et al., 2015) sobre un muro Trombe con cortinas interiores. Se valieron de los datos experimentales tomados en una celda de ensayo con muro Trombe para definir las condiciones de frontera a cada una de las capas del muro y validar de forma precisa la posterior simulación numérica. En la simulación numérica relacionan el comportamiento térmico y del flujo de aire del muro Trombe en función de la inclinación de las lamas orientables de la cortina, calculando el número de Nusselt y el número de Reynolds cada 10° de inclinación. Los resultados indicaron que, cuando las lamas interiores se encontraban casi horizontales, el flujo interior se volvía más turbulento, pero la eficacia térmica del muro aumentaba al permitir la entrada de la radiación solar sobre la superficie opaca. En un segundo estudio (Hu, He, Hong, Ji, & Shen, 2016), observaron diversas cuestiones como la influencia del ancho de la cámara de aire en el comportamiento del muro. Siguiendo una estrategia similar a la anterior, monitorizaron de forma exhaustiva las condiciones interiores y exteriores, lo cual les condujo a una mayor concordancia entre los datos experimentales y los resultados simulados, para su posterior composición de la investigación. La influencia del espesor de la cámara del aire no resultaba reseñable en cuanto a la reducción de la demanda de refrigeración en el caso de colocar un Muro Trombe. Pero volviendo a la inclinación de las lamas indicadas en el trabajo anterior, cuando éstas se posicionaban casi verticales, de forma que tapan la radiación solar directa sobre el muro, se producía una reducción de un 70% en la demanda de energía de refrigeración respecto de la demanda de un muro Trombe tradicional. Ahorro que sólo alcanza un 10% en el caso de que las lamas se encuentren horizontales.

1.3.4. El suelo como acumulador de energía térmica

Como se ha visto hasta ahora, la radiación solar se recoge de forma directa a través de la envolvente del edificio, pero la entrada de las ondas de luz visible a través de los huecos acristalados también produce que la energía térmica se recoja en las superficies interiores. Hayan sido o no diseñadas con este propósito, las superficies interiores se pueden utilizar como colectores de energía.

De la distribución espectral de la radiación solar se desprende que un 9% de ésta corresponde con la región ultravioleta, un 39% en la región visible y un 52% en la región infrarroja. El comportamiento de los vidrios comúnmente usados en construcción transmite en un alto porcentaje la cantidad de energía de la región visible hacia el interior, por lo que esa radiación se absorbe por los elementos opacos del edificio y se emite como calor sensible de los materiales hacia el ambiente interior del edificio.

Debido a que el recorrido solar cambia el área de superficie interior sobre la que actúa la radiación a lo largo del día, la distribución de la energía que se puede acumular depende de la orientación y del área del hueco o acristalamiento. Un análisis de la radiación fue desarrollado en el año 1978 por Sparrow y Cess (Sparrow & Cess, 1978), denominando RIM al método empleado para relacionar radiosidad e irradiación. En los años 90, autores como Athienitis y Chen (Athienitis & Chen, 2000), estudiaron factores como la fracción de la radiación solar que absorbe el suelo. En otro estudio, concluyeron que la discretización del área total de suelo en mallados menores a 0,3m. mostraba resultados precisos (J. Wen y T.F. Smith) (Wen & Smith, 2002).

Con el paso de los años se han desarrollado diferentes procedimientos para cuantificar la cantidad de energía que absorbe el suelo. Esta cuestión fue estudiada por De Carli y Tonon (De Carli & Tonon, 2011), quienes evalúan en su investigación cuatro maneras diferentes de cuantificar la cantidad de energía que entra en un recinto a través de una ventana. En su procedimiento, primeramente fijan las áreas del suelo donde el sol impacta y refleja en cada momento del día (Figura 16).

Figura 16. Identificación de los elementos del edificio que están sujetos a la radiación solar directa Fuente: De Carli y Tonon

Las diferencias entre los cuatro métodos estudiados estriban en la modelización de esa energía, en unos se estudia el suelo por porciones, de forma detallada, mientras que en otros se considera que la radiación se distribuye de manera uniforme sobre toda la superficie. En sus conclusiones destacan que los modelos que consideran el estudio de la radiación por porciones de suelo (Figura 17), tienen un mayor detalle de las temperaturas en cualquier posición del suelo, pero determinan que la energía global captada por el suelo es similar en los cuatro modelos estudiados.

Figura 17. Líneas isotermas en el suelo según los cuatro modelos, para la insolación a una hora determinada.
Fuente: De Carli y Tonon

Estos mismos autores, indican que la cantidad de energía absorbida por el elemento del suelo depende más de su espesor y conductividad que de sus propiedades ópticas (color claro u oscuro), al analizar la energía absorbida a lo largo del día entre 16 terminaciones superficiales, incluso entre diferentes espesores de materiales como son baldosas cerámicas, mármol, granito, madera y vinilo.

En el ámbito de edificación, los pavimentos que funcionan como emisor de energía se suelen asociar a los suelos por los que discurre un líquido de temperatura variable, razón por la que el suelo irradia calor hacia el ambiente. Para el interés de este estudio, lo que interesa es saber cuál es la capacidad de un material para absorber energía y transmitirla al ambiente, independientemente de su sistema constructivo. Estudios como el realizado por Zhou y He (Zhou & He, 2015) son de aplicación para nuestro campo de estudio, en su investigación utilizan diferentes materiales como composición de un suelo con tubos radiantes: Arena y PCM como cobertura y elemento nivelante del suelo, poliestireno expandido y tubos capilares como suelo radiante, y cubrición de diversos materiales. Estudian de forma empírica cuánto tiempo tarda el suelo radiante a 35°C en conseguir una temperatura confortable en el ambiente (25°C) y cuánto es el tiempo que tarda en recuperar la temperatura inicial (19°C). Un suelo con arena y poliestireno, como el usado en nuestro caso de estudio, tarda 2,7 horas en conseguir en el recinto una temperatura de 25°C y tiene una inercia térmica que lo conserva a una temperatura superior a la inicial durante 6 horas. Por tanto, la reducción de la demanda energética no se limita a la radiación solar directa, sino que debido a la inercia térmica se puede

prolongar su acción durante varias horas después de la acción directa de la fuente de calor exterior.

1.3.5. Ventilación por medios naturales

En el diseño de edificios, predecir el comportamiento de la ventilación natural en su interior requiere de complejos modelos físicos que, para optimizar los resultados, deberían ser introducidos en la primera etapa de diseño de un edificio. Los parámetros que determinan el futuro comportamiento térmico son los mismos para cualquier tipo de edificio: la dirección e intensidad del viento predominante, combinado con la estanqueidad de los huecos y ventanas del mismo. Además, para edificios de gran altura se debe tener en cuenta el incremento de la velocidad del viento con la altura respecto de la superficie, así como la diferencia de presión de aire entre las partes altas del edificio y las partes bajas.

Según una clasificación descrita en el libro publicado por Etheridge and Sandberg y titulado “Building ventilation: Theory and measurements” (Etheridge & Sandberg, 1996), se distinguen dos tipos de ventilación: la ventilación libre, en la que el flujo de aire sólo está influido por la gravedad y por la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior de los edificios; y la ventilación forzada, que se refiere a los flujos generados por la presión y la tensión tangencial del aire en su movimiento. Si bien la ventilación forzada se refiere al movimiento del aire en el ambiente exterior, también se asume un comportamiento análogo en el interior de los edificios cuando el aire es introducido por medios mecánicos o por la acción del viento. En la investigación realizada en esta tesis, dentro de la definición de la ventilación natural, también consideramos como estrategia pasiva toda aquella consecuencia que se produzca en el comportamiento térmico del edificio sin que intervenga una causa de origen mecánico.

En la mayoría de edificios actuales, debido al desarrollo de nuevas tecnologías, la ventilación natural se ha sustituido por el uso de sistemas de climatización mecánicos. Sin embargo, el potencial por el uso de la ventilación natural no se limita únicamente a la mejora de las condiciones térmicas del edificio, también influye en la calidad del aire interior, la edad media del aire en el edificio y la evacuación hacia el exterior, por medios naturales, de agentes patógenos. Un estudio realizado por Fisk (Fisk, 2002), reveló que una ventilación apropiada puede resolver los problemas encontrados en edificios enfermos, con un ahorro asociado de entre 10 y 30 mil millones de dólares sólo en Estados Unidos.

La ventilación natural en el recinto de un edificio, como estrategia pasiva de enfriamiento, diferencia el comportamiento del aire en dos tipos: ventilación cruzada y ventilación unidireccional. La ventilación unidireccional se da en aquellos recintos con aberturas a una sola dirección, donde la ventilación se produce por el flujo de aire que se mueve entre el exterior y el interior al abrir las ventanas del edificio como consecuencia de la diferencia de temperatura entre ambos ambientes, ya que la presión también es diferente. Para la ventilación unidireccional, el proceso de entrada de aire

directa por la dirección del viento resulta complejo de caracterizar; la diferencia de presión generada en el interior por la entrada del aire provoca fluctuaciones rápidas y turbulentas de la dirección del aire, difíciles de cuantificar. Por su parte, la ventilación cruzada se da en aquellos recintos que cuentan con aberturas en dos o más orientaciones. La distribución óptima de las aberturas se ha de realizar en la dirección predominante del viento para cada región, de forma que se aproveche la diferencia de presión entre ambas orientaciones para favorecer la ventilación natural del edificio.

D. W. Etheridge (Etheridge, 2000b)(Etheridge, 2000a) publicó sendos artículos en el año 2000, en los que estudia los efectos de un flujo variable debido a la presión del viento al abrir una ventana, para el diseño de la ventilación natural en un edificio. Toma como base las ecuaciones que gobiernan el movimiento del aire a través de un hueco, desde el método estacionario que cuantifica la cantidad efectiva de aire que se introduce hasta el modelo cuasi estacionario, el cual sí tiene en cuenta la variación sinusoidal de la presión debida al viento y su inercia temporal. Para validar su modelo matemático, se sirve de anteriores medidas experimentales gracias a los que concluye que el modelo cuasi estacionario inercial se asemeja al comportamiento real establecido por el aire, para un coeficiente de descarga (C_z) igual a 0,6. Este valor nos será de utilidad en el posterior modelo simulado del edificio que hemos realizado en este trabajo, ya que es el coeficiente de descarga indicado por el programa para la ventilación a través de rejillas y huecos. En sus investigaciones, para cuantificar el comportamiento del flujo de aire a través de los huecos, realiza el estudio sobre 5 casos, los tres primeros con aberturas en dos orientaciones, estando alguna en el techo, con forma de ventana o chimenea, los otros dos casos de estudio consideran la ventilación de un recinto a través de dos huecos, situándose éstos en una sola orientación o cada uno en una orientación diferente. Como conclusión, indica que para recintos con más de una abertura, se puede ignorar el efecto del flujo variable si el parámetro ($W/\sigma_{\Delta C_p}$) excede del valor 1. Este valor se muestra en función de la diferencia de altura de los dos huecos y la diferencia de presión entre ambos; por tanto, es una variable que se puede descartar salvo para múltiples huecos en atrios, espacios grandes y edificios de gran altura. Para edificios de poca altura, recintos con varios huecos en una o más orientaciones, también se puede descartar la influencia de la variación del flujo del aire. Además, indica que como regla general, al realizar los cálculos de aislamiento de un edificio, el comportamiento del aire debe considerarse estacionario e incompresible.

Poco después, en uno de los primeros estudios en los que se aplicó un modelo de dinámica de fluidos computarizada (CFD, por sus siglas en inglés), Allocca et al. (Allocca, Chen, & Glicksman, 2003) se centraron en el análisis del diseño de una ventilación natural con una sola orientación. En esta investigación, se explica de forma muy simple el comportamiento del aire, realizando la distinción entre los diferentes tipos de flujo que podemos encontrar en la ventilación natural de un edificio: distingue entre el flujo inducido por el viento y el flujo conducido por flotabilidad (Figura 18). En este último caso, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es la que causa un movimiento natural del aire debido a la diferencia de densidad. Como

consecuencia, el efecto de succión del aire se alarga en el tiempo hasta que la diferencia entre las temperaturas se iguala y se anula la ventilación por flotabilidad. Esta cuestión se muestra interesante, ya que como se podrá observar en los resultados experimentales e uno de nuestros estudios, las variaciones de temperaturas pueden ser rápidas y bruscas, con diferencias de varios grados de temperatura en el recinto en pocos minutos.

Figura 18. Distribución de presión interior y exterior por flotabilidad (a), para dos aberturas en vertical (b) y para una abertura (c). Fuente: Allocca

El objetivo de la investigación realizada era el análisis de la ventilación de tres formas distintas: experimental, analítico y numérico. En el estudio analítico, se aplicaron ecuaciones de resolución del problema de la ecuación de Bernoulli, junto con un coeficiente efectivo de descarga para resolver la ventilación. El método experimental utiliza, como referencia, los datos tomados en otros estudios para el cálculo de la ventilación; en su análisis destaca la limitación que tiene el estudio experimental, en tanto que los datos se toman sobre la configuración actual del diseño del edificio. Por el contrario, en su investigación destacaron que el método numérico permite la optimización de los resultados obtenidos, realizando modelos en los que se simulan aquellas modificaciones que se consideran oportunas para cada investigación. La resolución del comportamiento turbulento del flujo mediante las ecuaciones de conservación del momento y la energía, el uso de ecuaciones de Navier-Stokes y otras variables físicas complejas permite la optimización del diseño del edificio en cuanto a la ventilación. En sus conclusiones también destacaron que se encuentran diferencias de hasta un 25% en el ratio de ventilación entre el modelo experimental y el modelo CFD, achacándose al procedimiento de cálculo del software la infraestimación del efecto de succión cuando se encuentran dos o más huecos por los que el aire puede entrar o salir.

Si nos vamos a estudios publicados durante el año 2017 (Nomura & Hiyama, 2017; Omrani, Garcia-Hansen, Capra, & Drogemuller, 2017; Wang, Wang, Zhang, & Battaglia, 2017), observamos que las investigaciones sobre ventilación natural, cada vez se enfocan más en el uso de programas CFD, que se encarguen de la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para la resolución de las incógnitas del estudio y la optimización del diseño. Todos ellos destacan la rapidez de la resolución de las ecuaciones numéricas mediante programas informáticos en ordenadores cada vez con mayor potencia. La validación de los modelos CFD se ha alcanzado por un desarrollo

más avanzado de los programas informáticos, contando con procedimientos para realizar el dibujo y el error cometido en base a las dimensiones del objeto analizado “Grid convergence index” (GCI) (Roache, 1997), o guías (Rong, Nielsen, Bjerg, & Zhang, 2016) para realizar la simulación.

Estudios como el de Wang et al. (Wang et al., 2017) investigan la influencia de diferentes configuraciones de las ventanas para mejorar la ventilación natural del edificio. Este estudio se centra en el comportamiento del aire a través de ventanas de diferente configuración correderas, de apertura frontal y oscilobatientes. El resultado expuesto en este estudio indica que, de forma independiente a la forma de apertura de la ventana, se produce un intercambio de aire entre el interior y el exterior por flotabilidad, pero indica que para unos correctos resultados del comportamiento del aire no es suficiente con definir los espacios por los que el aire debe entrar o salir, sino que el recinto debe ir acompañado por un espacio exterior sobre el que aplicar las variables físicas de dirección de viento, temperatura y presión.

Una revisión publicada por Omrani et al. (Omrani et al., 2017) sobre los diferentes procesos y herramientas de evaluación que se pueden realizar para estudiar la ventilación natural en los edificios. En la actualidad, con modelos CFD y experimentos a escala se pueden conseguir precisiones aceptables en los resultados, pero no con métodos analíticos, ya que éstos requieren de multitud de simplificaciones que invalidan el resultado. En cuanto a su coste, la realización a escala del experimento requiere de una mano de obra y coste que no se puede comparar con las posibilidades de prueba-error y optimización que aportan los modelos informáticos. Los modelos geométricos complejos son imposibles de realizar por modelos matemáticos ya que éstos se refieren a superficies y volúmenes más que a sus formas particulares. Es por esto que los modelos matemáticos suelen ser usados como una primera aproximación en la que, con poco tiempo, lleguemos a soluciones aproximadas que nos ayuden a afinar la posterior resolución óptima. Pero una resolución detallada solo puede ser conseguida por medios informáticos (CFD).

En este punto, y dado el aumento de herramientas que nos permiten percibir y cuantificar la eficacia de la estrategia pasiva de ventilación natural, nos encontramos con cuestiones como son la adaptación a la normativa, cuestión expuesta recientemente por Guillén-Lambea et al. (Guillén-lambea, Rodríguez-soria, & Marín, 2016). El empleo de la ventilación como estrategia pasiva encuentra su límite en latitudes en las que la demanda de calefacción es mucho mayor a la de refrigeración. Por esto, en el resumen de normativas aportados por la recopilación de datos hecha en este trabajo, nos encontramos con que en la Unión Europea el ratio de ventilación, por residente y por recinto, es menor en países nórdicos y en la propia normativa europea que en países como España; siendo admitida expresamente en los países nórdicos la ventilación por medios mecánicos. En otras regiones con similar climatología, como los Estados Unidos de América, con su normativa ASHRAE, se limita de forma mínima la ventilación, llegando en casos de cocinas a requerir al menos el doble de ratio por hora que en Europa. Trabajos en países más lejanos como Japón (Nomura & Hiyama, 2017), indican

que la ventilación natural es una estrategia efectiva para reducir el consumo de energía en edificios, calificándola incluso de contribución especialmente significativa para aquellos espacios cuya generación de energía sea grande (centros comerciales). En este trabajo, realizado por Nomura y Hiyama, recopilaban datos sobre 30 edificios japoneses que fueron diseñados bajo esta premisa, recogiendo sus registros de monitorización y medidas. En ellos, ratios de hasta diez renovaciones de aire por hora se encuentran en todos estos ejemplos sin destacar consideraciones en contra del diseño elegido. Sí que puntualizan que los resultados dependen por completo del diseño escogido y que este debe ser realizado durante la primera fase de diseño del edificio, creando un objetivo claro que deba mantenerse durante todo el proceso de diseño y construcción del edificio.

Nuevamente, estos datos son relevantes para el edificio estudiado en esta tesis ya que se observará cómo el edificio tiene una baja estanqueidad al aire, por las filtraciones que se producen por la carpintería. En el análisis realizado en esta tesis, coincidiendo con una de las conclusiones expuestas en el artículo de Nomura y Hiyama, tampoco se encuentran comportamientos límites o extraños a lo largo de todo el periodo de monitorización.

1.3.6. Edificio semienterrado con muro de tierra

En cualquier latitud de la tierra, desde el origen de los hombres, se utilizaban las cuevas como lugares de refugio para paliar las inclemencias meteorológicas. Una vez que el hombre comenzó a modificar la cobertura de las viviendas y a fabricarse sus propias cuevas, se observaban tendencias en la construcción que aún hoy se pueden ver (Figura 19).

Figura 19. Casas enterradas en latitudes cálidas (izqda.) y frías (dcha.). Fuente: google.es, sin referencia explícita

El fundamento físico de esta práctica consiste en que la temperatura del terreno a unos cinco metros de profundidad se mantiene estable a lo largo de todo el año. En Madrid la temperatura media anual en profundidad es de 15°C (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2010), variando entre los 4°C y los 25°C la temperatura superficial, debido a la influencia de la radiación solar y a la estación del año. Energéticamente, en la parte de la envolvente que se encuentra enterrada se produce una transferencia de calor por conducción hacia el terreno, puesto que su temperatura es menor que la interior del edificio. Sin embargo, la estabilidad de la temperatura también

indica que la pérdida total anual de energía será menor que en las áreas de la envolvente que se encuentran al aire, por las temperaturas extremas de verano e invierno.

Para las superficies horizontales enterradas se produce un fenómeno diferente, ya que bajo las construcciones enterradas se alcanzan temperaturas en el terreno que corresponden con mayores profundidades, acercándose a las temperaturas de confort del interior de los edificios.

En un ejemplo recientemente construido en Reino Unido, indican que han diseñado la superficie en contacto con el terreno como almacenador térmico. El caso de la vivienda de tierra en Brighton (Reino Unido) (Ip & Miller, 2009), muestra que la temperatura del terreno adyacente al edificio alcanza valores de hasta 22°C en Septiembre-Octubre, siendo de entre 12°C y 16°C para los meses entre enero y julio, como se muestra en la Figura 20. Por tanto, la temperatura mínima del terreno está muy por encima de la temperatura ambiente exterior durante casi todo el año.

Figura 20. Sección constructiva y temperatura del terreno en casa semienterrada en Brighton. Fuente: Elaboración propia

Abordando los preceptos del diseño de un edificio enterrado, en el año 1984, Carmody y Sterling (Carmody & Sterling, 1984), publicaron una investigación en la que relataban los principales problemas que se podía encontrar en este tipo de edificios, y la respuesta que se podía dar a esos problemas. La primera cuestión es la libertad de diseño y ocupación de la superficie que ofrece un edificio enterrado frente a uno elevado sobre el terreno. Como consecuencia de la construcción enterrada, el impacto visual y la influencia en el paisaje son importantes para la integración del edificio en su entorno. Las implicaciones psicológicas que tiene el vivir bajo la tierra pueden llevar a una reducción de la interacción con el espacio circundante. Los pequeños habitáculos, con formas libres y angostas, pueden generar problemas psicológicos que sólo pueden ser solventados por la satisfacción de habitar un espacio eficiente energéticamente y con nulo impacto ambiental. Otras cuestiones físicas como la falta de luz natural en el interior, la alta humedad del terreno y la falta de ventilación en el interior, también han de ser resueltos para mejorar las condiciones de habitación de la construcción. Por tanto, exponen como solución a la mayoría de problemas generados una interacción media con la envolvente, abriendo el edificio hacia el exterior por uno de sus laterales, para observar el paisaje exterior. También recomiendan la apertura de huecos en forma de

ventanales, espacios invernadero o tragaluces que permitan la entrada de radiación solar que estimule la actividad interior y ayuden a una correcta ventilación del interior del edificio.

Los pasos para determinar la idoneidad del diseño de una casa enterrada pueden seguir las líneas marcadas por Al-Temeemi y Harris en 2004 (Al-Temeemi & Harris, 2004), entre las que encontramos la aceptación del usuario sobre el diseño. Propone realizar un cuestionario para saber el grado de aceptación sobre la construcción enterrada. La realización previa de un prototipo de vivienda a escala, con el que enfrentarse a la hora de diseñarlo. Conocer el grado de resolución que se aporta a las reticencias habituales de los usuarios. Adaptar el edificio a las condiciones del terreno, los materiales y los sistemas constructivos que se usan en la región de construcción del edificio. Propone el diseño del edificio respecto de un patio que sí tenga acceso a la intemperie, alrededor del cual se ejecuten los recintos habitacionales; con el fin de reducir las reticencias de vivir bajo el nivel de la tierra, para mejor proveer de luz y ventilación natural, vistas frontales y acceso a otros recintos (Figura 21). De esta forma resuelve las necesidades descritas previamente y, además, genera un microclima en el patio que, en escala temporal anual, tiene menor temperatura y mayor humedad que el ambiente.

Figura 21. Patios de viviendas enterradas. Izqda: John Barnard. Fuente: ArtTattler.com. Dcha: B. Soo Cho Fuente: Dwell.com

En las construcciones enterradas se ha de cuantificar la temperatura media del terreno y de los flujos de calor que se producirán con las variaciones del clima a lo largo del año. Como se ha comentado anteriormente, la temperatura del terreno circundante al edificio es muy estable, por lo que grandes aperturas de huecos y ventanas sin sombreado pueden acarrear fluctuaciones en la temperatura ambiente interior que se hagan difíciles de superar a corto plazo. Como consecuencia, la realización de un estudio previo simulado de la iluminación del edificio se considera necesaria, y debe favorecer la entrada de iluminación indirecta en el interior, que reduzca la posterior sensación de aislamiento comentada en el artículo de Carmody y Sterling (Carmody & Sterling, 1984). Por último, se recomienda abordar un estudio económico del diseño, para cuantificar de forma monetaria el coste de la edificación, pero no desde un punto de vista de coste inicial, sino contando con el análisis de ciclo de vida y las labores de

mantenimiento, ya que el acceso a determinados puntos débiles es mucho más difícil que en el caso de viviendas emergidas.

Tomando como base estas recomendaciones, algunos artículos relacionados con casas enterradas o semienterradas cuantifican la eficiencia energética de este tipo de edificios. En un trabajo realizado por Kumar et al. (Alkaff, Sim, & Ervina Efzan, 2016) se basaron en diversos estudios experimentales desarrollados en su propia universidad (Nueva Delhi) para la realización de un modelo numérico, con el que predecir el comportamiento de las edificaciones enterradas y su influencia en la temperatura del terreno sobre el que se asientan. En este artículo indican que, para edificios con forjado sobre nivel de tierra, el aumento de la temperatura del terreno es de 3°C/m. Aunque para edificios enterrados al menos 1 metro de profundidad, el aumento de temperaturas alcanza los 7°C/m. Este comportamiento se produce bajo el edificio y es algo menor en el caso de los laterales de un edificio semienterrado. Según su estudio, el flujo de energía que se produce entre el edificio y el terreno es de 8 W/m² para los extremos de la envolvente enterrada y de sólo 0,4 W/m² para la zona central. La ejecución de un edificio semienterrado resulta en una estructura con una baja pérdida de energía a través de su envolvente.

La simulación de una vivienda, comparando su coste y consumo según se encontrara enterrada o apoyada en el terreno se realizó por Benardos et al. (Benardos, Athanasiadis, & Katsoulakos, 2014) en 2014 para el clima de Grecia. En el modelo con la superficie expuesta a la intemperie, se colocó una capa de 6 cm de aislamiento, mientras que en modelo enterrado no se colocó aislamiento. La demanda de energía se realizó según la normativa estándar UNE-EN ISO 13790 (Technic Comité AEN/CTN 92, 2011), resultando que la transferencia de calor con el terreno era menor aún sin aislamiento. Los resultados en el modelo enterrado muestran un ahorro del 60% para la demanda calorífica y de un 20% para la demanda de refrigeración, sin variar según el tipo de caldera. Además determinaron que el uso de una bomba de calor regulable para frío y calor en una vivienda enterrada, supone un ahorro del 64% de la demanda de energía respecto del modelo con caldera de gasoil para la casa apoyada en el terreno. Estos resultados implican un ahorro en similar porcentaje para el coste anual de la energía auxiliar necesaria en la vivienda, así como una tasa de retorno del sobrecoste de la ejecución de la vivienda enterrada cifrado en 25 años.

Como puntualización final, indicar que el tipo de terreno también influye en la elección final de la disposición del edificio. Una investigación llevada a cabo por Staniec y Nowak (Staniec & Nowak, 2011) para un edificio en clima templado, determina que el ahorro también varía según el tipo de terreno. En el análisis de sus resultados determinaron que el ahorro era de un 35% para terreno de arena normal, de un 65% para un suelo arcilloso y de hasta un 85% para un terreno mixto de arena media.

1.3.7. Técnicas para la prevención del sobrecalentamiento por sombreadamiento

La primera clasificación que se ha de hacer de este tipo de técnicas es en función de la ubicación: Exteriores al edificio e interiores. La presencia de elementos arquitectónicos y árboles de hoja caducifolia provocan el sombreadamiento sólo durante los meses cálidos del año, impidiendo la llegada de la radiación solar directa. Elementos fijos se han utilizado en multitud de edificios, de arquitectos tan reconocidos como el francés Le Corbusier en el Parlamento de India o la solución habitacional de Marsella (Figura 22).

Figura 22. Parlamento de India y solución habitacional de Marsella. Fuente: Le Corbusier. Wikipedia.org

En el caso de querer emplear la vegetación circundante como medio de reducción de la radiación solar, existen ejemplos tanto antiguos como futuros (Figura 23), con el resultado de una reducción parcial de la radiación solar directa en verano sobre el edificio anexo.

Figura 23. Árboles de hoja caducifolia para la reducción de la radiación solar en Sevilla (izqda.) y futura torre en Suiza de Stefano Boeri (dcha.). Fuente: google.es, sin referencia explícita (izqda.) Stefano Boeri (Dcha.)

El problema que presenta el caso de los árboles es la cuantificación de la energía térmica que ahorra su sombra sobre el edificio, según el índice de hojas y el área de sombra que cubren.

En el caso de los elementos arquitectónicos fijos al exterior sí que es posible cuantificar el ahorro, al poder simular el comportamiento del edificio debido a su influencia con o sin ellos, mediante el cálculo con modelos simples que analicen el consumo de energía del edificio. Este es el caso de Mlakar y Strancar (Mlakar & Štrancar, 2011) quienes

estudian el comportamiento de una vivienda con certificado PassivHaus (Badescu & Sicre, 2003a, 2003b) construida en Eslovenia. Situada en una localidad con clima continental y acabada en el año 2006, fue construida con estructura y paramentos verticales de madera y celulosa, salvo la solera de hormigón, y las ventanas de triple cristal de baja emisividad, con rotura de puente térmico. De construcción cuadrada y dos plantas, la mayor parte de la superficie acristalada se orienta hacia el sur, y se protege al este y oeste con unos aleros de gran extensión, para prevenir la radiación solar directa sobre las ventanas entre Mayo y septiembre. La primera fase de estudio se compuso de la monitorización interior y exterior del edificio, recogiendo temperatura y radiación solar cada minuto. Posteriormente calcularon numéricamente el balance energético del edificio por tramos horarios. Con estos datos, procedieron a validar los resultados de temperatura respecto de los datos experimentales tomados. La parte final de su estudio consistió en realizar modificaciones sobre el edificio modelado, simulando cuál hubiera sido su comportamiento térmico si no se hubieran dispuesto los grandes aleros de las caras este y oeste de la cubierta. De este estudio mostraron diversas conclusiones, la primera fue que el análisis experimental indicaba que la vivienda permanecía estable ente 20 y 25°C durante la campaña anual de monitorización. La segunda indicaba que los resultados del modelo se ajustaban a los datos experimentales del edificio. La última conclusión de su estudio cuantificaba la influencia de los aleros, ya que sin ellos la temperatura interior del edificio se hubiera incrementado 15°C en sólo un mes. Justificaban esta desviación en el comportamiento térmico del edificio en que está diseñado bajo premisas del estándar Passivhaus por lo que, salvo que se activasen otras estrategias de forma manual, como es la apertura de ventanas y la ventilación nocturna, el exceso de calor no puede ser disipado hacia el exterior en ningún momento. Comentar de forma paralela que, en este estudio, se justificaba la disparidad entre la toma de datos en minutos y el análisis de los resultados en horas. El motivo expuesto consiste en que la situación ambiental puede variar en cuestión de minutos, pero el tiempo de respuesta del edificio en base a su estanqueidad y aislamiento puede presentarse con un retraso en escala horaria. Esta escala de monitorización también se ha seguido en esta tesis, realizando análisis detallados a escala minutal, mientras que el comportamiento térmico del edificio se ha analizado a escala horaria.

En cuanto a elementos arquitectónicos móviles, también podemos clasificarlos según su posición: exterior o interior al edificio. Los elementos móviles por excelencia son las cortinas, las persianas y los toldos, compuestos por materiales textiles en su mayoría, o de metal o plástico en el caso de las persianas. Previenen la entrada de la radiación directa al interior del edificio de manera sencilla. Un análisis de la influencia de las cortinas ya se ha visto en el apartado (1.3.3 Muro Trombe) (He et al., 2015; Hu et al., 2016) por lo que no se valorarán hasta el análisis de los datos experimentales recabados en el edificio en estudio.

En el caso de los toldos, éstos se colocan al exterior de las ventanas o lucernarios y proveen de una sombra artificial que reduce el impacto de la radiación solar directa

(Figura 24). Para su óptima colocación se ha de realizar un estudio del recorrido solar en invierno y en verano respecto del hueco a cubrir. No se ha encontrado mucha referencia que cuantifique la influencia de estos elementos, salvo en el caso de sendos artículos publicados por Gómez-Muñoz (Gómez-Muñoz & Porta-Gándara, 2003, 2004). Estos estudios versan sobre las dimensiones del toldo en cuanto a longitud, ancho e inclinación respecto de la fachada del edificio en función del tamaño del hueco, realizando un estudio más centrado en cuestiones geométricas que de balance energético del edificio. Una correcta configuración del toldo puede llegar a reducir en un 45% la radiación solar directa que alcanza a la fachada, lo que resulta en un ahorro energético en cuanto a que el flujo de energía exterior hacia el edificio es menor al reducir la radiación directa sobre la envolvente.

Figura 24. Cobertura sobre lucernarios en CC Vaguada (Madrid). Fuente: Elaboración propia

En el caso de la ubicación de elementos sombreadores en posiciones intermedias o interiores respecto del hueco, se van a nombrar artículos cuya relación e influencia sobre nuestro estudio es elevada, por el método y el fin buscado en esas investigaciones.

Badescu et al. (Badescu, Laaser, & Crutescu, 2010) llevaron a cabo una investigación sobre el primer edificio de oficinas con certificado PassivHaus de Rumanía, del que aportan en su trabajo todos los detalles de sistemas constructivos y planos del edificio. En su estudio se centran en el análisis con la herramienta informática PHPP, que toma intervalos de análisis del balance energético cada hora sobre el comportamiento que tendrá el edificio a lo largo de todo el año. Si bien se trata de un edificio con una estanqueidad muy elevada y una envolvente con muy bajos valores de transferencia de calor por conductividad, los autores consideran necesario complementar su funcionamiento con estrategias simples. En su estudio, proponen el uso de estrategias como la ventilación nocturna en verano, el cierre de todas las ventanas durante el día, la inserción de cortinas y la adaptación de la temperatura de consigna a valores de 27°C en el periodo estival. En cuanto a la influencia de las cortinas durante el verano, proponen su colocación en aquellas ventanas de la oficina con orientación sur y sudeste. Con la introducción de cortinas en la herramienta informática PHPP, cuando éstas permanecen cerradas, los resultados indican que la ganancia de energía térmica a través de las ventanas se reduce entre un 33% y un 50%. Como consecuencia de los resultados,

concluyen que las cortinas deben permanecer abiertas durante todo el invierno y que se han de cerrar entre Abril y Septiembre.

Durante el año 2015, Ascione et al. (Ascione, Böttcher, Kaltenbrunner, & Vanoli, 2015a, 2015b) desarrollaron en dos artículos un estudio completo acerca de un edificio de oficinas en Berlín, de forma rectangular y orientación este-oeste en sus lados mayores. La investigación comienza con la monitorización de un recinto para cada orientación predominante, como base para su posterior comparación de los resultados con el modelo simulado del edificio. La validación de los resultados, en base al error normalizado del sesgo, tal y como sugiere el Ministerio de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy (DOE), 2015), creador del motor de cálculo, indica que el modelo simulado se comporta igual que el real. Con esta validación realizan diferentes variaciones sobre la simulación en cuanto a la apertura de las cortinas. En su modelo automatizan la programación de la apertura y cierre de las cortinas en función de los diferentes valores de iluminancia exterior. De allí obtienen, siguiendo la categoría II de confort en el interior del edificio (UNE-EN ISO 15251 (Comité Técnico AEN/CTN 100, 2008a)), que para la estación estival, el edificio actual presenta 196 horas dentro de los límites de confort si no se cierran las cortinas en todo el día. Los resultados del estudio indican que, con la programación actual de las cortinas, cerradas en horario de trabajo son de 661. En otra modificación a la programación exponen que, si se activasen de forma automática las cortinas para iluminancia horizontal mayor de 100w/m^2 se alcanzaría un punto óptimo de 731 horas confortables. Estos resultados indican que, con una correcta programación del cierre de las cortinas, las horas que el edificio permanecería por debajo de 26°C aumentan un 880%. Su resultado refleja la importancia de las cortinas en el comportamiento térmico interior de los edificios. En el segundo artículo, se completa el estudio con el análisis económico teniendo en cuenta los costes de instalación y mantenimiento de los diferentes tipos de cortinas, así como de la iluminación requerida y sus costes asociados. El resultado muestra una tasa de retorno del 3% por año, por lo que al cabo de 30 años la instalación se encontraría amortizada.

1.3.8. Cubierta con cobertura vegetal

La cubierta es una parte de la envolvente del edificio que representa un 30% de la energía consumida. Desde el Plan de ahorro y eficiencia energética en España 2011-20 (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011b) se promueven medidas de rehabilitación de la envolvente. Por tanto, la promoción y difusión de la creación de cubiertas ajardinadas debería alcanzar tanto a nuevos edificios como a la rehabilitación de los ya existentes.

Los avances en sistemas de impermeabilización y el desarrollo de sistemas ligeros han contribuido a su implantación en las nuevas construcciones. Pese a su extenso uso encontrado en latitudes del norte de Europa desde hace mucho tiempo, la sobrecarga que suponía colocar una cobertura de tierra y vegetal en la cubierta limitó el aumento de la implementación de estos sistemas. La utilización de las cubiertas ajardinadas ayuda

en la protección del medio ambiente, reduciendo el impacto medioambiental de las construcciones y regenerando espacios verdes, formando ecosistemas urbanos e integrando la naturaleza en la arquitectura.

El diseño integral en la edificación puede conseguir edificios que minimicen los daños al medioambiente e incluso que colaboren en su regeneración. Los sistemas de cubierta ajardinada reducen el consumo energético, limpian el aire y el agua, mejoran la salud de las personas y conforman un espacio para el desarrollo de la biodiversidad. El resultado final depende de una serie de factores como el sustrato, la topografía, el microclima, la vegetación utilizada, etc.

El país considerado líder en el desarrollo de las cubiertas verdes es Alemania, donde el 12% de las cubiertas planas tienen cobertura vegetal. La industria de las cubiertas vegetales crece allí entre un 10% y un 15% al año.

La composición de una cubierta verde no se ajusta a una serie de parámetros fijos (Figura 25), sino que puede variar en función de los objetivos a conseguir mediante su instalación. También influye la zona climática donde se ubique, las normativas a las que esté sujeta su instalación y el fabricante o instalador elegido.

Figura 25. Diferentes tipos de cobertura vegetal para una cubierta. Fuente: google.es, sin referencia explícita

Sobre una sub-base compuesta por cualquier tipo de sistema constructivo, con aislamiento y lámina impermeable, se coloca una capa de drenaje que permita la evacuación del agua, un fieltro anti raíces, el sustrato y la vegetación que se escoja.

El sustrato puede seleccionarse entre distintas mezclas ofertadas por las empresas especializadas en cubiertas vegetales, para las que se recomiendan un 75% de materia inorgánica y el restante 25% de orgánica. No es recomendable la utilización de sustrato para jardines sobre todo en proyectos de cierta envergadura, donde el sustrato puede deteriorarse rápidamente por compactación y acidificación (Components, 2013). En cuanto a su espesor, se recomienda un mínimo de 7 cm, siendo entre 10 cm y 20 cm el espesor más empleado.

En este tipo de cubiertas, con un sustrato limitado, se recomiendan plantas con raíces superficiales, con capacidad regenerativa y resistentes a la radiación directa del sol.

De entre la múltiple literatura generada en torno a las cubiertas vegetales, comenzamos destacando una investigación desarrollada por Elena Palomo del Barrio (Barrio, 1998), cuyo objetivo es la consecución de un modelo matemático que se asemeje al modelo de funcionamiento de las cubiertas ajardinadas en verano para un clima mediterráneo. Estudia de forma detallada todos los componentes de una cubierta vegetal, establece un modelo simplificado de transferencia de calor en una dirección y emplea el coeficiente “Leaf area index” (LAI), que se define como la relación entre el flujo de radiación de onda larga que entra por un plano de las hojas y el flujo que abandona por la cara opuesta. El desarrollo matemático de cada uno de los componentes de la cubierta, junto con la recogida de variables físicas climáticas como radiación solar, humedad relativa y temperatura, permite la resolución del modelo. Modificaciones posteriores al modelo desarrollado, permiten observar la influencia del espesor y el tipo del terreno en cuanto a peso y conductividad térmica. También las ventajas, respecto de otras clases de plantas, que ofrecen aquellas cuyo desarrollo sea en horizontal y tengan un buen follaje.

Si bien en este trabajo no se comparan los resultados, encontramos otros que se refieran al clima mediterráneo de los que se puedan extraer comportamientos comunes y conclusiones.

En una investigación realizada por Niachou et al. (Niachou, Papakonstantinou, Santamouris, Tsangrassoulis, & Mihalakakou, 2001), llevado a cabo en la ciudad de Atenas, se realizó la plantación de cubiertas vegetales sobre algunos de los edificios experimentados. Además se introdujo la variable de que algunos poseían aislamiento en la cubierta y otros no. Con todos estos datos experimentales comenzó el proceso de análisis de las propiedades térmicas de las cubiertas y el ahorro energético que suponían, a través de una aproximación matemática. Para la toma de datos de temperatura exteriores se usó una cámara termográfica, también se usaron sensores de temperatura y humedad para el interior. En los edificios que poseían aislamiento en la cubierta, las diferencias de las temperaturas tomadas entre los edificios con cubierta ajardinada y los que no, variaban más en función de la tipología de la planta que cubría la cubierta que por el hecho de encontrarse ajardinada. En los edificios que no poseían aislamiento, las diferencias sí que eran notables, del orden de unos 10°C. La segunda fase del trabajo mostró que el valor de la transferencia de calor por conducción a través de la cubierta (U) en edificios no aislados, bajaba de más de 7 W/m²K hasta menos de 2 W/m²K. Para edificios con cubiertas aislada, el valor de U se encontraba entre 0,26 W/m²K y 0,4 W/m²K para las cubiertas no ajardinadas, y 0,24 W/m²K y 0,34 W/m²K para las cubiertas ajardinadas, de ahí la menor influencia de la cobertura ajardinada en este segundo caso.

En otro trabajo llevado a cabo por Lazzarin et al. (Lazzarin, Castellotti, & Busato, 2005), con la medición y simulación de la cubierta vegetal de un hospital en Vicenza (Italia). Uno de los principales parámetros de estudio de este trabajo es el fenómeno de evapotranspiración que tiene lugar en verano y que permite que la cubierta actúe como sistema de refrigeración. Los resultados al respecto reflejan una clara mejora en el funcionamiento de la cubierta en verano cuando el sustrato se encuentra húmedo, lo cual

permite el proceso de evaporación, mientras que en condiciones de sustrato seco los beneficios de la cubierta verde se ven muy reducidos. En invierno, los resultados indican que los altos niveles de humedad en el sustrato conllevan reducción de las temperaturas en la cubierta, de forma que el flujo de calor saliente no mejora los valores que se obtienen en una cubierta convencional.

En un trabajo posterior, realizado por algunos de los autores del citado previamente (Niachou et al., 2001), y encabezado por Santamouris (Santamouris et al., 2007), se realiza un análisis sobre el balance energético obtenido en un edificio sobre el que se recogieron datos experimentales, para la simulación del comportamiento en verano y en invierno. Además de obtener resultados similares a los recogidos en el artículo de Niachou (Niachou et al., 2001), se diferencian, gracias a la simulación el ahorro energético para ambas estaciones del año. El ahorro se consigue principalmente en verano, mientras que en invierno, el comportamiento es similar al obtenido con una cubierta tradicional.

Acerca de estudios realizados para estudiar el comportamiento de las cubiertas ecológicas en otras regiones climáticas, nos centramos en los climas cálidos y húmedos correspondientes al clima tropical. Dos trabajos desarrollados por Wong et al. (Wong, Chen, Ong, & Sia, 2003)(Wong, Cheong, et al., 2003) se llevan a cabo en la ciudad de Singapur, en el primero se recogen datos sobre una cubierta vegetal en un centro comercial, y en el segundo realizan un modelo basado en los datos recogidos en el anterior. Además de recoger datos ambientales a distintas alturas, toman datos superficiales sobre zonas transitables y zonas con cubierta ajardinada con y sin vegetación. Las temperaturas superficiales son mayores en las zonas transitables, menores en las zonas sin vegetación, en las que el sustrato húmedo y el sol producen el efecto de transpiración de la superficie; aún menores son en las zonas cubiertas con vegetación, donde las hojas de las plantas, además de favorecer la transpiración, sombrean la superficie del terreno. Debido al sombreamiento de la radiación solar, en las zonas abundantemente ajardinadas se producen flujos exotérmicos desde el edificio durante todo el día, mientras que en el caso de las zonas transitables y las zonas no ajardinadas, durante el día se gana calor hacia el edificio. En el segundo trabajo, cuantifican el ahorro energético de un edificio con distintos tipos de cubiertas, y vegetación y sustrato, en caso de ser ajardinada. Para ello utilizan el programa de simulación DOE-2, con el que calculan que la reducción en la demanda energética del edificio puede llegar al 14,5%. Concluyen también que este ahorro sería mayor si se incrementase el espesor del sustrato, y que la humedad del terreno afecta sustancialmente a los resultados obtenidos. A mayor espesor, el ahorro es más acentuado en el caso de cubiertas relativamente secas, y la relación respecto de la profundidad no es lineal. Se concluye que tiene un cierto límite en cuanto al ahorro máximo conseguido por el edificio.

Cardoso y Vecchia (Tibério Cardoso & Vecchia, 2013) realizan un trabajo en un clima similar, pero en este caso en Brasil. Para su investigación, construyen 10 prototipos de módulos a escala real con diferentes tipos de cubiertas tradicionales y ajardinadas,

incluyendo el uso de materiales ecológicos y reciclados. En cada uno de ellos se recogen sus temperaturas a distintas alturas entre las diferentes capas de la cubierta, mediante la instalación de termopares. Destacan en su estudio que, la acción de la radiación solar en el incremento de la temperatura en la base de la tierra se produce hasta siete horas más tarde que en otros prototipos; de esta forma, la temperatura más elevada se alcanza durante el periodo nocturno. También destacan que, durante todo el periodo de monitorización, la temperatura media en la base de la capa de tierra es 10°C menor que en el caso de la cubierta de teja, y de 15°C para la cubierta de chapa galvanizada. Indican que la temperatura a lo largo del día es mucho más estable y que la temperatura durante la noche es mayor en la base de la capa de tierra que en el ambiente, por lo que la cubierta funciona como un disipador de energía respecto del edificio. Como conclusión destacan que la temperatura media en la base de la capa de tierra es menor que la temperatura media del ambiente exterior.

Trabajos que comparan el comportamiento de las cubiertas vegetales en ciudades con distinta climatología, nos permiten comprender el funcionamiento de las cubiertas ajardinadas. En una investigación realizada por Sailor (Sailor, 2008) se desarrolla un modelo matemático detallado que incluye los efectos de la radiación de onda corta y larga sobre la vegetación, a transferencia de calor y convección en el follaje, evapotranspiración, transmitancia, acumulación de calor y humedad de la cubierta.

La finalidad de este modelo matemático es implementarlo en un programa informático para la obtención de simulaciones, para lo que se utiliza EnergyPlus, programa del Departamento de Energía de EEUU, y que combina sistemas anteriores como BLAST y DOE-2, también desarrollados por instituciones gubernamentales de EEUU. La validación del modelo se realiza mediante datos recogidos en la Universidad de Florida, donde se monitorizó una cubierta vegetal durante todo un año. La introducción de los parámetros climáticos y las características de la cubierta monitorizada permiten la obtención de datos a partir de la simulación.

Mediante la simulación se extraen los datos relativos a una cubierta ajardinada que estuviera ubicada en Chicago y en Houston, siendo muy distinta la climatología entre ambos. En el caso de Chicago, el clima es de tipo continental, con veranos húmedos y cálidos e inviernos donde se obtienen temperaturas bajo cero. El clima de Houston es de tipo tropical, con veranos cálidos y húmedos e inviernos suaves, similar a las ciudades tropicales ya escritas.

De los resultados para ambas ciudades se extraen conclusiones que aportan coherencia a los resultados ya descritos más arriba. En general se observa que la simulación de Chicago es más sensible a las variaciones de las características de la cubierta en los resultados de invierno, mientras que en Houston son más sensibles en verano. Al producirse variaciones en el espesor del sustrato, se producen mejoras en el aislamiento de la cubierta tanto en verano como en invierno, especialmente en el invierno de Chicago, donde las temperaturas son más bajas.

Si se incrementa la densidad de la vegetación, se reduce el consumo en verano en ambos casos, pero esto es contraproducente en invierno. El incremento de riego también aporta beneficios en verano para ambos climas, más notables en Chicago donde el clima es más seco.

De la comparativa entre el comportamiento en invierno del clima tropical y mediterráneo se había observado como en inviernos de humedad y temperaturas medias como los tropicales, el funcionamiento de la cubierta verde parecía ser peor que en el mediterráneo. El mayor beneficio obtenido también en Chicago, en comparación con Houston, reafirma la idea de que cuanto menor es la temperatura y la humedad exterior, mejor rendimiento se consigue en invierno.

Volviendo al análisis de las cubiertas vegetales para un clima mediterráneo, una investigación reciente (2016) desarrollada por Silva et al. (C. M. Silva, Gomes, & Silva, 2016) realiza un análisis experimental sobre una cubierta vegetal a lo largo de un año del que posteriormente valida su comportamiento mediante la simulación del edificio con el programa EnergyPlus (U.S. Department of Energy (DOE), 2016), gracias a la aplicación desarrollada en parte con el citado artículo de Sailor (Sailor, 2008), para el que utiliza los modelos de coeficiente de convección exterior e interior TARP y DOE-2. Para validar el modelo, del que destaca haber conseguido valores estándar de desviación menor al alcanzado por éste y otros artículos, indica que debido al clima mediterráneo, las estaciones del año que dan lugar a una mayor demanda de energía son el verano y el invierno, por lo que descarta el análisis en base al comportamiento de la cubierta en primavera y otoño. Después de validar el modelo, proceden a un análisis del ahorro de energía que produce una cubierta vegetales extensivas, semi-intensivas e intensivas respecto de cubiertas blancas, con un valor de albedo de 0,2, y cubiertas tradicionales negras, con un valor de albedo de 0,6, siendo éstas las cubiertas más extendidas en la región de Portugal; los resultados indican que las cubiertas vegetales representan entre sí similares necesidades de demanda de energía calorífica y que, en cuanto a la demanda de energía de refrigeración las cubiertas extensivas demandan entre 3 y 6 veces más energía que las cubiertas semi-intensivas e intensivas, respectivamente. Además de esta conclusión, el ahorro de energía se cifra en torno a un 20% para las cubiertas extensivas, un 50% respecto de las intensivas y un 65% para las cubiertas semi-intensivas, respecto de las cubiertas tradicionales para un clima mediterráneo.

La información recabada de estos artículos, nos ayudará posteriormente a validar el modelo simulado ejecutado para nuestro estudio, en similares condiciones de desarrollo y análisis.

2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UN EDIFICIO

Las leyes físicas que conforman el comportamiento térmico de un edificio se rigen por la transferencia de calor en alguna de sus diversas formas. La transferencia de calor se puede dar entre cualquier tipo de material, de forma que aumenta o disminuye la cantidad de energía que posee el propio material. Esta cantidad de energía se divide en dos partes: por un lado se encuentra la energía latente, asociada al estado o fase del mismo y por otro la energía sensible, que se asocia con la energía cinética de las moléculas del mismo; es la energía térmica externa o calor (Q)(1), la que altera el estado natural de cualquier molécula, aumentando su temperatura y, en su caso, forzando su cambio de estado. El calor necesario varía para cada cuerpo en función de su calor específico (c_e), que se define como la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia, valor que en la física general depende de las condiciones en que se encuentre el sistema, en función de la presión y el volumen durante el proceso. Sin embargo, la mayoría de materiales sólidos y fluidos se consideran incompresibles por la acción de la temperatura o la presión, por lo que se aproxima que el calor específico de un material es igual al calor específico a presión constante (c_p) o a volumen constante (c_v), durante el proceso.

$$Q = mc_p \Delta T [J] \quad (1)$$

Siendo la razón de transferencia de energía térmica, o razón de transferencia de calor, la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo ($\dot{Q}$ [J/s] ó [W]); y la razón de transferencia de calor por unidad de superficie lo que comúnmente se denomina flujo de calor ($\dot{q}$ [W/m²]).

La primera ley de la termodinámica, o principio de conservación de la energía expresa que, durante un proceso, la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. Por tanto, el balance energético de un edificio se ha de definir como la diferencia de energía térmica de un sistema, teniendo en cuenta también la generación de calor que resulta al transformar cualquier tipo de energía (eléctrica, nuclear, mecánica) en energía térmica, expresado en la ecuación (2).

$$Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{gen} = Q_{térmica} \quad (2)$$

2.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El balance de energía no se puede realizar analizando únicamente las superficies, ya que éstas no tienen masa ni espesor; en todo caso se pueden aplicar mecanismos de condición de frontera, o límites, para la adaptación de la ecuación de la conservación de la energía; pero la transferencia de calor ha de analizarse en función del tipo de material que intervenga en el sistema. Para los diferentes estados del material y las formas de energía, los tres mecanismos básicos de transferencia de calor son la conducción, la convección y la radiación.

2.1.1. Mecanismo de transferencia de calor: Conducción

La conducción de calor se produce entre las partículas más energéticas de un cuerpo hacia las partículas menos energéticas. Se puede dar en materiales sólidos, líquidos o en gases. En los sólidos, la conducción se da como consecuencia del transporte de energía de los electrones libres y la vibración de las moléculas en una retícula. En los líquidos y gases se debe a las colisiones y la difusión de las moléculas en un movimiento aleatorio.

La conducción de calor se puede expresar de tres formas, en función del volumen del cuerpo a analizar, por coordenadas rectangulares, cilíndricas o esféricas. En el caso de un edificio, la transferencia de calor por conducción se considera rectangular y su ecuación general unidireccional en estado estacionario se define por la ley de Fourier (3). Para cada material constructivo, la ley de Fourier se expresa matemáticamente proporcional a la conductividad del material (k), su área (A) y la diferencia de temperatura entre dos caras enfrentadas ($T_1 - T_2$), e inversamente proporcional a su espesor (Δx).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} [W] \quad (3)$$

Sin embargo, los análisis en estado transitorio también han de tener en cuenta la propiedad del material en cuanto al almacenamiento de energía térmica a lo largo del tiempo, lo que se denomina la difusividad térmica (α) (4) y que define cuán rápido se difunde la energía a través del cuerpo, relacionando su conductividad (k), con la densidad (ρ) y el calor específico del material (c_p).

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} [m^2/s] \quad (4)$$

El análisis en estado transitorio de la ecuación general en tres dimensiones se enuncia como sigue, con el nombre de ecuación de Fourier-Biot (5):

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{e_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

En el campo de la edificación, la mayoría de materiales sólidos en estudio tienen una dimensión predominante por lo que, para una pared, cimentación o cubierta se cancelan las derivadas para las coordenadas y y z . Sin generación de calor por el propio material, la ecuación se denomina ecuación de Laplace y se define matemáticamente como se muestra en la ecuación siguiente.

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (6)$$

Aplicando la derivada en función del espesor, la ecuación (7) indica que la diferencia de temperatura entre dos puntos es lineal, variando en función del espesor del material.

$$\frac{dT}{dx} = c_1 \quad (7)$$

La derivada de segundo grado resuelve la ecuación anterior, ya que la solución para $x_1=0$ permite conocer la segunda constante C_2 .

$$T(x) = c_1x + c_2 \quad (8)$$

Como consecuencia, la constante C_1 queda en función del espesor del material.

$$T(0) = C_2 \quad T(e) = C_1e + T(0)$$

Según esto, la transferencia de calor por conducción en una dimensión puede resolverse conociendo las temperaturas en las caras opuestas del material. Además, aplicando la ecuación de Fourier, se obtiene que también puede resolverse conociendo el flujo de calor y una de las temperaturas en las caras. Expresándose matemáticamente como sigue:

$$\dot{q}(x = 0) = -k \frac{dT(0)}{dx} = -kC_1 [W/m^2] \quad (9)$$

$$\dot{q}(x = e) = -k \frac{dT(e)}{dx} = -kC_1 [W/m^2] \quad (10)$$

Una variante sobre la ecuación de Fourier (3) expresa la ecuación en función de la inversa de la conductividad térmica, llamada resistencia térmica (R), donde R se expresa como sigue:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_1 - T_2}{R} [W] \text{ y } R = \frac{e}{kA} [^\circ C/W] \quad (11)$$

El concepto de resistencia se aplica para la transferencia de calor por conducción a través de diferentes cuerpos paralelos, donde el flujo de calor a través de ellos se expresa por la ecuación (12) en función de la resistencia térmica total del sistema constructivo. La resistencia térmica total se define matemáticamente como la suma de las resistencias de cada uno de los materiales (13).

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{R_{Total}} [W] \quad (12)$$

$$R_{Total} = \sum_{i=1}^n R_i \quad (13)$$

2.1.2. Mecanismo de transferencia de calor: Convección

De la misma manera que la conducción se aplica a los sólidos, la convección se aplica a gases y líquidos, como consecuencia del movimiento de las diferentes capas de un fluido que se encuentran a diferente estado energético. La convección puede darse por diferentes motivos: por flotabilidad, que se da por la simple diferencia de temperaturas entre dos capas y su diferencia de densidad, y como consecuencia del desplazamiento de masa, por viento o mediante medios externos (ventiladores). Aunque el fundamento de la convección es diferente, se calcula de manera análoga a la transferencia de calor por conducción, ya que se resuelve por la relación entre las temperaturas, expresada por la ley de Newton del enfriamiento (14). La diferencia radica en que el coeficiente de transferencia de energía térmica por convección (h) no depende del fluido, si no que se determina de forma experimental y varía en función del tipo de convección que se esté registrando.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{amb}) [W] \quad (14)$$

La causa es debida a que, al recoger los datos de velocidad en las capas del fluido que se encuentran junto al sólido, la velocidad se reduce hasta cero, de forma que la última capa no se mueve y la transferencia de calor se da por conducción. Por tanto, para la condición de frontera entre un sólido y un fluido, se determina la conductividad térmica del fluido (k_{fluido}) (15). La determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección (h) se realiza promediando los valores que toma el valor h para distancias entre capas locales respecto de la superficie sólida.

$$\dot{q}_{conv} = \dot{q}_{cond} = -k_{fluido} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} [W/m^2] \quad (15)$$

2.1.3. Mecanismo de transferencia de calor: Radiación

La radiación es la energía transmitida como ondas electromagnéticas debida a los cambios en la estructura electrónica de los cuerpos. La radiación se emite en mayor o menor medida por todos los cuerpos cuya temperatura esté por encima del cero absoluto, dándose casi por completo en el rango de longitud de onda entre 0,1 y 100 μm ; dentro de este rango también se encuentra la longitud de onda visible (luz) entre 0,4 y 0,7 μm , cuya única diferencia es que provoca la visión en el ojo humano.

Destacar que no es necesaria su transmisión a través de ningún cuerpo portador, pudiéndose dar hasta en el vacío, como ocurre con la radiación solar; de toda la radiación solar un 50% se emite en rango visible, un 38% se emite por encima del rango (infrarroja) y una 12% se emite por debajo del rango visible (ultravioleta).

Además de la aportación de energía externa que realiza el sol, en este análisis también se va a considerar la transferencia de calor por la radiación térmica de los cuerpos, emitida en función de su temperatura; esta forma de transferencia de calor se da entre todo tipo de cuerpos: sólidos, líquidos o gaseosos.

La radiación térmica depende de la superficie del cuerpo emisor y del receptor, ya que afecta a poca distancia al interior del cuerpo, siendo la superficie de la mayoría de materiales de la naturaleza opaca a la radiación térmica. La razón de transferencia de calor por radiación desde una superficie se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann, (16), en función de la superficie desde la que se emite y la temperatura (T [K]) del cuerpo, siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8}$ [W/m² K⁴]). Como dicha ecuación se aplica a un cuerpo negro que emite la radiación máxima, no se cumple para la mayoría de objetos que nos rodean (objetos grises). Podemos aplicar una expresión modificada (17), para tener en cuenta el coeficiente de emisividad del cuerpo (ε), siendo $0 \leq \varepsilon \leq 1$ y acercándose a 1 conforme la radiación del cuerpo se asemeja a la del cuerpo negro.

$$\dot{Q}_{rad} = \sigma A_s T_s^4 [W] \quad (16)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 [W] \quad (17)$$

También se toma que un cuerpo negro absorbe toda la radiación térmica que le llega, por lo que se nombra como absorptividad (α) la cantidad de radiación incidente en un cuerpo que es absorbida. La Ley de Kirchhoff (18) afirma que la emisividad y la absorptividad de una superficie son las mismas si la temperatura y la longitud de onda son la misma, cuestión que ocurre la mayoría de las veces en la naturaleza, donde el cuerpo y la fuente de radiación se encuentran a temperaturas similares.

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} [W] \quad (18)$$

En la naturaleza se da el caso de que los cuerpos se encuentran rodeados por completo por un gas. La ecuación de la transferencia de calor por radiación se define por la diferencia entre la temperatura superficial (T_s) y la temperatura ambiente (T_{amb}), en función de la emisividad (ε) y el área del material (A_s) que recibe la radiación.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{amb}^4) [W] \quad (19)$$

Como ya se ha comentado, para cuerpos grises, la emisividad (o absorptividad) de un material representa el coeficiente en porcentaje respecto del total de la radiación incidente (G), que el material absorbe. Por tanto, según la ecuación de conservación de la energía, el resto de energía incidente se refleja por la superficie del cuerpo o se transmite hacia su interior (20).

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{trans} \quad (20)$$

Lo que, dividiendo entre la radiación incidente (G), se define matemáticamente como:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (21)$$

Entendiéndose por α al coeficiente o valor correspondiente a la emisividad del material, por ρ al coeficiente o valor correspondiente a la reflectividad superficial y por τ al coeficiente o valor correspondiente a la transmisividad a través de un material.

En el ámbito de la construcción, la mayoría de materiales son opacos a la radiación, por lo que la transmisividad se considera igual a cero y la radiación incidente se simplifica:

$$1 = \alpha + \rho \quad (22)$$

Si bien el comportamiento ante la radiación es opaco, cuestiones como el color visible de la superficie y la rugosidad de la misma pueden influir en el coeficiente de absorptividad del material (Figura 26). Colores visibles como el blanco, el verde, el rojo o el negro indican que esa longitud de onda ha sido reflejada por el cuerpo; por lo tanto una cantidad de energía ha sido reflejada, en lugar de ser absorbida, por el cuerpo. El color blanco indica que la totalidad de la fracción de energía térmica dentro de la luz visible ha sido reflejada y el cuerpo no absorbe esa energía. Lo contrario ocurre con el color negro, ya que ha absorbido la totalidad de ondas de luz en la fracción visible, absorbiendo la energía térmica asociada a ella. La rugosidad superficial de la superficie se obtiene en función de la relación entre el área aparente de la superficie de un sólido y el área real de esa superficie. Esta relación se aproxima a 1 cuanto más pulido se encuentre, siendo mayor cuanto más rugoso sea.

Figura 26. Distribución de la radiación solar: General (izqda.), sobre una superficie pulida (centro) y sobre una superficie rugosa (dcha.). Fuente: Elaboración propia

La radiación solar que llega a la tierra tiene un valor variable en función de la distancia al sol llamado irradiancia solar (G_s) de entre 1325 W/m^2 (cuando estamos más alejados, el 4 de Julio) y 1418 W/m^2 (3 de enero). De este total, una parte llega a la superficie sin haber sido absorbida por la atmósfera y se denomina Radiación directa (G_D), definiéndose como radiación difusa (G_a) a la cantidad de radiación que llega a la superficie tras haber sido reflejada por otro cuerpo. Con esto, la energía total que llega a una superficie se expresa por la ecuación (23), siendo θ el ángulo entre la perpendicular a la superficie y el rayo de sol (latitud, para superficies horizontales). La radiación

difusa es muy baja para días claros y puede llegar a significar el 100% en días totalmente nublados.

$$G_s = G_D * \cos \theta + G_d \quad (23)$$

2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE DE UN EDIFICIO

De forma simultánea, la transferencia de calor no puede darse de las tres formas, pero sí que pueden darse dos de ellas (Figura 27). En el caso de los sólidos opacos, la radiación se transmite a nivel superficial, por lo que la transferencia de calor en profundidad para el sólido se da por el mecanismo de conducción. Para los sólidos transparentes a ciertas longitudes de onda, el mecanismo de conducción se da en combinación con la longitud de onda para la que es transparente el sólido, transformándose al otro extremo del sólido en radiación difusa. Para el caso de los fluidos, se ha de distinguir entre los fluidos encerrados o sin movimiento y los fluidos que se mueven; los fluidos en ausencia de movimiento se comportan como un sólido y el mecanismo de transferencia es la conducción, los fluidos en movimiento transfieren su calor por convección forzada, debida a su desplazamiento; en ambos casos, si se da la radiación en el sistema, ésta traspasa el fluido hacia el otro extremo del cuerpo. Para el vacío, en ausencia de cuerpo que transporte energía, la conducción y la convección no se encuentran presente, siendo la radiación el único mecanismo que se da en ausencia de un cuerpo.

Figura 27. Mecanismos de transferencia de calor según las condiciones del sistema. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se va a analizar la transferencia de calor a través de un edificio en función de la tipología del sistema constructivo y de los cuerpos que lo conforman (Figura 28).

Figura 28. Esquema general de la transferencia de calor en un edificio. Fuente: Elaboración propia

La razón de la transferencia de calor a través de una pared plana opaca se ve expuesta por el exterior a la radiación y la convección externas, que pasan en forma de conducción a través de la pared y se emiten en forma de radiación térmica y convección superficial por la cara interior del edificio. En el caso de las partes transparentes, la transferencia de calor a través de la envolvente se da en forma de conducción por los cristales más la fracción de energía transmitida en forma de radiación hacia el interior; debido al menor espesor y valores de conductividad más altos de los cristales, la razón de transferencia de calor es mayor por las zonas transparentes que por las zonas opacas en la mayoría de los casos. Hay que tener en cuenta que la transferencia de calor siempre se da desde la zona energéticamente más elevada hacia la zona menos energética, lo que en las épocas invernales o por las noches indica que el sentido de la transferencia de calor va hacia el exterior desde el interior; el sentido en el que se muestra la transferencia de calor no altera el razonamiento expresado, simplemente en ocasiones el calor se “gana” desde el exterior y en otras el calor se “escapa” desde el interior del edificio.

También se puede hablar de casos de ganancia o pérdida de calor hacia la parte de la envolvente que se encuentra en contacto con el terreno, sólo que desde éste el calor se transmite por conducción, propagándose hacia el interior también por conducción a través de la envolvente.

Aún más particular es el caso de la ganancia o pérdida de calor en un recinto cerrado desde otro recinto cerrado adyacente del edificio, ya que si uno se encuentra a mayor temperatura que el otro (por cualquier tipo de razón: ocupación, temperatura de consigna,...) habrá una transferencia de calor entre ambos; la transferencia de calor en este caso es mucho menor ya que el gradiente de temperatura será mucho menor que entre el exterior y el interior, mientras que si ambos se encuentran a la misma temperatura, la razón será igual a 0, lo que implica que se pueden considerar superficies adiabáticas, según los procedimientos empleados para el cálculo de la demanda de energía de un edificio.

2.2.1. Procedimiento de cálculo de la demanda energética

Completando lo expresado en el apartado anterior, la norma UNE-EN ISO 13790:2011 (Technic Comité AEN/CTN 92, 2011) proporciona diferentes métodos de cálculo estandarizado para la evaluación de la cantidad de energía necesaria para satisfacer la demanda de energía de un recinto en cuanto a calefacción y refrigeración.

Dicha norma diferencia entre el método cuasi estacionario, que indica el cálculo por tramos largos de tiempo, correspondientes normalmente a las estaciones del año y los métodos dinámicos, donde para periodos cortos de tiempo (horarios) se tienen en cuenta el calor almacenado y disipado; la diferencia entre ambos es que en el primer caso se dan valores que se pueden aplicar de forma general al consumo medio del año pero el análisis horario permite disminuir los errores en estaciones del año intermedias incluyendo patrones de comportamiento, ocupación y funcionamiento de las instalaciones.

También el modo de cálculo del balance energético puede ser monozona o multizona, según los diferentes usos y características que vaya a tener el edificio, con las diferencias entre ambas de que la temperatura de consigna y otros datos de entrada como las tasas de ventilación se expresen de forma promediada o específica para cada recinto en estudio.

Nótese el cambio de nomenclatura para referirse a los diferentes flujos que utiliza la normativa UNE EN ISO 13790:2011 respecto a la utilizada en las ecuaciones 3, 12, 14 y 15.

El método de cálculo estacional o mensual se expresa matemáticamente:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{Trans} + \dot{Q}_{Vent} [W] \quad (24)$$

donde $\dot{Q}_{Total} [W]$ es la transferencia total de calor a cada recinto, $\dot{Q}_{Trans} [W]$ es la transferencia de calor por transmisión y $\dot{Q}_{Vent} [W]$ es la transferencia de calor por ventilación.

Las ganancias totales de calor $\dot{Q}_{gn} [W]$, se expresan como la suma de las ganancias solares $\dot{Q}_{sol} [W]$ y las ganancias internas $\dot{Q}_{int} [W]$ para cada recinto.

$$\dot{Q}_{gn} = \dot{Q}_{sol} + \dot{Q}_{int} [W] \quad (25)$$

Los valores de estas transferencias de calor se pueden obtener de la siguiente forma:

$$Q_{Vent} = \left(\sum A_i * U_i + l_k * \psi_k \right) (\theta_{int,set} - \theta_e) t [MJ] \quad (26)$$

donde A_i [m^2] es la superficie del elemento i de la envolvente, U_i [W/m^2K] es la transmitancia del elemento i de la envolvente, l_k [m] es la longitud de puente térmico lineal k , ψ_k [W/m^2K] es la transmitancia lineal del puente térmico k , $\theta_{int,set}$ [K] es la temperatura de consigna del recinto para calefacción y θ_e [K] es la temperatura ambiente exterior.

Q_{Vent} se define como,

$$Q_{Vent} = H_{ve}(\theta_{int,set} - \theta_e)t \text{ [MJ]} \quad (27)$$

donde H_{ve} [W/K] es el coeficiente global de transferencia de calor por ventilación, $\theta_{int,set}$ [K] es la temperatura de consigna del recinto para calefacción y θ_e [K] es la temperatura ambiente exterior. Además, el valor de H_{ve} se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$H_{ve} = \rho_a c_a q_{ve} \text{ [W/K]} \quad (28)$$

donde $\rho_a c_a$ [J/m^3K] es la capacidad calorífica del aire por volumen igual a $1200 J/m^3K$, q_{ve} [m^3/s] es el caudal de aire promediado en el tiempo. Se han utilizado los caudales descritos en CTE DB-HS3 (Spanish Government, 2009) para los caudales de ventilación mínimos exigidos en dormitorios y cuartos de estar y no se han considerado infiltraciones en el modelo estudiado.

La ganancia de calor por fuentes internas (Q_{int}) viene dada por la ecuación (29), definida por el sumatorio del flujo de calor proveniente de las fuentes de calor internas promediadas en el tiempo ($\phi_{int,mn,k}$) más la suma de la influencia del flujo de calor de las fuentes de calor de recintos adyacentes no acondicionados por el factor de reducción correspondiente $((1 - b_{tr,l})\phi_{int,mn,l})$.

$$Q_{int} = \left(\sum_k \phi_{int,mn,k} \right) t + \left(\sum_l (1 - b_{tr,l}) \phi_{int,mn,l} \right) t \text{ [MJ]} \quad (29)$$

Para finalizar, la ganancia de calor por las fuentes solares (Q_{sol}) (30) se define de forma similar a la anterior considerando los flujos de calor en el recinto estudiado más la influencia de los flujos provenientes de los recintos no acondicionados adyacentes.

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \phi_{sol,mn,k} \right) t + \left(\sum_l (1 - b_{tr,l}) \phi_{sol,mn,l} \right) t \text{ [MJ]} \quad (30)$$

El modelo horario simplificado no puede ser aplicado sobre un modelo completo estandarizado ya que las necesidades puntuales de un sistema puede variar a lo largo de la estación según las condiciones climáticas, además de que se necesitan multitud de datos de entrada de todos los recintos adyacentes para evaluar las necesidades térmicas en cada periodo horario, lo que puede llevar a la evaluación de la demanda de energía que de grandes variaciones y errores con respecto al análisis horario para otro periodo de tiempo horario.

En el caso de realizar un método de simulación detallado lo primero que ha de hacerse es garantizar la compatibilidad y la coherencia de los resultados obtenidos, por lo que han de cumplirse para cada uno de los datos de entrada y sistemas constructivos empleados, la normativa correspondiente para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor.

Como conclusión, en este apartado se puede ver que existen diferentes métodos establecidos por la propia norma a la hora de evaluar el balance energético y la demanda de energía que se genera en el edificio. Un método estacional válido para cuantificar la demanda energética de forma promediada y otro procedimiento detallado para conocer el comportamiento térmico del edificio según la climatología particular en periodos horarios.

Con el método estacional se halla la potencia de la energía auxiliar a instalar en el edificio para cumplir las necesidades de temperatura de consigna, descritas y sugeridas en el RITE (Spanish Government, 2013b), para tener unas condiciones interiores de temperatura satisfactorias para la mayoría de los usuarios. Con el uso de los métodos detallados se pueden obtener datos adicionales de condiciones de uso según las necesidades de operatividad en función del régimen de uso del edificio.

En la siguiente sección describiremos los procedimientos y normativas que evalúan la demanda energética de los edificios según los diferentes métodos descritos en este apartado y su evolución en los últimos años.

2.2.2. Procedimiento de evaluación de la sensación térmica

La norma UNE-EN ISO 7730 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2006) ha sido desarrollada en paralelo a la revisión de la norma americana ASHRAE 55 (Ashrae Standard, 2012), y se encargan de especificar los métodos para la medida y evaluación de los ambientes térmicos moderados. Parte de esta norma surgió del estudio llevado a cabo por P. O. Fanger y publicado en su libro “Thermal Comfort” (Fanger, 1973) en los años 70, el cual permite calcular el Voto Medio Estimado (PMV, por sus siglas en inglés) que se define como el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas respecto de una escala de sensación térmica de siete niveles (Tabla 1), y que se define matemáticamente como sigue (31):

+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutro
-1	Ligeramente fresco
-2	Fresco
-3	Frío

Tabla 1. Escala de sensación térmica de siete niveles

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028] \cdot \left\{ \begin{aligned} &(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15] \\ &- 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ &- 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ \begin{aligned} &3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ &+ f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} & \text{para } 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_{ar}} \\ 12.1\sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2.38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (33)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \\ 1.05 + 0.645I_{cl} & \text{para } I_{cl} \geq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (34)$$

Donde M es la tasa metabólica, en vatios por metro cuadrado [W/m^2]; W es la potencia mecánica efectiva, en vatios por metro cuadrado [W/m^2]; I_{cl} es el aislamiento de la ropa, en metros cuadrados kelvin por vatio [$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$]; f_{cl} es el factor de superficie de la ropa; t_a es la temperatura del aire, en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$]; $\bar{t}_r$ es la temperatura radiante media, en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$];

v_{ar} define la velocidad relativa del aire, en metros por segundo [m/s]; p_a es la presión parcial del vapor de agua, en pascuales (Pa); h_c es el coeficiente de transmisión del calor por convección, en vatios por metro cuadrado kelvin [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] y t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa, en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$].

Además de este índice, en las normas se describe el Porcentaje Estimado de Personas Insatisfechas (PPD, por sus siglas en inglés), que resulta del índice valor global PMV para indicar de forma individualizada una predicción cuantitativa del porcentaje de personas que se sentirán insatisfechas por notar demasiado frío o calor. Una vez determinado el valor del índice PMV, se calcula el PPD utilizando la ecuación siguiente:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353 \cdot PMV^4 - 0.2179 \cdot PMV^2) \quad (35)$$

Los índices anteriores hablan de la sensación térmica global de los usuarios, pero también existen otros índices que hablan de la incomodidad local de una parte del cuerpo.

La incomodidad debida a las corrientes de aire puede expresarse como el porcentaje de personas que se estima que sentirán molestias por el aire, la tasa de corriente de aire (DR) se calcula mediante la ecuación (36).

$$DR = (34 - t_{a,l}) (\bar{v}_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot TU + 3.14) \quad (36)$$

Para $\bar{v}_{a,l} < 0.05 \text{ m/s}$: usar $\bar{v}_{a,l} = 0.05 \text{ m/s}$
 Para $DR > 100\%$: usar $DR = 100\%$

Donde $t_{a,l}$ es la temperatura local del aire, en grados Celsius, 20°C a 26°C ; $\bar{v}_{a,l}$ es la velocidad local media del aire, en metros por segundo, $< 0.5 \text{ m/s}$ y TU es la intensidad

de turbulencia local, en porcentaje, 10% al 60% (si se desconoce, puede emplearse 40%).

La incomodidad local también se puede deber a una gran diferencia entre la temperatura del aire en la cabeza y en los pies; el porcentaje de insatisfechos (PD) fue establecido a partir de los datos originados mediante análisis de regresión lógica, y sólo debería usarse si $\Delta t_{a,v} > 8^{\circ}\text{C}$. La siguiente ecuación permite calcular el porcentaje de personas insatisfechas.

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad (37)$$

En función de todos estos índices expuestos, el ambiente térmico para un espacio se puede catalogar entre tres categorías: A, B y C, según la Tabla 2.

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto		Incomodidad local			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				Diferencia de t^a vertical del aire	Provocada por suelo caliente o frío	Asimetría radiante
A	<6	-0,2<PMV<+0,2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0,5<PMV<+0,5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0,7<PMV<+0,7	<30	<10	<15	<10

Tabla 2. Categorías de ambiente térmico

Una revisión a la normativa ASHRAE 55 incluye la modificación hacia un nuevo sistema de confort adaptativo (ACS, por sus siglas en inglés). Esta revisión justificada y documentada por Brager y de Dear en sendos artículos a finales de los 90 e inicio de los 2000 (Brager & Dear, 1998; Dear & Brager, 2002) hablan del uso de este nuevo procedimiento para aquellos edificios que únicamente se sirven de la ventilación natural durante el verano, para regiones templadas de la tierra. El objetivo de este procedimiento es la regulación de las condiciones interiores del edificio por los usuarios, mediante la apertura de huecos y la adaptación de su actividad y vestimenta a las condiciones climáticas. El modelo adaptativo se basa en la relación directa entre la temperatura exterior y la temperatura óptima en el interior, expresada matemáticamente de diferentes formas por varios autores. De Dear y Brager indican que las ventajas de adoptar un sistema adaptativo son la adaptación de cualquier tipo de edificio, el ahorro de energía conseguido con la adaptación de la temperatura anterior al ambiente exterior, la relación directa con la adaptación a las preferencias del usuario para la consecución de ambientes confortables y un funcionamiento más continuo y sin cortes entre los modos pasivos y activos de ventilación en un edificio. En su segundo artículo, sobre la base experimental de 21.000 conjuntos de datos tomados en 160 edificios de diferentes regiones climáticas, proponen la realización de una regresión lineal para hallar la expresión matemática correcta sobre la que fundamentar el modelo adaptativo incorporado en la normativa ASHRAE 55. Después de realizar ajustes sobre los

edificios en estudio y la calidad de los datos tomados, expusieron que el modelo adaptativo quedaba definido por la ecuación (38), relacionando la temperatura óptima interna de confort (T_{comf}) con la temperatura ambiente exterior (T_{amb}).

$$T_{comf} = 0,31T_{amb} + 17,8 [^{\circ}C] \quad (38)$$

El siguiente paso propuesto en su método es conocer los márgenes de la banda de confort para que el voto medio (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) se encuentren dentro de los límites de la categorización de los edificios, según se expone en la tabla 2. La categoría de confort para el 90% de personas ($\pm 0,5$ PMV) supone una banda de confort de $5^{\circ}C$, y para el 80% de los ocupantes (0,85 PMV) es de $7^{\circ}C$, centradas en la temperatura óptima de confort y que se puede expresar gráficamente como sigue en la Figura 29.

Figura 29. Propuesta de banda de confort para el estándar adaptativo (ACS), aplicable a edificios con ventilación natural. Fuente: Elaboración propia

Este procedimiento, calificado según la normativa ASHRAE como opcional no es de aplicación universal, como sí lo es el procedimiento de la norma UNE-EN ISO 7730. La normativa americana sólo aplica el procedimiento para edificios con ventilación natural, que pueden tener sistemas mecánicos de climatización interior pero sólo para calefacción.

2.2.2.1. Procedimiento de medición de las variables físicas

Para la recolección de datos cuyo fin sea la determinación de todas las variables físicas descritas anteriormente, tanto para la transferencia de calor como para el cálculo del PMV de los ocupantes, se dispone de una normativa internacional que rige algunas pautas en el procedimiento a seguir, la norma UNE-EN ISO 7726 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2004) sobre la ergonomía de los ambientes térmicos y los instrumentos de medidas de las magnitudes físicas. En dicha norma se establecen los requerimientos que deben cumplir los usuarios de instrumentos para la medida de las condiciones ambientes, como son: temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad absoluta, velocidad del aire, temperatura operativa y temperatura superficial. Los

instrumentos utilizados deben cumplir con unos criterios de exactitud, posición, intervalo de medida y tiempo de respuesta.

En cuanto a la exactitud, cada variable debe cumplir con un criterio relativo a la magnitud a medir y, en caso de superarla, debe indicarse expresamente para su conocimiento posterior. Para la posición de los sensores se indican los valores de 0,1 m, 0,6 m y 1,1 m, correspondientes a las alturas de tobillo, abdomen y cabeza respectivamente, si el uso del recinto está destinado a encontrarse sentado. En caso de encontrarse de pie el usuario, la altura de colocación de los sensores es de 0,1 m, 1,1 m y 1,7 m. El intervalo de medida debe cumplir unos requerimientos diferentes para cada caso y el tiempo de respuesta debe especificarse como una característica del instrumento de medida.

En el caso de querer medir la temperatura del aire (t_a), la exactitud de las mediciones debe ser menor o igual a 0,5 °C para un intervalo de medida de entre 10 °C y 40 °C. Los instrumentos que son aptos para la medición de la temperatura del aire son: termómetro de dilatación (líquidos o sólidos), termómetros eléctricos (platino, termistor y termopar) o termomanómetros. Como factores que alteran el comportamiento de los sensores destaca: la relación entre el tamaño del sensor y la velocidad del aire a que se expone (menor cuanto más pequeños y menos aire) y la influencia de la radiación en la medición que realiza el instrumento, instando desde la propia norma a protegerlo con láminas reflectoras de su influencia; en la misma norma se especifica como deseable una indicación del valor medio obtenido en un periodo de 1 minuto.

La temperatura radiante media ($\bar{t}_r$), también necesaria para el cálculo del PMV, es la suma algebraica de todos los flujos radiantes intercambiados por las partes de cuerpo expuestas a las fuentes de calor que lo rodean. Para la determinación de este valor, existen diversos métodos como: emplear un globo negro, un radiómetro de dos esferas, o un cálculo a partir de la temperatura superficial (t_s) de las superficies circundantes y el factor de forma entre una persona y las superficies circundantes. A falta de instrumentación específica para la medición, este último método se expresa matemáticamente como la suma de la temperatura superficial de cada superficie (T_{si}) por el factor de forma entre esa superficie y la persona (F_{p-i}), siendo F_{p-i} el resultado numérico tabulado de la relación entre la persona y la superficie radiante, y las dimensiones de ésta.

$$\bar{t}_r = \sum_i^n T_{si} \cdot F_{p-i} \quad (39)$$

Como en el caso anterior, a falta de instrumentación específica, la temperatura radiante plana (t_{pr}) de cada superficie se calcula de forma análoga a la temperatura radiante media ($\bar{t}_r$), como la suma de la temperatura superficial de cada superficie por el factor de forma entre la superficie estudiada y la superficie radiante.

La presión parcial del vapor de agua (p_a), necesaria para el cálculo del índice PMV, es otra magnitud que se puede calcular con la ayuda de la norma UNE-EN ISO 7726

(Comité Técnico AEN/CTN 81, 2004), dentro del Anexo D para la medición de la humedad absoluta del aire. Los instrumentos válidos para la medición de la humedad absoluta se tratan de un psicrómetro o de un higrómetro de cloruro de litio. Para caracterizarla, se utilizan dos parámetros: la razón de humedad y la presión parcial de vapor de agua. La presión parcial del agua es la presión que ejercería el vapor de agua si él sólo ocupara el volumen ocupado por el aire húmedo, a la misma temperatura; de forma sencilla se puede calcular a partir de la humedad relativa (HR) como porcentaje de la relación entre la presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo, y su presión de saturación (p_{as}), a idénticas temperatura y presión total (40).

$$HR = 100 \cdot \frac{p_a}{p_{as}} \quad (40)$$

La medición de la velocidad del aire es difícil de efectuar de manera precisa debido a la fluctuación aleatoria y los cambios de dirección, pero se puede llevar cabo con el uso de determinados tipos de anemómetros. La velocidad media del aire se puede obtener como la media de la velocidad en un intervalo de tiempo y por la desviación típica de la velocidad (SD) (41).

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_{a_i} - v_a)^2} \quad (41)$$

La intensidad de la turbulencia (TU), del flujo del aire, se define como la desviación típica dividida por la velocidad media y suele expresarse en tanto por ciento (42).

$$TU = \frac{SD}{v_a} \cdot 100 \quad (42)$$

2.3.MARCO NORMATIVO SOBRE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. REQUERIMIENTOS ACTUALES

La evolución en cuanto al consumo de energía en la edificación lo sitúa como una parte importante de la demanda de energía que tienen España en particular y la UE en general. Según los datos reflejados en el plan de ahorro y eficiencia energética 2011-2020 (IDAE) (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011b) y su informe final sobre el Análisis del consumo energético del sector residencial en España (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2011a), el porcentaje del consumo total que representa el sector residencial lo sitúa en casi el 30% de la demanda de energía, llegando hasta un 40% la demanda que representa el sector edificación según los datos expuestos en la Directiva Europea 2010/31(Commission, 2010). El sentido del consumo energético durante los últimos 30 años ha sido creciente y sostenido hasta el comienzo de la crisis hacia 2008 (Figura 30).

Figura 30. Tendencias del Consumo Energético (ktep) del Sector Residencial en España. Fuente: IDAE

A partir de este punto, el número de hogares ha crecido de forma mucho más pausada, pero esta consecuencia no obedece únicamente a la crisis, sino que también coincide con la implementación de mejoras en la normativa utilizada en España, con la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación y su Documento Básico sobre el Ahorro de Energía (Spanish Government, 2013a), que sustituyó a la normativa anterior, NBE-CT-79 (Spanish Government, 1979).

Las diferencias más palpables entre ambas normas redundan en la aplicación de coeficientes límite de transferencia de calor más restrictivos para los sistemas constructivos de la envolvente del edificio; la bajada del coeficiente máximo de transferencia de calor obligó al uso de sistemas constructivos diferentes en la definición del edificio.

Además, dentro de este mismo documento, se inscribió la obligatoriedad de que parte de la demanda energética de un edificio fuese resuelta por medio de fuentes de energía renovables. La consecuencia más visible de este cambio resultó en que la mayor parte de la demanda de agua caliente sanitaria debiera ser suplida por paneles solares situados en las cubiertas de los edificios; y la consecuencia más reseñable es que, en la mayoría de edificios construidos en base a esta norma, las calderas o acumuladores de agua caliente de fuente auxiliar eléctrica o gas no necesitan ser encendidos durante la mayor parte del año, siendo el edificio autosuficiente salvo en la época invernal.

El incremento de la eficiencia energética de los edificios no es una consecuencia de políticas particulares de cada país, sino que existen normativas y directivas a nivel internacional que determinan las mejoras que se han venido realizando en los últimos años y establecen las guías de las futuras mejoras que se establecerán en los próximos años.

2.3.1. Directiva europea 2010/31

En sustitución de la anterior norma sobre eficiencia energética, el parlamento europeo aprobó en 2010 la Directiva Europea relativa a la eficiencia energética de los edificios (Commission, 2010) con el objeto de realizar una utilización eficiente, prudente,

racional y sostenible de la energía. De acuerdo con el cumplimiento del Protocolo de Kyoto, en el que se comprometían a reducir la emisión de gases de efecto invernadero en un 20% con respecto a las de 1990, se adoptaron unas medidas para cumplir con este objetivo junto con una mayor aportación de la energía procedente de fuentes renovables, hasta un total de un 20%.

Esta directiva establece los requisitos para el marco común general de una metodología de cálculo de la eficiencia energética de los edificios, tanto para edificios nuevos como para edificios o unidades que vayan a sufrir una reforma mayor al 25% o que afecte a sus instalaciones de calefacción o refrigeración. En estos edificios, los estados deben asegurar que se cumplan unos requisitos mínimos si se trata de nueva edificación y de que se adopten medidas que mejoren la eficiencia energética en el caso de la rehabilitación.

Para asegurar el cumplimiento de esta normativa deja a los países el desarrollo de los procedimientos de cálculo de la eficiencia energética de los edificios, para los que indica que se deberá expedir una certificación de la eficiencia energética que será siempre exigible y que deberá estar expuesta en el caso de edificios públicos. La metodología de cálculo debe tener en cuenta las características térmicas reales del edificio: la envolvente, el aislamiento, la climatización, ventilación, iluminación y orientación y demás instalaciones o cargas que modifiquen el comportamiento del edificio. Además, la metodología se basará en un modelo comparativo con una edificación de referencia respecto de la que se compara tanto el porcentaje de demanda de energía salvado, como los niveles óptimos de rentabilidad de la acción propuesta, tanto de coste directo como de mantenimiento posterior.

2.3.1.1. Tendencias para edificios en los próximos años. Edificios de consumo de energía casi nulo

También indica requerimientos a futuro estableciendo que, antes del 31 de diciembre de 2020, todos los edificios nuevos sean edificios de consumo de energía casi nulo. Para el caso de los edificios nuevos que estén ocupados y sean propiedad de autoridades públicas sean edificios de consumo de energía casi nulo, este plazo se termina el 31 de diciembre de 2018.

2.3.2. Normativa y reglamentación española

La entrada en vigor de la directiva anterior establece el marco común que posteriormente, cada país, debe adaptar a su propia normativa. En el caso de España, se actualizó en 2013 el Documento Básico sobre el ahorro de energía (Ministerio de Fomento, 2013), que establece los límites de la transferencia de calor en los elementos constructivos según las zonas climáticas, y se aprobó el Real Decreto 235/2013 (Spanish Government, 2010), sobre el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios. Este Real Decreto deroga y completa al anterior Real Decreto 47/2007, incorporando las novedades que salieron de la aprobación de la Directiva Europea 2010/31.

El Real Decreto 235/2010 indica que, para facilitar el cumplimiento del procedimiento básico, se definen documentos reconocidos por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo para realizar la certificación energética: Programas informáticos de calificación energética. Especificaciones y guías técnicas sobre la aplicación técnico-administrativa de la certificación energética y cualquier otro documento que facilite la aplicación de la certificación correspondiente. En nuestro país, actualmente, existen varios programas informáticos con los que se puede realizar la calificación energética. Para edificios de nueva construcción encontramos en la actualidad la Herramienta Unificada Lider-Calener (HULC) (Ministerio de Industria Energía y Transporte, 2016b), mientras que para edificios existentes nos encontramos con los programas CE3 y CE3X (Ministerio de Industria Energía y Transporte, 2016a). Estos programas son documentos reconocidos para realizar la calificación energética de los edificios y el procedimiento se divide en dos partes: en una primera fase se cuantifica la demanda de energía del edificio de forma análoga al modo cuasi estacionario descrito previamente en la norma UNE-EN ISO 13790:2011; en una segunda parte se evalúa la manera en que se ha resuelto esa demanda con la implementación de los sistemas de climatización del edificio, de forma que el consumo de estos sistemas se evalúa según la fuente de alimentación primaria (electricidad, gas, solar,...) y este consumo se pasa según un coeficiente numérico a la cantidad de kilogramos de CO₂ que se emiten al ambiente para el edificio o la unidad de edificio que se está calificando. El procedimiento de certificación energética se completa con la etiqueta que se le da a ese edificio; según el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 15217 (Comité Técnico AEN/CTN 92, 2009) su etiqueta lo identifica en siete niveles según el percentil en base a las emisiones de CO₂ por el que se encuentra ordenado el parque inmobiliario actual.

2.3.3. Descripción de otros procedimientos: DOE-2, LEED, PASSIVHAUS

La calificación en base a una comparación y ordenación surgió en la Unión Europea para facilitar el conocimiento de los usuarios del producto que se encontraban adquiriendo, el cual se usa en la actualidad para multitud de cuestiones, no sólo para edificios. Sin embargo, este procedimiento no es el único a nivel internacional, existen otros procedimientos como BREEAM (B. G. Ltd., 2009) o LEED (U. S. Green Building Council, 2016) que evalúan el diseño del edificio en función de parámetros como la ubicación y el transporte, el uso eficiente del agua, el tipo de materiales y recursos empleados, la calidad del ambiente interior o la innovación en el diseño y, por supuesto, su demanda de energía. El valor numérico que resulta de este método expresa la calificación alcanzada por el edificio, pero también permite conocer el potencial de mejora que se puede alcanzar en su diseño. Para ello, la norma UNE-EN 15603 (Comité Técnico AEN/CTN 100, 2008b) establece dos tipos de calificaciones, en base al modelo simulado para la predicción de la demanda del edificio o sobre la medición real del consumo del edificio durante los últimos años.

Dentro de la Unión Europea destaca un procedimiento de calificación denominado Passivhaus (Passivhaus institut, 1991a) que cuenta con su propio programa informático de calificación PHPP (Passivhaus institut, 1991b). Este estándar nació en Alemania en

1991 y después se ha ido extendiendo a nivel internacional, contando con viviendas certificadas en multitud de países, incluido España. Los edificios que quieren ser calificados como “casa pasiva” garantizan un elevado confort interno, donde las temperaturas permanecen casi estables a lo largo del día, con un consumo de energía muy bajo, por lo que la calificación energética que obtienen es muy elevada. Las premisas de diseño que los distinguen de otros edificios es que se basan en una elevada masa térmica en su envolvente, una baja permeabilidad al aire para disminuir la demanda de energía, una orientación óptima hacia el sol de invierno y sistemas de ventilación cerrados que canalizan el aire exterior a través de sistemas de intercambio calor-frío que no haga necesaria la apertura de ventanas para la ventilación. El resultado de estos edificios consigue un edificio de consumo casi nulo, referenciado por la Directiva Europea 2010/31 y muestra grandes ahorros de demanda de energía de los edificios en regiones del norte de Europa; por el contrario destaca que este tipo de edificios en el sur de Europa, tiene una demanda de energía más elevada en verano que en invierno que aun así le confiere una alta calificación energética según el estándar de calificación energética europea.

Hasta ahora se han visto procedimientos de calificación que se basan en conceptos más amplios que el simple consumo de energía; sin embargo, en los Estados Unidos de América, el Departamento de Energía del Gobierno (DOE) puso a disposición de los técnicos el programa de simulación por ordenador EnergyPlus (U.S. Department of Energy (DOE), 2016). Si bien la base de definición del edificio es similar a la propuesta por la norma UNE-EN ISO 13790:2011, las grandes diferencias radican en que la normativa de referencia ASHRAE (Ashrae Standard, 2012) estipula condiciones para los recintos interiores diferentes a las españolas, tanto en temperaturas como en ratios de ventilación de los recintos; por lo que el uso de este programa necesita ser adaptado a los requerimientos establecidos en España. Otras diferencias entre ambos es que el motor de cálculo EnergyPlus incorpora la transferencia de calor por radiación, permite la definición de calefacción por elementos radiantes, muros Trombe, interconexión de sistemas de refrigeración y calefacción, incorporación de zonas como plenum, forjados sanitarios y fachadas ventiladas para la impulsión o como zonas intermedias no acondicionadas, etc...

No obstante, la mayor diferencia entre ambos programas es que el nivel de definición del comportamiento térmico del edificio es notable: la normativa española y europea se centran en la mejora de la eficiencia energética del edificio respecto de edificios actuales y en la reducción de la emisión de gases, por lo que el uso de un programa cuasi estacionario (UNE-EN ISO 13790:2011) estima de forma estacional la demanda de energía del edificio, mientras que EnergyPlus, un programa de simulación detallada del edificio realiza un tratamiento individualizado de datos de consumo, demanda de energía y condiciones interiores a nivel horario.

2.4. MONITORIZACIÓN Y SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS

Para el edificio estudiado, y con el fin de poder cuantificar la influencia de las estrategias pasivas estudiadas, se va a desarrollar un procedimiento de parametrización desde el registro experimental de los datos de temperatura, la simulación del edificio con una herramienta informática y posteriores modificaciones al modelo simulado.

2.4.1. Monitorización de edificios

En dos revisiones publicadas por O. Guerra-Santin y C. Tweed (O. Guerra-Santin & Tweed, 2015a, 2015b) en 2015, se habla de los diferentes métodos de registro de datos para edificios en uso y los métodos de evaluación de los edificios. Desde un primer momento habla de que las variables a controlar varían en función de cómo y por qué se realiza esa monitorización, indicando que el método de recolección de datos variará según quién se encarga de esa recolección de datos. Si las personas que se encargan son los propietarios del edificio, su motivación normalmente será verificar que el comportamiento coincide con lo esperado en fase de construcción, aunque también puede ser para evaluar el cumplimiento y las posibles mejoras que pueden aportar al edificio; aunque es esperable que si la monitorización la realiza una parte externa al edificio sus resultados sean difundidos como aprendizaje para posteriores estudios y proyectos. Los trabajos que se enfoquen para conocer el confort térmico que se alcanza en el edificio se pueden dividir entre mediciones de larga o de corta duración; pero ambos han de estar centrados en la recolección de datos para obtener el voto medio estimado (PMV), desarrollado en los años 70 por Fanger y utilizado como normativa a través de la norma UNE-EN ISO 7730 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2006), o en la recolección de medidas de temperatura interior para su posterior evaluación según rangos predefinidos para esa temperatura por normativa (UNE-EN ISO 15251) (Comité Técnico AEN/CTN 100, 2008a) o por el Reglamento de obligado cumplimiento (RITE, en España) (Spanish Government, 2013b). Por el contrario, si el trabajo se enfoca en conocer el ambiente interior del edificio, las variables a medir deberían de ser el CO₂ y la calidad del aire interior. También indica que para la obtención del comportamiento energético, existen diferentes métodos como los ya nombrados Passivhaus, BREEAM y los procedimientos de cada país, y que las variables a considerar deberían ser el consumo punta del edificio, el equivalente de emisiones de CO₂ al ambiente o el análisis de ciclo de vida del edificio.

En todo caso, al tratarse de edificios en uso hay que contar con la influencia que representan los ocupantes a la hora de posibles errores o diferencias entre los datos experimentales y los resultados esperados, así como con su proactiva participación para la obtención correcta de los datos. En otro estudio de esta misma autora sobre el comportamiento térmico de dos casas con bajo consumo de energía (Olivia Guerra-Santin, Tweed, Jenkins, & Jiang, 2013), la autora indica que el estudio sólo se pudo realizar durante dos semanas debido a los problemas que planteaban a los usuarios.

Es por ello que, la autora propone que las campañas de monitorización del edificio deben dividirse entre amplias o cortas por la simple cuestión de que las campañas largas requieren de incomodidades para el usuario como la presencia de cables u objetos que pueden modificar su comportamiento, mientras que las cortas deben centrarse en la toma de medidas puntuales y específicas que puedan mostrar más precisión en los datos. Cuestiones sugeridas por la norma ASHRAE 55 (Ashrae Standard, 2012) o UNE-EN ISO 7726 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2004) indican la colocación de los sensores en el centro de las habitaciones, lo que en muchos casos impide el funcionamiento normal del edificio y aporta incomodidad a los usuarios, por lo que el desarrollo de normativa estandarizada acerca de cómo monitorizar un edificio ha de ser adaptado en estos casos.

Para el registro de datos cuyo fin sea el cálculo del PMV de los ocupantes, los datos deben tomarse en posiciones no expuestas al sol y considerar tanto la temperatura del aire como la temperatura radiante media de las superficies. Para resultar menos intrusiva a los ocupantes, nombra como referencia otra investigación realizada por Limbachiya (Limbachiya, Vadodaria, Loveday, & Haines, 2012), quien concluye que con la toma de datos de la temperatura del aire será suficiente. También se necesitan datos sobre la velocidad del aire, que a falta de estudios puntuales puede ser asumida por 0,1m/s y datos como el tipo de vestimenta de los usuarios y su tasa metabólica, que se encuentran en los anexos B y C de la norma UNE-EN ISO 7730 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2006).

A nivel internacional se celebraron unas jornadas de trabajo en Bruselas en el año 2011 sobre test a escala real para la evaluación del comportamiento higrotérmico y energético en edificación. A estas jornadas se presentaron 16 trabajos de diversos países que se habían realizado sobre edificios de uso real y sobre celdas de escala real tipo Paslink, dentro del Proyecto Passys (Commission & Directorate-General XII for Science, 1990) para el ensayo de sistemas, tanto constructivos como de instalaciones. Entre sus puntos de atención, destacaban de forma común: la precisión, calibración, posición y protección de los sensores empleados; la dificultad acerca del manejo de la totalidad de los datos recabados y la metodología para la estimación del error cometido en el ensayo. De todos estos estudios, al hilo de lo expresado en la norma anterior, cabe indicar que el procedimiento seguido en cuanto a la ubicación, protección y calibración de los instrumentos era seguido de forma común para todos los trabajos presentados, pero en cuanto al intervalo de las medidas tomadas la variación se encuentra muy dispersa, existen trabajos cuya monitorización se realiza cada 10 segundos y otros que la realizan cada hora, por lo que no se encuentra un patrón común; ni siquiera con respecto a la norma que sugiere 1 minuto, ya que la moda de los intervalos fue de 10 minutos entre la toma de datos.

La referencia a celdas a escala real para realizar la monitorización y analizar el comportamiento de sistemas constructivos trata de mejorar la precisión y la repetitividad de los ensayos llevados a cabo. Sin embargo, estos estudios tienden a convertirse en estudios estacionarios y a no tener en cuenta las variaciones en las

condiciones de frontera de los componentes (Strachan & Baker, 2008), como se nombró en la editorial de la revista *Buiding and Environment* n° 43, de 2008. Este tipo de estudios suele usarse como modelo a escala de un edificio real, para la posterior validación de sistemas novedosos y su implementación en programas dinámicos de simulación, en los que se comprueba el comportamiento simulado de los sistemas ensayados. Estudios presentados dentro de esta revista por Strachan y Vandaele (Strachan & Vandaele, 2008) y por Baker y van Dijk (Baker & van Dijk, 2008) hablan de no caer en la parametrización excesiva de variables que se encuentran fuertemente ligadas con otras, de la influencia que tiene la inercia térmica de los días previos en los análisis que se llevan a cabo y de las diferencias que se encuentran entre realizar validaciones de sistemas mediante un sistema estacionario con un modelo simulado detallado del edificio. Ambos estudios hablan de la calibración y la validación del error cometido mediante el análisis estadístico de los resultados de las desviaciones entre el modelo y la realidad, hablando también del error que se comete en la adquisición de datos.

El error medio cuadrado (RMS) de los datos no sólo viene determinado por el error del tipo de sensor empleado (E_1), sino que también tenemos errores en la adquisición de datos (E_2), expresado de forma matemática en la ecuación (43).

$$RMS = \sqrt{E_1 + E_2} \quad (43)$$

Esta cuestión nos parece interesante y realizaremos un estudio previo en nuestro edificio, ya que entendemos que el intervalo entre los datos tomados en el edificio afecta de forma importante a los valores obtenidos.

En cuanto a la topología del sistema empleado para la monitorización de edificios, hay que hablar no sólo de la ubicación de los sensores sino del resto del sistema que se encarga de recoger los datos y guardarlos o mostrarlos para su posterior tratamiento. Este aspecto ha sido estudiado por Tanzia Sharmin et al. (Sharmin et al., 2014), quienes realizaron la monitorización sobre 12 apartamentos en un complejo compuesto por dos edificios, en Alberta (Canadá), considerando el uso de energía, el comportamiento térmico del edificio y la calidad del aire interior. En esta investigación, la medición se realizó sobre habitaciones en idéntica posición para cada planta, con diferentes orientaciones de sur o norte, en cada caso. En la fase experimental se emplearon equipos de medida situados junto a una de las particiones interiores de los recintos para la monitorización de temperatura, humedad, CO_2 y calidad del aire interior, mientras que se ubicaron equipos de medida de uso de agua y energía de forma unitaria para cada apartamento, siendo la duración del estudio de un año completo para observar el comportamiento completo del edificio. Entre las conclusiones se incluye que los apartamentos con orientación norte tienen una mayor pérdida de calor y, por tanto, generan una mayor demanda de energía; al contrario de lo esperado, también los apartamentos orientados al sur en plantas intermedias resultaron con una gran demanda de energía, por lo que sugiere un aislamiento diferenciado en función de la orientación del recinto. También sugiere el uso del agua de lluvia reciclada como agua de uso para

elementos no consumibles, como el wáter, aunque en este estudio se descarta el potencial uso de este sistema para el edificio en estudio, en la actualidad sí que existen edificios con ese sistema de recuperación de agua. En el edificio en estudio también se indica que los niveles de CO₂ encontrados son mayores a 1000 ppm, lo que espera pueda ser remediado con un mejor uso de sistemas de climatización e intercambio de aire para mejorar la calidad del aire interior.

Sobre viviendas unifamiliares es más sencillo conseguir una análisis pormenorizado de todos los recintos, como en el caso del estudio realizado por Ian Ridley et al. (Ridley et al., 2013), una estación meteorológica completa recogió todos los datos ambientales a lo largo de un año y valores de temperatura, humedad y CO₂ fueron registrados en cada recinto. Todo ello conectado por radiofrecuencia a un aparato de recogida de datos. El estudio experimental fue realizado durante un año tomando medidas medias cada 5 minutos, que ellos consideran es el intervalo correcto para relacionar los cambios bruscos que se produzcan en el edificio; posteriormente dividieron los resultados entre dos fases, durante la estación estival se centraron en determinar el número de horas en las que el edificio se encontraba por encima de una temperatura deseable según la norma UNE-EN ISO 15251 (Comité Técnico AEN/CTN 100, 2008a), y durante el invierno se centraron en el análisis de los datos recogidos para conocer el consumo de energía que se había hecho en el edificio durante toda la estación del año. Al tratarse de un edificio construido bajo el estándar Passivhaus, también se realizaron test para comprobar la pérdida de calor por infiltración en diciembre de 2011, lo que requiere de una ayuda completa del usuario ya que mientras se lleva a cabo el test, los usuarios no pueden desarrollar su vida en el edificio.

Para realizar estudios tan completos como el anterior, lo habitual es que sean realizados sobre celdas de estudio estandarizadas, como el llevado cabo por Anna L. Pisello et al. (Pisello, Cotana, Nicolini, & Buratti, 2014). La monitorización continua sobre un recinto que no está habitado permite el estudio de multitud de variables como son la influencia de estrategias pasivas sobre el resultado obtenido; los instrumentos de medición interiores pueden ser colocados en el centro del recinto y en sus laterales y la presencia de cables y la ubicación exacta de instrumentación no incomoda, hasta un total de 15 sensores colocados en un recinto menor a los 10 m². En este caso pudieron comprobar a escala real, y tomando datos cada 10 minutos, el tiempo que tardaban los recintos en caer desde una temperatura de consigna hasta un estado estacionario, análisis sobre la infiltración de aire, temperaturas sobre cada pared según su orientación y consumo de energía para cada celda de ensayo durante toda la estación invernal.

Un tercer tipo de estudio de monitorización es el que se puede llevar a cabo en un edificio dedicado a la enseñanza o la investigación; en España se cuenta con el proyecto PSE-ARFRISOL sobre edificios de consumo casi nulo, en los que se han realizado diversos artículos (Castilla et al., 2010; Ferre, 2010; Suárez, Gutiérrez, Pistono, & Blanco, 2011) en edificios dedicados a la investigación como el llevado a cabo por Silvia Soutullo et al. (Soutullo, Enríquez, Jiménez, & Heras, 2014) en la rehabilitación de un edificio del CIEMAT (Madrid). La particularidad de estos estudios es que la total

disposición del edificio para su experimentación permiten realizar un trabajo completo sobre confort térmico y calidad del aire, además la rehabilitación de este edificio permitió la colocación de sensores en las mejores posiciones requeridas para su estudio, incluyendo el control sobre la apertura y cierre de puertas y ventanas y el consumo pormenorizado de todo tipo de energía en los recintos estudiados. Los resultados permitieron desarrollar análisis estacionales en función de las temperaturas de consigna preestablecidas y el análisis de las sensaciones de confort térmico PMV y PPD descritas en la norma UNE-EN ISO 7730 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2006), controlando variables tan arbitrarias como la vestimenta del usuario.

Para finalizar, en un edificio de la Universidad de Brunel, realizaron un estudio para comprobar la eficacia de la pintura aplicada a la cubierta plana del edificio; en el estudio llevado a cabo por Kolokotroni et al. (Kolokotroni, Gowreesunker, & Giridharan, 2013), dispusieron termopares entre cada una de las capas que conformaban la cubierta, además de instrumentación interior para temperatura y humedad. Tomando datos cada 10 minutos y calculando la diferencia entre las temperaturas tomadas en cada capa relacionaron los parámetros de reflectancia solar (τ) y emisividad (ε) para cada pintura con la diferencia entre la energía que pasaba a través de la cubierta en cada caso. Demostraron que el uso de pinturas con menor emisividad y mayor reflectancia en la cara exterior de una cubierta reduce la temperatura superficial y, por tanto, la razón del flujo de calor que se transmite hacia el interior del edificio. El trabajo resultó especialmente completo al servir estos datos experimentales como base para la modelización de la simulación detallada del edificio con el programa TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, 2016), detallando lo más posible al edificio en cuanto a los sistemas constructivos y a la tasa de ventilación e infiltración de aire en el edificio, así como las ganancias de calor internas debidas al equipamiento y la ocupación. En esta simulación utilizaron los datos meteorológicos del año típico meteorológico del aeropuerto de Heathrow (Inglaterra). La calibración posterior de los resultados muestra un error de banda del 10% respecto de los datos experimentales, que achacan los autores a la dificultad de modelizar la infiltración natural del aire en cada momento. En esta publicación se introducen cuestiones como la simulación y la calibración de los resultados, que serán los temas en los que nos centramos en los siguientes apartados, para la realización de la tesis.

2.4.2. Simulación del comportamiento energético de edificios

En el mercado actual, y aceptados en mayor o menor medida, existen multitud de herramientas informáticas y estadísticas para la predicción y la ayuda en el diseño del comportamiento térmico del edificio. Aunque ya hemos nombrado algunos de ellos, existen aún más herramientas específicas para medir determinados parámetros, y los estudios utilizan unos u otros según la adaptación al modelo en estudio.

Un estudio realizado por Jens Pfafferott et al. (Pfafferott, Herkel, & Wambsganß, 2004) habla del análisis realizado sobre un edificio de oficinas de bajo consumo de energía en el que se usa la estrategia pasiva de la ventilación nocturna. La monitorización de la

ventilación y las temperaturas interiores sirven como comparación entre los datos reales y los resultados simulados, con el método de Monte-Carlo. Divide la monitorización entre: 1) una campaña que dura dos años para conseguir los datos de consumo de energía, flujo de aire con sistemas mecánicos, las ganancias de energía por fuentes internas y la adquisición de datos meteorológicos; y 2) campañas cortas de toma de datos sobre la temperatura en las oficinas y la infiltración del aire. Los datos fueron analizados en forma horaria con una resolución base de 5 minutos. El análisis lo basaron en tres pasos: la preparación del modelo, la identificación de los parámetros a medir en las campañas cortas y el estudio de la precisión de los resultados simulados con los datos experimentales de la campaña larga. La preparación del modelo previo ayudó a la identificación de los parámetros a estudiar, como: las ganancias internas, los periodos de ocupación y los flujos de aire forzado en las oficinas. También, la monitorización de las campañas cortas introduce el concepto de adaptar la normativa de monitorización a edificios en uso, de donde deducen que la colocación de los sensores de temperatura en las paredes no muestra la temperatura del aire, pero sí que indica un valor casi idéntico a la temperatura operativa del recinto. El análisis mediante el modelo de Monte-Carlo y el análisis de Fourier ayudaron en la predicción del comportamiento del edificio con una buena precisión en los resultados. De este estudio, fundamentalmente nos quedamos con la conclusión de que la validación de los resultados requiere del uso de herramientas estadísticas, y de que la preparación previa es fundamental para la modelización precisa de un edificio.

Otro estudio realizado por Marinosci et al. (Marinosci, Strachan, Semprini, & Morini, 2011), con la colaboración de Strachan, prueba la validación de los resultados simulados mediante la experimentación real sobre el comportamiento de una torre de ensayo en la que aplicaron los conocimientos sobre un fachada ventilada y el principio de pantalla de lluvia para su posterior simulación. La monitorización experimental, tomada cada 5 minutos, al colocar sensores de temperatura en las dos caras de la fachada ventilada (protegidos por láminas de aluminio los que se encontraban al exterior) y anemómetros de hilo caliente, aportaron datos sobre la distribución vertical de la temperatura en la fachada ventilada. Para la referencia completa del ambiente, utilizaron una estación meteorológica con piranómetro colocada junto al experimento. Para altos valores de radiación, la correlación lineal de los datos a lo largo de la cavidad de aire es mucho más clara que para bajos valores de radiación. En este caso, el modelo simulado se realizó por un programa de elementos finitos, que permite analizar el comportamiento térmico para cada punto, en función de las características ópticas de cada componente. Las herramientas estadísticas de la desviación media y el coeficiente de correlación de Pearson, fueron usadas para validar el comportamiento predictivo llevado a cabo en la simulación, con altos valores de correlación.

Además de contar con estas herramientas para cuestiones concretas, en esta tesis nos vamos a centrar en los estudios realizados con el motor de cálculo EnergyPlus (U.S. Department of Energy (DOE), 2016), para la simulación energética de edificios.

2.4.2.1. Origen de la herramienta informática EnergyPlus

Los orígenes del programa EnergyPlus surgen por la unión, llevada a cabo por el Departamento de Energía de Estados Unidos de América, entre los programas DOE-2 y BLAST. Tal y como explican Crawley et al. (Crawley et al., 2001) en su estudio sobre la creación de este programa de simulación, une la programación de ambas corrientes llevadas a cabo desde los años 70, con lo mejor de cada uno, dado que los costes de mantenimiento de ambos son elevados: La escritura de su código en Fortran tiene como consecuencia la falta de una interfaz, pero la creación de un modelo con rutinas de trabajo que muestran los resultados de energía en intervalos de 15 minutos, resulta como una herramienta de simulaciones suficientemente precisa para la reproducción del comportamiento real. Resuelve problemas como la adsorción de humedad de los sistemas constructivos, la inserción de propiedades de radiación en el sistema y los flujos de aire entre diferentes recintos, con la determinación de propiedades superficiales en cuanto a conducción y convección. Permite la inserción en el código de variables como las cargas internas del edificio, las propiedades de los vidrios que componen la envolvente, la elección de programaciones que afecten tanto a las instalaciones como a la ocupación o el control de las cortinas, así como la elección del intervalo de tiempo de paso para la determinación de los resultados numéricos. Como resultado, el programa muestra las variables calculadas en cuanto al confort térmico de los usuarios y la iluminación de los recintos en estudio, prediciendo el comportamiento térmico del edificio y el balance energético del edificio con el nivel de detalle deseado por el usuario. Debido a todo esto, el programa necesita los datos básicos de construcción con las características de todos los materiales en uso (espesor, conductividad, emisividad), pero también necesita de una ubicación del edificio, tanto para su posición y orientación como para la climatología de la zona donde vaya a construirse.

Por aquel entonces, la creación de un modelo de las instalaciones del edificio requería de unos conocimientos que rebasaban a los meramente constructivos, trabajos como el de Ihm et al. (Ihm, Krarti, & Henze, 2004) en 2004 ponen de manifiesto la necesidad de la inserción de datos en archivos de texto simple (.txt) en formato ASCII, al igual que para la inserción de datos climáticos o de las características del edificio.

Su potencial empezó a observarse con la comparación de sus resultados respecto de los obtenidos por otros procedimientos; Henninger et al. (Henninger, Witte, & Crawley, 2004) muestran los resultados derivados en su estudio de la comparación de las diferentes versiones de EnergyPlus con los 22 puntos de control del funcionamiento de un programa de simulación, creados por la Agencia Internacional de Energía (IEA) y conocidos como HVAC BESTEST. Los resultados de la versión EnergyPlus 1.0.0.023 y las siguientes mostraron una comparación con diferencias menores al 1% respecto de las previstas por los métodos establecidos por la IEA, por lo que desde el inicio se mostró como una herramienta fiable para la simulación.

Al ser un programa en el que se puede implementar el código para su posterior estudio, investigaciones como la de Sailor (Sailor, 2008) en 2008 resultaron en la implementación de un módulo para el EnergyPlus, conocida como “Ecoroof” que permitieron la simulación veraz de conceptos como evapotranspiración en las cubiertas vegetales, lo que hasta ese momento se resolvía, simplemente, despreciándolo. La definición en la cubierta vegetal del modelo incluye la altura de las plantas, las propiedades ópticas de las hojas, el índice de área de hojas y la caracterización térmica y paramétrica del substrato en el que se planta la cubierta vegetal. Las pruebas de comparación de los resultados teóricos con los experimentales dio una desviación típica de 2,9°C, pero con una correlación total respecto de los resultados experimentales, hasta que posteriores refinamientos del programa han mejorado los resultados. No obstante, este hecho pone de manifiesto que es un programa en plena evolución y mejora.

Desde 2010, el uso de este programa como herramienta para el estudio de edificios ha crecido en un 600% (fuente: ScienceDirect) lo que, unido al perfeccionamiento de las diferentes versiones del programa y la multitud de estudios encontrados nos hacen centrarnos en estudio recientes para comprobar el funcionamiento y alcance de esta herramienta informática.

2.4.2.2. Modelos de edificios con el programa SketchUp, simulados con el complemento OpenStudio

Francesco Asdrubali llevó a cabo un estudio en 2012 (Asdrubali et al., 2012) en el que, además de comprobar la influencia de un espacio invernadero aparejado a un edificio realizó una comparación de los resultados mostrados por diferentes procedimientos y programas informáticos. Tomando como experimentación real un apartamento orientado hacia el sur, con estancia invernadero además de las interiores, se centró en monitorizar el consumo energético del apartamento a lo largo del periodo invernal (entre Octubre y Marzo); para su comparación, realizó el cálculo según el método casi estacionario descrito en la norma UNE-EN ISO 13790 (Technic Comité AEN/CTN 92, 2011) y por el método 5000 (Commission, 1986), así como los modelos de simulación transitorios TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, 2016) y EnergyPlus, a través del complemento gratuito OpenStudio (National Laboratory of the U.S. Department of Energy, 2016) desarrollado para el programa de dibujo SketchUp (Trimble, 2016). Las conclusiones mostraron por una parte que, los métodos estacionarios tienden a sobreestimar la aportación de energía debido a la radiación solar en los meses de radiación alta; y que aunque la predicción de energía usada en ese periodo fue similar para todos los procedimientos, el motor de cálculo usado en EnergyPlus es el más cercano a la realidad.

Dentro del campo de estudio de los espacios invernadero en viviendas, otro estudio publicado por Rempel et al. (Rempel et al., 2013) trataba de la interpretación del comportamiento de 4 viviendas de diferente forma y con espacio invernadero en el estado de Oregon (EEUU) y su posterior comparación con los resultados mostrados al ser analizadas en EnergyPlus mediante el complemento OpenStudio, citado en el

artículo anterior. La monitorización de los espacios se realizó con sensores de temperatura en intervalos de 10 minutos y con una estación meteorológica situada en el exterior para conocer las condiciones ambientales. Un resultado mostrado en este estudio, y que llevaremos a cabo en el nuestro, es que la comparación de los datos ambientales respecto de los años típicos meteorológicos muestra diferencia entorno al 10% para las temperaturas y la radiación solar incidente en los edificios, lo que puede llevar a errores dada la influencia que tiene el ambiente en el comportamiento térmico interior del edificio. La definición geométrica de todos los materiales encontrados en los edificios se realizó en base a guías estandarizadas de las características térmicas de los materiales, a falta de datos específicos de la fabricación. Como conclusión, expresaron la importancia de un buen diseño en su orientación hacia el sur y de la separación térmica que debe haber entre el suelo y el edificio, dada la alta pluviometría encontrada en esa región. Para nuestro interés particular, indicar que las simulaciones realizadas sobre cada edificio mostraron una explicación de la variabilidad de temperaturas encontradas entre el 84 y el 93% respecto de los valores experimentales, siendo mucho menor el error para valores de temperatura exterior medios y bajos.

Similares conclusiones fueron obtenidas en un estudio realizado por Felices et al. (Felices, Viñas, & Losada, 2017). La investigación, llevada a cabo sobre un espacio invernadero en un edificio bioclimático en Madrid, consistió en la recogida de datos sobre el recinto estudiado durante las estaciones de verano e invierno y su posterior simulación con la herramienta OpenStudio. El recinto estudiado, que cuenta con un alero que impide la llegada de la radiación solar en verano, mostró que las temperaturas alcanzadas en su interior durante el invierno eran mayores que en verano. Con esta modificación sobre los recintos invernadero en el sur de Europa queda resuelta la problemática del sobrecalentamiento de los invernaderos por culpa de la insolación, tal y como se ha descrito en otros estudios similares. En cuanto a las conclusiones respecto de la comparación de los datos con los resultados de la simulación, destacar que error medio encontrado durante el invierno es de 6,5°C en el invernadero, con un coeficiente de correlación de 0,87. Mientras que para el verano el error medio es de 2,1°C, con un coeficiente de correlación de 0,96. La adaptación a la normativa española de los parámetros por defecto del programa americano resultó problemática, al no considerar aspectos como los puentes térmicos del edificio. Respecto al archivo climático proporcionado por la herramienta, se indica que sus diferencias con las condiciones climáticas encontradas durante la monitorización son las principales causantes de los errores medios encontrados en la investigación, sobre todo durante el invierno, por la variabilidad climática que se da en esa estación del año y que no respondió a la estabilidad en las temperaturas y la radiación solar encontrada durante el periodo de recogida de datos.

Desde la propia página de descarga del programa EnergyPlus, y del complemento OpenStudio, se pueden descargar una serie de archivos climáticos para multitud de localizaciones a lo largo del mundo. Estos archivos climáticos se componen de datos compuestos sobre el año típico meteorológico recogido en cada localización. Aunque no

dejan de ser una aproximación a la realidad climática encontrada, el uso de los archivos climáticos nombrados en los anteriores estudios permite la simulación de un edificio ideal en diferentes puntos del planeta, para su posterior comparación de resultados. La comparación de estrategias de enfriamiento en edificación fue realizada por Samani et al. (Samani, Leal, Mendes, & Correia, 2016), comparando los resultados entre Oporto, Nairobi y Bombay. Para empezar, la definición geométrica del edificio ha de ser completa en cuanto a características de materiales, ocupación, programación y funcionamiento de las instalaciones. En este caso se suponen condiciones de deriva puesto que las necesidades energéticas de una vivienda no tiene comparación entre las ciudades comparadas. Más allá de la importancia de este artículo, lo más destacable es el análisis que se realiza en EnergyPlus del comportamiento de un mismo edificio en diferentes climas, para analizar las diferencias en las estrategias llevadas a cabo y demostrar su comportamiento. Otra vertiente diferente de este trabajo es el objetivo que le da a su investigación, ya que no argumenta en base a las temperaturas obtenidas en su interior, si no que habla del confort térmico en el interior del mismo y realiza la comparación en función del número de horas que ese edificio se encuentra dentro de los límites establecidos por las diversas normas que se encuentran internacionalmente. También, hace hincapié en la importancia que tiene el intervalo de cálculo del programa EnergyPlus en sus resultados, realizando simulaciones cada minuto para todo un año.

En un trabajo realizado por Hong (Hong, Buhl, & Haves, 2008) gracias a los fondos el Departamento de Energía, se adentran más en las ventajas o desventajas de aplicar uno u otro intervalo entre las simulaciones. Con modelos de simulación adaptados para varios tipos de edificios y de usos, estudia la variable del tiempo que dura el cálculo de la demanda de energía en función de ese intervalo, mostrando que el tiempo que tarda la simulación a intervalos de 10 minutos o menos es similar, siendo los resultados con menor variación entre ellos que si los resultados fuesen calculados cada hora. Este método tiene como fin la convergencia de resultados, similar al método del “índice de convergencia del mallado” desarrollado por Roache (Roache, 1997) para estudios de dinámica de fluidos por ordenador, si la variación de los resultados entre un intervalo y sus anteriores es aproximado, se puede utilizar el modelo más rápido y considerar un error aproximado en los estudios. Para el estudio realizado por Hong, entre intervalos de 1 y 10 minutos de cálculo, los errores en cuanto a conceptos como balance energético son similares. En este estudio, también indica que la tardanza del programa en resolver la simulación puede ser debida a la petición por el usuario de conceptos duplicados o fuera del objeto de estudio, lo que puede ahorrar entre un 10 y un 20% del tiempo de cálculo. Por último, en este estudio se habla de la consideración de los trabajos en función del tiempo de cálculo y de diseño: trabajos exploratorios o de diagnóstico son aquellos que sólo se realizan para días concretos y con simulaciones a intervalos de hora, para evaluar el comportamiento del elemento estudiado; sin embargo, la profundidad de un estudio final debe simular el comportamiento a lo largo de todo un año, con intervalos de cálculo de 10 minutos y 21 días de calibración para el programa.

Las cuestiones referentes a la simplificación de datos que afectan a la reducción del tiempo de dibujo y de análisis de la simulación energética con EnergyPlus, Picco et al. (Picco, Lollini, & Marengo, 2014) dentro del número 76 de la revista “Energy and Buildings” en 2014 cuantificaron la desviación respecto de los datos originales para un edificio comercial. Antes de comenzar con la simplificación, indican que la temperatura del terreno fue modificada respecto de la encontrada en el archivo climático para obtener datos más precisos, de acuerdo a la simplificación consolidada y aceptada para el programa de disponer como temperatura del terreno, una temperatura 2°C inferior a la temperatura interior. A partir de ahí, los pasos de simplificación comenzaban por la definición compacta de los muros exteriores, interiores, carpinterías y particiones, dado que generalmente se desconocen las características completas de los materiales que componen los sistemas constructivos y sólo se conoce la transmitancia total del muro; esta simplificación muestra una variación en los resultados de demanda de energía menor al 1% respecto de la definición detallada. Como segundo paso, el hecho de no dibujar las construcciones o elementos externos al edificio, lo que redundaba en el impacto de la radiación solar y la creación de sombras en el objeto en estudio; este segundo paso supuso una variación en la demanda del 3,5%, hasta un total del 4% de variación respecto del original. Como tercer paso, la simplificación de las zonas interiores y la homogeneización de los espacios respecto del uso predominante en cada planta; esta simplificación supone por sí sola una desviación del 5% en la demanda de energía, hasta un total del 9%. A partir de este punto, la simplificación de los huecos sumando sus áreas e insertando uno sólo por orientación, la estandarización de las plantas resultando una sola planta estándar, la regularización de las medidas del edificio o la modelización de una sola planta representativa resultaron en desviaciones totales hasta un 20% respecto de la original. Como conclusión, existen algunas simplificaciones que se pueden realizar en la fase de preparación del modelo definitivo para observar el comportamiento general del edificio, pero conociendo de ante mano el riesgo que esto supone.

Estudios similares publicados en esa revista refrendan que las variaciones en la concepción y diseño del edificio pueden resultar en conclusiones totalmente opuestas respecto del comportamiento térmico. A. S. Silva (A. S. Silva & Ghisi, 2014) publicó en 2014 un artículo en esta misma revista similar al anterior, partiendo de un edificio con forma semicircular y diferentes usos para cada planta. Las simplificaciones realizadas respecto del patrón de ocupación o de la simplificación de la definición de la envolvente resultan en pequeñas variaciones; pero la presunción de la simplificación de las zonas interiores y de la forma del edificio afectan enormemente en los resultados obtenidos respecto de la demanda de energía del edificio original.

Un estudio publicado por Daly et al. (Daly, Cooper, & Ma, 2014) enfoca la incertidumbre respecto de las presunciones que se pueden tomar en función de la normativa a aplicar. Dado que la mayoría de normas establecen una horquilla de confort en cuanto a valores como la temperatura de consigna del edificio, la infiltración del aire, la densidad y el calendario de ocupación o la iluminación requerida. De entre todas esas

presunciones, la elección de una temperatura de consigna en la parte alta de la horquilla o en la parte baja puede llevar a una variación de casi el 100% en la demanda de energía total y variaciones mayores al 10% en función de las cargas internas y la iluminación dispuesta, relacionadas con la aplicación estricta del horario de ocupación del edificio, pero no por la influencia de las personas, sino por la energía que gastan los sistemas que se han de poner en funcionamiento en caso de ocupación.

2.4.2.3. Modelos de edificios simulados con el programa DesignBuilder

Hasta ahora, todos los estudios referenciados han sido llevados a cabo con el motor de cálculo EnergyPlus, a través del complemento de SketchUp llamado OpenStudio. Pero con el mismo motor de cálculo, existe un programa inglés llamado DesignBuilder (D. S. Ltd, 2000) cuyas ventajas son la simplificación y la mejora de la interfaz, haciéndola más intuitiva para el usuario, y análisis complementarios del edificio con los módulos de iluminación o de CFD.

Uno de los primeros estudios publicados con DesignBuilder data del año 2008, cuando Tronchin y Fabbri (Tronchin & Fabbri, 2008) publicaron su estudio sobre la comparación entre los diferentes métodos de cálculo de la demanda de energía, basados en la normativa internacional y la italiana. El primero de los métodos descritos está basado en los valores medios obtenidos por las facturas de gas y luz del edificio a lo largo de los tres años anteriores; el segundo método consiste en el método de simulación horaria descrita por la norma UNE-EN ISO 13790 (Technic Comité AEN/CTN 92, 2011), llevada a cabo mediante la simulación del edificio con el programa DesignBuilder; el tercer método consistía en la simplificación de la demanda de energía por un procedimiento realizado en el Politécnico de Milán y denominado “Bestclass”. Los resultados mostraron unas variaciones del 8,9% del consumo real medio del edificio respecto del modelo simulado por DesignBuilder, siendo de solamente el 0,7% para la época invernal.

En similares fechas, Chowdhury et al. (Chowdhury, Rasul, & Khan, 2008) llevaron a cabo un estudio sobre un edificio de varias plantas de la Universidad de Queensland, en Australia. En primer lugar modelizaron el edificio en estudio con el programa de simulación detallada, para lo cual ante el desconocimiento de muchas de las características del edificio extrajeron los datos sobre materiales y sobre las tasas de infiltración de aire o iluminación de la normativa aplicable en ese país y sus bases de datos correspondientes. En la fase de simulación analizaron los resultados que mostraba el programa para cuatro supuestos: la construcción actual del edificio, techo refrigerante, sistema de intercambio de aire exterior-interior y la pre refrigeración del edificio durante cuatro horas antes de su apertura; los resultados fueron analizados en clave de temperatura, humedad y sensación térmica, de donde sacaron las conclusiones de que el techo refrigerante mostraba los mejores resultados para el edificio en un día típico de verano. Además de esto, los resultados teóricos fueron comparados con los datos experimentales que tomaron en el edificio respecto de temperatura y humedad, donde la conclusión fue que los resultados simulados se encontraban dentro del 5% de

error respecto de los datos experimentales, lo que mostraba la buena precisión de la previsión realizada por el programa DesignBuilder.

En la misma universidad de Queensland, Rahman et al. (Rahman, Rasul, & Khan, 2010) continuaron con el uso de este programa para analizar el comportamiento de sus edificios. La recolección de datos experimentales (cada 15 minutos) sobre el consumo eléctrico y energético de sus principales recintos, además de la temperatura y humedad ambientes les sirvió como datos de validación para el modelo simulado realizado con el programa DesignBuilder. Su método de validación incluye la referencia a trabajos y estudios que cuantifican los límites de confianza para considerar satisfactoriamente los resultados simulados, cuestión que nombraremos en el siguiente apartado. En este caso, indicar que para los días típicos de diseño para las estaciones de invierno y verano, la temperatura mostraba una variación del 7% en ambos casos, la humedad relativa entre el 9 y el 11%, mismos resultados para la comparación de la energía usada esos días y para la demanda de energía mensual mostrada en los recintos en estudio. Con la ayuda del programa, y dado que permite realizar el análisis en base al confort térmico, analizaron el impacto que tendrían la actuación sobre los sistemas de calefacción y refrigeración, de forma similar a lo realizado en la investigación anterior.

El grado de confianza mostrado por el programa para la inserción de modelos reales y sus posteriores comparaciones con los cambios consecuencia del uso de otras estrategias pasivas o activas, ha sido de una aplicación profusa en los posteriores estudios realizados con DesignBuilder; en el trabajo realizado por Feng y Hewage (Feng & Hewage, 2014) sobre un edificio de la Universidad de la Columbia Británica (Canadá) se centraron en la influencia que tendría en los resultados la aplicación de una cobertura vegetal para su edificio. Dicho edificio, con diferentes galardones y una calificación LEED Gold, que lo caracterizan con una alta eficiencia energética sirvió de modelo para la inserción de diferentes grados de cobertura vegetal y observar las variaciones en el comportamiento térmico del edificio. La hipótesis inicial era el edificio en su concepción actual, con una cubierta plana y muros con sistemas tradicionales, y los cambios surgían de la inserción de cobertura vegetal en la cubierta plana y en toda la extensión del muro del edificio. Los resultados mostraron un ahorro del 3,2% y del 7,3% para la cubierta vegetal y para la cobertura integral del edificio en la demanda de energía de refrigeración del edificio. El ahorro en la demanda de calor a través de su envolvente es del 68% para la cubrición de la cubierta y del 96,5% para la cubrición integral del edificio en una semana típica de verano; siendo estos valores mucho menores para la época invernal, un total del 20% de energía puede ser ahorrada si se cubriese el edificio de vegetación en invierno. Como dato paralelo, se muestra un amortiguamiento en la ganancia de entre 1 y 3 horas y que reduce el periodo de ganancia de energía a través de la envolvente en 5-6 horas. En este caso, y como análisis final, concluyeron que la implantación de la vegetación en un edificio de estas características no es viable económicamente, ya que en edificios con alta calificación energética según el procedimiento LEED, sólo un 5% de energía demandada se gana a

través de la envolvente en verano y un 12% de la energía se pierde a través de la misma en invierno.

Para construcciones convencionales, sí que puede ser una buena herramienta para determinar el ahorro que puede suponer la inclusión de determinadas estrategias o sistemas constructivos y observar su comportamiento. En este sentido, una investigación realizada por Liang et al. (Liang, Wang, & Roskilly, 2015) en Inglaterra se centró en el análisis sobre una típica vivienda unifamiliar de esa región. Con el consumo medio de energía para esa tipología de edificios, expuesto públicamente por los estudios oficiales del gobierno, y la determinación del consumo real del edificio con el estudio de las facturas de gas y electricidad reales tuvieron un elemento sobre el que estudiar el comportamiento del modelo simulado del edificio en las condiciones reales y en las condiciones resultado de las modificaciones de reforma propuestas. Los resultados de la simulación con DesignBuilder mostraron un consumo de 9,66MWh y los resultados reales de 9,76MWh, lo que supone una variación del 1%, de ahí que la validación del modelo simulado fuese clara. Las posteriores modificaciones mostraron que la configuración actual de los muros, con doble hoja de ladrillo y aislamiento de espuma de poliuretano de 5 cm. supone un ahorro de más del 30% de energía que si el espacio del poliuretano fuese ocupado por una cámara de aire y de más de un 40% si la casa tuviese una sola hoja de ladrillo (con espesor total igual a la suma de las capas actuales). Además, en este estudio sí que encontraron una adecuada tasa de retorno de la inversión realizada; en 2 ó 3 años, el dinero que supone esta rehabilitación es recuperado y a partir de ese momento sólo supone ahorro real de dinero.

Para estudiar la influencia que tiene el comportamiento humano en los edificios, Martinaitis et al. (Martinaitis, Zavadskas, Motuzienė, & Vilitienė, 2015) desarrollaron un modelo simulado con DesignBuilder sobre un apartamento de 2 dormitorios. En el caso de esta vivienda propusieron diferentes modelos de ocupación para un número de ocupantes de 2 y de 4 personas y los compararon con los modelos de ocupación y uso definidos en el programa como predeterminados. Para esta vivienda, los resultados indicaron que las simulaciones realizadas con ocupaciones de 4 personas en 2 dormitorios no excedían una desviación del 5% respecto de los valores empleados por defecto en el programa, mientras que si la ocupación era de una persona por dormitorio, la variación ascendía, según los casos, entre el 14 y el 21%; esta variación se expresaba sobre todo en el consumo de agua caliente sanitaria que se hacía en el edificio para sus ocupantes, independientemente de su horario de ocupación. Además, concluyeron que si la variable del agua caliente consumida no era incluida en la simulación, la variación en cualquier caso no excedía del 10%, por lo que los perfiles de ocupación por defecto se podían usar si se considera no incluir esta variable como objeto de estudio. Por último, y para probar su aplicación en diferentes regiones, incluyeron los archivos climáticos de diferentes regiones del norte y del este de Europa, donde llegaron a la conclusión de que el programa mostraba resultados similares para cualquiera de las ubicaciones elegidas.

Haciendo uso del módulo de dinámica de fluidos por ordenador (DFC) utilizado por el programa, de la Torre y Yousif (De La Torre & Yousif, 2014), utilizaron el programa

para explicar el funcionamiento de la torre de ventilación natural presente en su edificio de oficinas en estudio. El edificio, con varias plantas y forma en L dispone de un vestíbulo conectado con una torre de ventilación a lo largo de todas las plantas en donde se sitúan múltiples ventanas en diferentes orientaciones para la ventilación natural del edificio. La inclusión de planos verticales por el medio de la torre de ventilación permitió observar la reacción de que el aire sube a lo largo de la torre por flotación y diferencia de densidad, de forma libre y expulsando el aire caliente fuera del edificio. La razón por la ubicación de esta torre es que bajo el edificio de oficinas se encuentran las instalaciones de fabricación de cerveza a la que se dedica la empresa; la consecuencia es que se produce un flujo ascendente de calor a través del edificio, calor que se queda almacenado en el edificio aunque la temperatura alcanzada en la parte de la torre de ventilación sea menor. A la vista de los resultados gráficos obtenidos en este edificio, las conclusiones indican que se han de abrir todas las ventanas del edificio durante el verano para conseguir aumentar el flujo de ventilación de aire conducido de forma natural, ya que se alcanzan temperaturas mayores si no se abren todas. En el caso de la época invernal, recomiendan abrir únicamente las ventanas situadas en la cubierta de la torre, para obtener una mínima ventilación y calidad del aire interior y, al mismo tiempo, conseguir una cálida temperatura de 25°C en el interior del edificio.

Las opciones que integra el programa también permiten conocer las características interiores del edificio a través de la iteración de diferentes configuraciones posibles para la transmitancia térmica y la infiltración de aire. El estudio publicado recientemente (2017) por Li y Rezgui (Li & Rezgui, 2017) muestra un total de 47 configuraciones posibles en cuanto a la tasa de infiltración de aire y las características térmicas de un edificio en estudio; de forma paralela en ese edificio se han llevado a cabo mediciones reales sobre el consumo de energía en diferentes zonas de un edificio dedicado a museo, archivo y ayuntamiento de Blaneau Gwent (Inglaterra). Dado que se trata de un edificio de más de un siglo de antigüedad y con diferentes reformas y horarios de apertura para cada zona, resultaba muy difícil encontrar una configuración real del comportamiento del edificio, siendo lo único incuestionable que los requerimientos de energía eran mayores que los esperados. Las variables insertadas en cada caso, mostraban la transmitancia esperada en cada elemento constructivo de la envolvente teniendo en cuenta el grado de deterioro que puede haber sufrido a lo largo del tiempo, así como diferentes tasas de infiltración de aire. Su procedimiento de validación se basa en la guía de la normativa ASHRAE para la medición de energía y ahorro en la demanda (ANSI/ASHRAE, 2002), que en su punto 14 habla de los errores admisibles en la modelización de un edificio respecto de la mediciones experimentales para considerar válida la simulación desarrollada. Con las características que mejor se ajustaban al consumo real del edificio, comprobaron en detalle el consumo del edificio en un día típico de trabajo, cuyo resultado fue que los datos experimentales tomados cada media hora se correspondían con el resultado propuesto por la simulación. Como ventaja destacan que el proceso simplifica la toma de datos del edificio y que puede ser aplicado a cualquier tipo de edificación.

2.4.3. Validación de los resultados obtenidos por las simulaciones

Como se ha visto en los últimos artículos, para aceptar la solución propuesta por el modelo simulado es necesario realizar un procedimiento de validación de los datos en base a errores y desviaciones máximas admisibles respecto de los datos experimentales.

Englobando diversas normas como la descrita previamente en la guía ASHRAE, en su punto 14, el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América ha creado el documento guía para la medición y verificación de los procedimientos empleados, en su versión 4.0 de Noviembre de 2015 (U.S. Department of Energy (DOE), 2015). La opción D para la verificación de la medición habla del uso de herramientas informáticas para la simulación del edificio, en ella se habla de la monitorización completa durante un mínimo de 12 meses y de su posterior comparación con los resultados obtenidos en la simulación. También indica que el procedimiento requiere de un elevado conocimiento del edificio en el proceso de ingeniería, lo que conlleva la recolección de datos del edificio, que típicamente incluyen: las facturas de gas y luz del edificio durante al menos 12 meses, tomas de medición completa y detallada de determinadas condiciones del edificio, el proyecto arquitectónico y de instalaciones del edificio, datos completos sobre los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado del edificio, esquema de electricidad y de la potencia de las lámparas instaladas, el calendario de la ocupación del edificio y el número de personas. Además de estos datos, se recomiendan la recogida de encuestas a los usuarios del edificio que complementen el resto de datos que puedan ser necesarios, el archivo climático real de la ubicación del edificio y los requerimientos que la normativa haga respecto de la configuración del edificio. En este último caso con los datos mínimos que la normativa exija en cada caso. En cuanto a la creación del archivo climático real para la simulación del edificio estudiado en esta tesis, se han obtenido datos reales en rango horario de las estaciones meteorológicas más cercanas, la de la Ciudad Universitaria de Madrid, de la red de AEMET (AEMET, 2016) y el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid (IES UPM). Sus datos climáticos se han compilado en un archivo compatible con la herramienta EnergyPlus, para ello se ha empleado la herramienta informática Elements, desarrollada por la empresa Big Ladder Software (Big Ladder Software, 2014)

Una vez completado este proceso, el edificio puede ser simulado en una propuesta base de comportamiento energético que ha de ser modificado en un proceso iterativo hasta conseguir unas desviaciones mínimas en cuanto al ajuste respecto de la realidad térmica del edificio.

Los requerimientos mínimos para la validación del modelo necesitan de un aporte de datos en función del nivel de detalle de datos que se hayan conseguido del edificio, la Tabla 3 muestra las tolerancias admitidas para admitir el modelo como válido. Con el cálculo del Error Medio del Sesgo (NMBE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de variación de la Raíz cuadrada del Error Medio Cuadrático (CVRMSE, por sus siglas en

inglés) se establecen los límites para considerar válido del modelo simulado respecto de la realidad, en base a porcentajes máximos para estos conceptos estadísticos.

Tipo de calibración	Índice	Valor aceptable
Mensual	NMBE mensual	±5%
	CVRMSE mensual	15%
Horario	NMBE mensual	±10%
	CVRMSE mensual	30%

Tabla 3. Tolerancia de aceptación de la calibración

El Error Medio del Sesgo (44) se define mediante la suma de las diferencias entre los datos experimentales (x_i) y los resultados simulados ($\hat{x}_i$), normalizados por la media mensual de los datos recogidos ($\bar{x}$).

$$NMBE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|}{(n - p) * \bar{x}} * 100 \quad (44)$$

El Coeficiente de Variación de la Raíz cuadrada del Error Medio Cuadrático es otro concepto estadístico en base a los mismos datos y resultados para establecer un límite aceptable en la validación del modelo calibrado del edificio simulado (45).

$$CVRMSE = 100 * \left[\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2 / (n - p) \right]^{1/2} / \bar{x} \quad (45)$$

Para ambos cálculo se establece en valor de $p = 1$ respecto del número total de datos recogidos (n), en base a la corrección de Bessel.

2.4.4. Diferencias entre los datos experimentales y los resultados simulados

Aun así, existen otras razones por las que se pueden encontrar diferencias entre las estimaciones previas en fase de diseño y los datos reales de consumo del edificio en uso. Los hábitos de los usuarios (Ridley et al., 2013) y la dificultad de ejecutar la construcción de acuerdo al diseño establecido (Olivia Guerra-Santin et al., 2013) son algunas de las causas expuestas. La influencia de los usuarios es una variable muy difícil de considerar en el análisis de un edificio en uso, causas tan particulares como la orientación de los recintos (Zhang & Barrett, 2012a) o razones de privacidad (Zhang & Barrett, 2012b) han sido mostradas como probadas, hasta la edad del usuario (Olivia Guerra-Santin & Itard, 2010) se ha estudiado como causa de estas diferencias. De todos estos estudios brevemente referenciados, la conclusión es que los usuarios normalmente empeoran el consumo de energía del edificio (Schakib-Ekbatan, Çakici, Schweiker, & Wagner, 2015); salvo excepciones encontradas en una investigación realizada por Berry et al. (Berry, Whaley, Davidson, & Saman, 2014), la automatización de los controles (Thomas & Duffy, 2013) conlleva mejores resultados que la actuación manual por los usuarios. Por todo esto, existen variables que determinan las diferencias con los resultados esperados y que no pueden ser achacados a una simple mala ejecución del modelo simulado.

3. METODOLOGÍA

3.1. UBICACIÓN DEL EDIFICIO ESCOGIDO PARA LA INVESTIGACIÓN

Gracias al convenio firmado entre el Ayto. de Pozuelo de Alarcón y la Universidad Politécnica de Madrid, se ha podido realizar un estudio acerca del comportamiento térmico del edificio que se ha analizado en esta investigación.

A pocos kilómetros al oeste de la ciudad de Madrid, y rodeado casi por completo por el Parque Forestal de Adolfo Suárez, se encuentra el Aula de Educación Ambiental de Pozuelo de Alarcón (Figura 31). El complejo se compone de diversas construcciones en las que se realizan actividades de aprendizaje para diferentes edades de alumnos, empresas y profesionales.

Figura 31. Ubicación del Aula de Educación Ambiental de Pozuelo de Alarcón. Fuente: Google maps

De entre las construcciones, además de invernaderos, almacenes y un pequeño planetario, destaca el edificio denominado Centro de Recursos de Educación Ambiental para la Sostenibilidad (CREAS). Un edificio concebido como ejemplo de que la arquitectura del mañana será sostenible y ecoeficiente, se integrará en su entorno y contribuirá a preservarlo. Edificio concebido por el arquitecto Antonio Baño, en el que se juntan la mayoría de las estrategias pasivas estudiadas por todo el mundo para mejorar la respuesta de los edificios ante las condiciones climáticas que nos rodean: cubierta vegetal, espacios invernadero, soluciones constructivas que utilizan materiales con una huella ecológica muy baja, y una eficiencia energética fuera de toda duda que permiten que sus necesidades energéticas sean resueltas puntualmente por una caldera de biomasa, y auto suficiente en cuanto a las necesidades eléctricas por la producción de energía mediante paneles fotovoltaicos y una fuente de energía eólica.

Construido en el año 2010 bajo los requerimientos de la normativa vigente en la actualidad, le ha sido otorgada la máxima calificación energética (A) por el

procedimiento vigente para la certificación energética de edificios en España. Además, como parte de la colaboración desarrollada entre el Ayto. de Pozuelo de Alarcón y la Universidad Politécnica de Madrid, fue inscrito a los Green Building Solutions Awards 2015 (Ayto. Pozuelo de Alarcón, 2015), en los que fue galardonado en la fase nacional con el premio del público y por el uso de materiales de origen biológico; también, en su fase internacional, cuyos premios se otorgaron dentro de la Conferencia Internacional de la ONU sobre el cambio climático (COP 21, París) fue galardonado con el premio del público. Un edificio concebido como espacio para la investigación en el que, a fecha de hoy, se han desarrollado 5 Trabajos Fin de Máster y la presente Tesis Doctoral como muestra de la colaboración activa que se ha llevado a cabo entre la Escuela Técnica Superior de Edificación de Madrid (UPM) y el Ayto. de Pozuelo de Alarcón.

3.1.1. Descripción del edificio CREAS

El edificio CREAS (Figura 32) se define por una construcción que queda condicionada por la orografía circundante; edificio lineal de una planta, semienterrado en su cara norte y orientado completamente hacia el sur, compuesto por varios módulos dedicados a diferentes fines interconectados por un pasillo común entre ellos.

Figura 32. Alzado frontal del edificio CREAS. Fuente: Elaboración propia

De izquierda a derecha, según la figura anterior, el primer módulo se utiliza como aula y taller donde se realizan las actividades escolares y profesionales del complejo. La entrada se produce por el segundo módulo en el que se encuentra una biblioteca y un espacio administrativo. En el tercer módulo encontramos la zona de servicios y vestuarios del edificio junto con otro espacio administrativo y el cuarto técnico, con la ubicación en éste de la caldera de biomasa que surte de calefacción por suelo radiante al centro. El cuarto módulo, separado y sin calefacción, se dedica a almacén y sala de reuniones en la que podemos observar una gran cantidad de plantas que le confieren un carácter de bosque interior. Como se puede ver en la imagen anterior, todos los módulos

se encuentran orientados hacia el sur, en donde se disponen espacios invernaderos anexos a los recintos descritos previamente. Junto con estos espacios, todas las estrategias pasivas enumeradas en la introducción se han ejecutado en el edificio.

Como se aprecia en la Figura 33, se combina la ubicación de un espacio invernadero con cristal simple reforzado, que permite la máxima absorción solar, con un Muro Trombe (a la derecha) de casi 10 metros de longitud, que transforma la transferencia de calor por radiación de la onda visible, en energía conducida hacia los recintos interiores, permitiendo también la convección y el intercambio de aire con el interior a través de huecos a distintas alturas.

Figura 33. A la izqda., vista del espacio invernadero y del Muro Trombe. A la dcha., cara interior del Muro Trombe y sus aberturas (cerradas por una puerta de madera en la foto). Fuente: Elaboración propia

Tanto la pared del Muro Trombe como el suelo han sido ejecutados con bloques de tierra, compactada o cocida, respectivamente; en el caso del suelo (Figura 34) se escogió esta solución para aumentar el poder de almacenamiento de energía que ofrece el suelo debido a su inercia térmica. De la misma forma que ocurre con el Muro Trombe, la radiación de onda visible pasa a través de los cristales y se almacena en forma de energía térmica en el cuerpo sólido del suelo y se transmite por convección al aire interior.

Figura 34. Vista del aula del edificio. Debido a la construcción de un alero en el frente exterior, el sol alcanza el suelo de forma directa sólo en invierno. Fuente: Elaboración propia

La convección natural del aire se produce en el edificio por la ubicación de aperturas en el techo; al mismo tiempo que esas ventanas aportan luz en la estación invernal, permiten su apertura en verano de forma que el aire caliente asciende por diferencia de densidad y se evacúa hacia el exterior (Figura 35).

Figura 35. Aperturas en el techo, en diferentes zonas del pasillo. Fuente: Elaboración propia

La cara norte del edificio se encuentra semi enterrada y la envolvente se ha ejecutado con un muro de tapial calicastro que disminuye su grosor con la altura (Figura 36). La tierra compactada ha sido protegida por la cara exterior del muro para no permitir la entrada de humedad que disgregue el muro. Gracias a esta técnica, el edificio se

encuentra protegido de las bajas temperaturas exteriores en invierno, ya que el terreno se encuentra a una temperatura muy cercana a la del interior del edificio, por lo que la razón de la transferencia de calor es más baja. El mismo efecto ocurre en verano, sólo que entonces la tierra permanece a una temperatura más baja que el exterior, reduciendo también la razón de la transferencia de calor a través de esa zona de la envolvente.

Figura 36. Vista del muro de tapial calicastro, con tongadas de 15-20 cm. Fuente: Elaboración propia

Las técnicas para la prevención del sobrecalentamiento en el edificio previenen de una entrada excesiva de radiación solar hacia el interior, por lo que se concentran en el uso de cortinas y aleros debidamente estudiados para permitir la entrada de sol en invierno y protegerlo en verano. En la Figura 37 se observa la imagen tomada a medio día en julio, donde se aprecia que el alero realiza su función a la perfección y la radiación solar no penetra de forma directa en el interior del edificio. Al contrario ocurre en invierno, cuando se cierran las cortinas por razones de deslumbramiento o de excesiva temperatura interior, no permitiendo la entrada de la radiación solar directa. Como se aprecia en la imagen de la derecha, dentro de este estudio se realizaron pruebas para la inclusión de aislamiento en las cortinas y observar su influencia, lo que se detallará en la parte experimental de esta investigación.

Figura 37. A la izqda., incidencia de la radiación solar en verano al exterior del aula. A la dcha., radiación solar directa impactando en las cortinas del aula. Fuente: Elaboración propia

Casi toda la cubierta de la envolvente se encuentra acabada superficialmente por una cobertura de tierra con diferentes tipos de plantas, todas ellos usando especies autóctonas que se pueden encontrar en las inmediaciones del edificio. Aprovechando labores de mantenimiento llevadas a cabo en el edificio, se realizaron algunos de los citados Trabajos Fin de Máster, enfocados explícitamente a explorar las diferencias entre las diferentes coberturas aplicadas en él. En las fechas en las que se tomaron datos experimentales para esta investigación, las cubiertas se encontraban en el estado mostrado en la Figura 38.

Figura 38. Cubierta vegetal del edificio, con especies autóctonas. Fuente: Elaboración propia

Además de estas estrategias, puramente pasivas, en el edificio se diseñaron otros sistemas que no han sido contemplados en esta investigación. Ya que el uso del edificio se desarrolla en época y horario escolar, la estrategia de ventilación nocturna para la que está preparado el edificio no se realiza, al no encontrarse usuarios a esas horas. Centrándose la apertura de las ventanas citadas anteriormente a primera hora y durante la ocupación del edificio. Además de ésta, otros sistemas activos también se encuentran instalados, pero no se les da uso habitualmente; bajo el edificio se encuentran unos

conductos que distribuyen el aire desde un invernadero, o desde el exterior, al interior del edificio (Figura 39), de forma similar a los pozos provenzales o conductos geotérmicos. En invierno, el aire calentado por la radiación solar en los invernaderos se puede introducir en los recintos a través de conductos con la acción de un ventilador mecánico. Similar estrategia en verano, en este caso la toma de aire se encuentra en el talud de tierra de la cara norte semienterrada e introduce el aire hacia los recintos interiores.

Figura 39. A la izqda., tomas de aire para la ventilación en verano. A la dcha., tomas de aire en el invernadero.
Fuente: Elaboración propia

Para finalizar, una tecnología que se utiliza como forma auxiliar de calentar el agua que se almacena en el depósito. Adosados a la cara exterior del cristal del espacio invernadero se encuentra un colector de tubos de vacío (Figura 40), estos tubos se componen de una cobertura exterior de cristal pintado de negro, lo que aumenta la absorptividad de la radiación solar directa; dentro del tubo discurren unos conductos que forman un circuito, de forma que en el colector del lateral se produce el intercambio de calor entre este circuito y el que intercambia calor con el agua del depósito auxiliar del edificio.

Figura 40. Tubos de vacío solar en el exterior del edificio. Fuente: Elaboración propia

3.1.1.1. *Sistemas constructivos y los materiales empleados*

En primer lugar, se va a realizar una breve descripción de los sistemas empleados en su construcción. Una descripción detallada del edificio, en cuanto a dimensiones y memoria constructiva de los materiales empleados en el edificio se recoge en el Anexo A

Aparentemente, cuenta con sólo una altura, pero ha sido ejecutada en dos alturas siendo la más baja enterrada y con el fin de dar servicio al paso de conductos de evacuación y ventilación, lo que comúnmente se denomina forjado sanitario. El nivel del forjado sanitario (Figura 41) se compone de zapatas superficiales corridas bajo muros de carga, con una solera de hormigón entre las zapatas; sobre estos muros de carga, de un metro de altura se apoya tanto la estructura de la cubierta como la estructura del suelo del edificio, realizado en placas de hormigón aligeradas apoyadas sobre los muros de carga; en estos muros también se anclan los pilares de madera que sostienen la estructura de madera que se proyectó para la cubierta.

Figura 41. Proceso constructivo del forjado sanitario del edificio. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, sobre estos muros también se apoyaron tanto los muros de carga de la cubierta como los pilares de madera, que sirven de apoyo intermedio a la estructura de madera de la cubierta; mediante encofrado se ejecutó el muro de tapial calicastro de la cara norte disminuyendo su espesor conforme a su altura y cargas. Todos estos elementos (Figura 42) forman la estructura visible del edificio.

Figura 42. Estructura del edificio realizada con muros de ladrillo, pilares de madera y muro de tapial calicastro. Fuente: Elaboración propia

Una vez ejecutada la estructura de la cubierta, la cubierta se compone de un entablado con aislamiento de corcho bajo un cajeadado de plástico por donde se evacúa el agua

sobranante de la irrigación de la cubierta, y separado con una lámina antirraíces del acabado superficial de tierra y vegetación. Los tabique interiores (Figura 43) se ejecutan con paneles sándwich de madera y ladrillo guarnecido o enfoscado, aunque también con bloques de tierra compactada (BTC) y vista en aquellos con alguna finalidad para la mejora de la inercia térmica del edificio (Muro Trombe, invernaderos).

Figura 43. Tabiques interiores del edificio en ladrillo, BTC y paneles de madera. Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2. Premisas generales en el diseño y el proceso edificatorio del edificio

Este edificio fue concebido, en propias palabras del arquitecto, como un ejemplo edificatorio en el que todos los materiales usados se han escogido vigilando la minimización de la huella ecológica, empleando la propia tierra excavada en la fabricación del muro de tierra y de algunos tipos de ladrillos; utilizando madera con certificado FSC que indica que ha sido extraído de bosques sostenibles; y mejorando el confort del usuario mediante el uso de elementos saludables y de origen orgánico, como es el caso de las pinturas ecológicas. En definitiva, y como uso último, la creación de un edificio que en el fin de sus días pueda ser extraído y volver al estado original del terreno con el mínimo impacto ecológico. Tal y como se ha demostrado con este edificio, la construcción bajo este tipo de premisas no redundaría en un coste excesivo, ajustándose a la media del coste por metro cuadrado que se puede encontrar en el parque inmobiliario actual.

3.2.DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO EMPLEADO EN LA INVESTIGACIÓN

De forma general, las premisas de diseño en la mayoría de edificios construidos dependen de cuestiones simples como la forma de la parcela donde va a ser ubicado, el presupuesto con el que se cuenta y el uso al que se va a destinar. En edificios o celdas donde se pretende investigar algún parámetro o sistema constructivo, el punto de vista del diseño se centra en la obtención de resultados óptimos.

Sin embargo, nuestro caso de estudio ha sido diseñado y construido para servir de ejemplo y como campo de investigación, por lo que se aglutinan diversos elementos para que puedan ser utilizados, observados y experimentados al mismo tiempo. La descripción del edificio CREAS, como resultado de las investigaciones realizadas, concluye en que es pequeño en su tamaño, pero complejo en cuanto a su estudio. La incorporación de tantos materiales, sistemas constructivos y estrategias resultan en un comportamiento térmico adecuado para el usuario, pero también hace difícil el cuantificar y explicar la importancia de cada uno de ellos. Es por ello que la presente tesis considera la realización de una investigación completa del edificio, desde el detalle constructivo hasta el edificio en su conjunto.

3.2.1. Propuesta experimental: Del diseño completo del edificio a la influencia de cada sistema constructivo

La realización de este trabajo se ha dividido en varias fases.

- El análisis en laboratorio de los instrumentos de medición empleados. El estudio y la calibración de los aparatos empleados ayudó a observar las ventajas e inconvenientes que tiene el uso de estos aparatos en un edificio en uso.
- La adaptación de los instrumentos de medición empleados al edificio en el que se realizó la investigación. Debido a que la normativa existente y los trabajos actuales no son unánimes en las consideraciones a tener en cuenta a la hora de monitorizar un edificio, un trabajo previo de obtención de resultados parciales en el centro ayudó a cuantificar y minimizar los posibles errores que se pueden cometer en la monitorización del edificio.
- Una vez establecido el procedimiento de monitorización, se comenzaron a realizar campañas de monitorización puntuales para determinados elementos constructivos del edificio. Mediciones detalladas y centradas en las épocas del año en las que la demanda de energía es mayor, el verano y el invierno. El conocimiento del comportamiento alrededor de cada sistema constructivo permitió ver diferencias puntuales en acciones rutinarias que los usuarios realizaban en el edificio en estudio. Saber hasta qué punto la influencia del ser humano puede determinar el comportamiento final del edificio resultó fundamental a la hora de analizar de forma global el comportamiento térmico del edificio a lo largo del año.

- Habiendo focalizado el análisis global del comportamiento del edificio en determinadas variables, se pudo determinar de forma experimental cuál es el comportamiento del edificio en todas las épocas del año. Como se observará en los resultados, recintos adyacentes sufren unas alteraciones térmicas elevadísimas entre ellos, y muchas veces estas vienen determinadas por pequeños detalles de diseño o de utilización.
- El análisis mediante herramientas informáticas mostró los patrones esenciales a tener en cuenta en la fase de simulación del edificio. El ajuste realizado sobre la herramienta informática descubrió las fortalezas y debilidades de los modelos simulados empleados. Según los procedimientos establecidos para el cálculo de la demanda energética, los resultados varían en mayor o menor medida respecto de la realidad y, aunque algunos no son considerados cruciales en los resultados experimentales, el modelo descubrió la influencia de ellos en el comportamiento térmico final del edificio.
- Por último, conocer y cuantificar qué hubiera ocurrido en el edificio si se hubiera diseñado de diferente manera, permitió observar la influencia de los sistemas constructivos y estrategias empleadas en el diseño y en la concepción de este edificio. De todas ellas, algunas no son viables en cuanto a la propuesta de la adopción de estas soluciones en el parque inmobiliario actual, pero otras surgen como respuesta clara a la mayoría de problemas presentes en los edificios que se han construido durante el siglo anterior. De hecho, algunas de ellas mejoran las soluciones adoptadas según la normativa vigente y solventan los problemas que conllevan, por lo que su implantación en fase de rehabilitación del edificio deben ser tomadas en cuenta de forma generalizada.

3.2.2. Procesos experimentales de ensayos y evaluación de los equipos empleados

El primer paso en la investigación fue el análisis del comportamiento, tiempo de respuesta y errores de los instrumentos a utilizar.

Tal y como se ha expuesto por la normativa UNE-EN ISO 7726(Comité Técnico AEN/CTN 81, 2004) en el capítulo anterior, existen ciertos límites y recomendaciones en cuanto a los errores que pueden hacer considerar no válidos los valores experimentales obtenidos. La cuantificación de los errores determina el tratamiento de datos que se debe realizar de forma previa al experimento que se quiera llevar a cabo. Dicha normativa indica que los instrumentos empleados deben cumplir con una exactitud determinada para un intervalo de medidas preestablecido, y ser capaces de dar un tiempo de respuesta lo más corto posible. En base a estas cuestiones, se han analizado los valores obtenidos para cada uno de los instrumentos de medición de los que se disponían, y se ha escogido el mejor método de monitorización de las variables para cada caso. Los instrumentos de medición que se han utilizado a lo largo de la realización de este trabajo se exponen en la Tabla 4, y en la Tabla 5 se indica la fase en la que se han usado cada uno de los tipos de instrumentos.

Equipos de recogida de datos	OPUS 20
	OPUS 200
	OPUS 208
	Arduino Uno R3
Instrumentos de medición	Termopar k
	Anemómetro de hilo caliente TSI 8455
	Termohigrómetro OPUS 20 + CO ₂
	Termohigrómetro DHT22
	Piranómetro CMP3
	Termohigrómetro exterior Dwyer RHRS

Tabla 4. Relación de equipamiento e instrumentación utilizada durante la monitorización

Fase de normalización y estudio de los equipos	Se emplearon todos los instrumentos de medición arriba indicados
Adaptación al edificio en estudio	Termopar k
	Piranómetro CMP3
	Termohigrómetro exterior Dwyer RHRS
Monitorización en detalle de los elementos constructivos	Termopar k
	Anemómetro de hilo caliente TSI 8455
	Termohigrómetro DHT22
Monitorización completa del edificio, durante un año	Termopar k

Tabla 5. Instrumentos de medición empleados en cada fase de trabajo

A continuación, se van a exponer las características, con sus ventajas e inconvenientes, encontradas durante la primera fase de normalización y estudio, de los equipos empleados.

- OPUS 200 y OPUS 208. Equipos de recogida de datos de la marca Lufft, con 2 y 8 entradas de sensores, respectivamente. Funcionan con una fuente de alimentación externa de 12v, conectados a la corriente. Permiten el almacenamiento de datos de cualquier tipo en función del sensor, ya que disponen de 8 pines por cada señal y el sensor puede requerir la conexión en dos o tres puntos y la colocación de una fuente de alimentación externa que dé servicio al sensor. Con una memoria limitada en función del intervalo de toma y recogida de datos seleccionado (entre 0,1 seg y 30 min) y una conexión RS-232 a un ordenador con software específico de la casa comercial. A estos equipos se han conectado en el trabajo los instrumentos termopar k, anemómetro de hilo caliente, piranómetro y estación meteorológica.
- OPUS 20. Equipo de recogida de datos de la marca Lufft. Incorpora el sensor en su interior, salvo en un modelo concreto no usado en este trabajo. Permite el almacenamiento de datos (entre 10 seg y 30 min) y su posterior conexión a un software específico mediante protocolo Ethernet o USB. Los empleados en este estudio recogen datos de temperatura, humedad y CO₂.

- Arduino Uno R3: Placa base con software de código abierto y programación específica cargada desde un ordenador. En este caso, sólo se ha usado conectado a un termohigrómetro, pero admite la programación de la mayoría de sensores digitales y analógicos. Requiere de un módulo complementario para el almacenamiento de datos, o de una conexión permanente con ordenador mediante USB, para su exportación en software de libre distribución y guardado de los datos en tiempo real.
- Termopar k: Instrumentación de bajo coste y con amplio rango de medición de temperatura. Formado por dos cables de Ni-Al soldados en su extremo libre, no encapsulados y con extensión de hasta 50 metros. Si bien son los instrumentos con menor precisión de todos los empleados, su exactitud, rango operativo y facilidad de colocación les confiere ventajas en su uso respecto al resto de los empleados. Las características se muestran en la Tabla 6, siendo la precisión y exactitud contrastadas en ensayos en laboratorio para todos los sensores empleados.

Rango de temperatura	-200°C - +1260°C
Precisión	±1,0°C
Resolución	0,1°C
Exactitud	±0,2°C

Tabla 6. Características del termopar k

- Anemómetro de hilo caliente TSI 8455: Instrumento para la medición de velocidad del viento en una dirección. Sensor con un alambre calentado eléctricamente en su extremo que mide el intercambio de calor desde el alambre a la corriente de gas por convección, obteniendo la medición del flujo de gas que pasa. Este equipo fue utilizado en la campaña puntual para el estudio de los invernaderos y del Muro Trombe del edificio. Ver en Tabla 7 sus características.

Rango de velocidad de viento	0 m/s -50 m/s
Precisión	±2%
Resolución	0,01 m/s
Exactitud	±1%

Tabla 7. Características del anemómetro de hilo caliente

- Termohigrómetro OPUS 20: En un solo equipo se pueden recoger los datos acerca de la temperatura, humedad y partículas de CO₂ (ppm). Su gran ventaja es la portabilidad que aporta, al poder ser puesto en funcionamiento mediante pilas AA. Su gran inconveniente, y por el que se descartó su uso en las campañas de monitorización ininterrumpidas, es el rango operativo de temperatura que tiene, ya que la temperatura en algunos de los recintos medidos han sobrepasado este rango de operatividad.

Rango de temperatura	-20 °C - +50°C
Precisión	±0,3°C
Resolución	0,1°C
Exactitud	±0,1°C
Rango de humedad relativa (RH)	0% RH -100% RH
Precisión	±2% RH
Resolución	0,1 RH
Exactitud	±1% RH
Rango operativo de CO ₂	0 ppm -5000 ppm
Precisión	±50 ppm
Resolución	1 ppm
Exactitud	±1 ppm

Tabla 8. Características del OPUS 20TCO

- Termohigrómetro DHT22: Sensor digital para la medición de humedad y temperatura. Aunque no se encontraba disponible al inicio de este trabajo, se ha incorporado en una campaña puntual para la medición del comportamiento del Muro Trombe, gracias a la colaboración establecida con otra Tesis Doctoral llevada a cabo por Alejandro Payán de Tejada, que en este momento se encuentra en fase de redacción. La simplicidad de su conexión y la facilidad de su puesta en funcionamiento contrastan con la dificultad de la programación requerida para su uso junto a la plataforma de código abierto Arduino.

Rango de temperatura	-40 - +80°C
Precisión	±0,5°C
Resolución	0,1°C
Exactitud	±0,2°C
Rango de humedad relativa	0-100% RH
Precisión	±2% RH
Resolución	0,1% RH
Exactitud	±1% RH

Tabla 9. Características del termohigrómetro DHT22

- Piranómetro Kypp&Zonen CMP3: Instrumento de medición que, conectado a cualquiera de los OPUS empleados, permite almacenar los datos sobre la densidad del flujo de la radiación solar. Los problemas encontrados durante la realización del estudio nos llevaron a descartar parcialmente su uso en este trabajo, como se verá posteriormente.

Rango de espectro de radiación	0-2000 W/m ²
Precisión	<20 W/m ²
Resolución	1 W/m ²

Tabla 10. Características del piranómetro Kypp&Zonen CMP3

- Termohigrómetro exterior Dwyer RHRS: Instrumento de medición compuesto por un termistor y un sensor capacitivo de humedad que se puede conectar a cualquier equipo OPUS. Al igual que en el caso del piranómetro, equipo

calibrado de fábrica y cuyos datos recogidos por este equipo se han utilizado parcialmente en los trabajos llevados a cabo.

Rango de temperatura	-40 - +60°C
Precisión	±0,2°C
Resolución	0,1°C
Exactitud	±0,3°C
Rango de humedad relativa	0-100% RH
Precisión	±2% RH
Resolución	0,1% RH
Exactitud	±1% RH

Tabla 11. Características del sensor de temperatura y humedad exterior Dwyer RHRS

3.2.3. Monitorización del edificio

La siguiente fase de la investigación consistió en la adaptación al edificio de los equipos e instrumentos empleados. Apoyándonos en las normativas, guías e investigaciones publicadas, se realizó una fase previa de experimentación para la determinación de su precisión, el intervalo de tiempo entre la recogida de datos y la ubicación de los sensores en las campañas de monitorización. Esta fase de la investigación se realizó sobre los termopares tipo k, que fueron los primeros instrumentos de medición empleados en la monitorización del edificio.

3.2.3.1. *Procedimiento empleado para determinar la precisión y exactitud de los instrumentos empleados*

En primer lugar, nos planteamos determinar los errores cometidos en las campañas de monitorización experimental del edificio. El error de los instrumentos de medición y los equipos se establecen cuantificando su precisión y su exactitud.

Para el caso de la precisión, todos los instrumentos utilizados fueron estudiados en condiciones similares para determinar los errores derivados de ellas; una vez caracterizado cada aparato se actuó en el campo de la exactitud de las medidas tomadas.

Esta parte del estudio se realizó en el laboratorio de física de la ETSEM ya que se disponía de varias “casas térmicas” (Figura 44). Por “casa térmica” se entiende una caja cúbica de plástico termoestable de dimensiones exteriores de 50 x 50 cm. a la que se puede acceder abriendo la cara superior; sus caras superior e inferior se encuentran acabadas interiormente por una capa de 6 cm. de poliestireno expandido, lo que les confiere una baja transmitancia. Sus caras laterales tienen una abertura cuadrada de unos 25 cm. con diferentes acabados interiores, que en la práctica se usan como superficies de ensayo para el cálculo de la transferencia de calor por conducción estacionaria en una dirección. Para este estudio se colocó en sus caras laterales plancha de poliestireno expandido de 4 cm, de forma que toda la casa térmica tuviese la menor transferencia de calor a través de su envolvente. En el interior de la “casa térmica” se encuentra una bombilla incandescente de 100 W de potencia, envuelta por una caja

metálica de color negro; la bombilla se enciende y calienta por radiación y convección la caja metálica que la cubre y, a través de esta, al resto del interior de la casa térmica. En el interior también se encuentra una sonda de temperatura encapsulada que registra el valor de temperatura alcanzado, de manera que cuando la casa alcanza un valor determinado de temperatura en su interior (regulable entre 50°C y 70°C), el interruptor que acciona la bombilla se abre o cierra para asegurar que la temperatura interior del equipo se mantenga estable. En la práctica, el gradiente térmico (de unos 40°C) entre el interior y el exterior es el que se usa para medir, con varias capas de materiales y diferentes sensores, el flujo de calor y determinar la transmitancia de un determinado material de ensayo.

Figura 44. Imágenes de la casa térmica donde se ensayaron los instrumentos de medida. Fuente: Elaboración propia

Se deseaba comprobar el comportamiento de los termopares tipo k que se iban a emplear en la monitorización, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas. Primeramente, se constató que la medida de temperatura tomada por todos los instrumentos de calibración era similar, asegurando el ajuste con la realidad de las mediciones tomadas en ese intervalo de temperaturas, coincidiendo con las temperaturas alcanzables en recintos del edificio en estudio. Posteriormente, se inició el proceso de calentamiento hasta estabilización de la temperatura interior de la casa térmica durante varias horas, y después el de enfriamiento hasta temperatura ambiente, apagando el accionamiento de la bombilla; este proceso se realizó en 3 días consecutivos, completando 3 ciclos de calentamiento-enfriamiento.

Los resultados indicaron que la mayoría de instrumentos que se iban a utilizar tenían una falta de precisión elevada, con una exactitud similar a la marcada por el fabricante. Los valores de la precisión de los termopares tipo k resultó ser similar en los instrumentos según su antigüedad y longitud, por lo que se asoció la falta de precisión a la deriva propia de un instrumento que ha sido empleado en multitud de investigaciones. También se observó que, la diferencia en la medida de temperatura tomada por cada instrumento, con la temperatura tomada por los termopares tipo k calibrados era la misma a temperatura ambiente y a temperatura elevada, razón por la que se interpretó el error como sistemático, en lo que comúnmente se conoce como “error del cero”. Como nota aclaratoria, indicar que la cuantificación del error de cada instrumento se ha realizado de forma independiente para cada una de las campañas experimentales que se

van a mostrar en este estudio, y sólo se han observado variaciones debidas a la deriva, por el uso de los instrumentos a lo largo de los años de monitorización.

En la casa térmica se ensayaron también los OPUS 20 y los termohigrómetros DHT 22, observando que al ser la primera vez que se empleaban respondían conforme a los parámetros expresados en sus características técnicas. En cuanto al resto de instrumentos de medida, también se encontraban calibrados de fábrica, por lo que no hubieron de ser calibrados de forma previa a la experimentación.

3.2.3.2. *Descripción del procedimiento para la elección del intervalo de tiempo escogido en la toma de datos*

Una vez realizada en laboratorio la caracterización y calibración de los instrumentos empleados, se realizó una campaña experimental para la determinación del intervalo de tiempo que se va a emplear de forma uniforme a todos los posteriores estudios.

Se realizó una monitorización durante una semana del primer módulo del edificio, compuesto por un aula, una oficina y un invernadero. El objetivo era empezar a experimentar sobre las temperaturas que se pueden alcanzar en cada recinto, a la par que ir ajustando la ubicación definitiva de los sensores, para las posteriores campañas de monitorización. En primer lugar, la problemática planteada era ver los errores que se podían cometer en la monitorización, al escoger un intervalo determinado de recogida de datos; si bien la norma UNE-EN ISO 7730 indica cuál ha de ser la exactitud del sensor, ésta también va relacionada con el error cometido por el equipo de recogida de datos respecto del valor real de la magnitud estudiada. La segunda cuestión planteada pretendía observar las diferencias que presenta la recogida de datos en unos u otros puntos, ya que la recomendación de ubicar el sensor en el centro del recinto, para hallar la temperatura del aire se antojaba dificultosa, dado el uso diario que tiene el edificio con la visita de multitud de colegios de la zona.

Un total de 12 termopares fueron colocados en el módulo, de forma que describían una malla regular de puntos sobre los que recoger información. Los termopares se colocaron a una altura de 1,5 m. por ser la altura media del recinto y describir una superficie virtual para el posterior análisis de los datos recabados. En la Figura 45 se puede ver la colocación de los termopares, separados entre sí por un máximo de 3 metros. En la zona acristalada del aula se encuentra una cortina textil, por lo que se decide colocar sensores por ambas caras de la cortina (sensores T2 y T3). En la oficina no existe cortina, por lo que sólo se coloca uno (sensor T10) por la cara interior de la carpintería. Los sensores que están expuestos a la radiación solar directa (T2, T4, T5 y T10) se ubican protegidos de ésta, de forma que todos se colocan en la cara interior de la carpintería. Esa misma razón obliga a colocar el sensor T1 en la cara interior del pilar, ubicado en el invernadero.

Figura 45. Ubicación de los termopares con los que se realizó esta fase del trabajo. Fuente: Elaboración propia

El procedimiento empleado consistió en localizar el sensor con el periodo horario cuya desviación estándar de temperatura sea más elevada y, por tanto, cuya monitorización sea más susceptible de sufrir una pérdida de datos representativos. El resultado muestra que el sensor termopar situado en el invernadero –T1– es el que muestra la mayor desviación estándar en el periodo entre las 12 y las 13 horas del Miércoles, 23 de julio de 2014. Por tanto, es el elegido para este estudio.

Se tomaron como referencia los datos obtenidos cada minuto (τ (1 min)) por el data-logger como media de las lecturas tomadas cada 10 segundos desde el sensor y se calcularon numéricamente los resultados para diferentes intervalos de toma de datos. Si cambiamos la programación del data-logger, por ejemplo, para el registro de datos cada 2 minutos, el resultado ($\bar{\tau}$ (2 min)) habría sido el valor medio de 12 lecturas tomadas en ese periodo de tiempo; siendo un procedimiento análogo el mismo proceso para cualquier otro periodo propuesto. Calculando los datos matemáticamente, se tomaron los datos recogidos cada minuto y se hallaron, en valor medio entre los datos minutales, el dato que hubiera registrado el data-logger para cada intervalo de tiempo. Por ejemplo, el dato para el periodo de 3 minutos se halló con la media de los 3 datos recogidos cada minuto en ese periodo, resultando ($\bar{\tau}$ (3 min)).

Se halló la desviación absoluta (σ_i) entre el dato real tomado a lo largo de la hora en estudio y el resultado que hubiéramos obtenido aplicando otro periodo de registro de datos, y se define por la ecuación $\sigma_i(t) = |\tau_i(t) - \bar{\tau}(t)|$. Con todos los resultados obtenidos al repetir el proceso durante la hora en estudio se obtiene la desviación absoluta media (σ_M), definido como $\sigma_M = \frac{\sum_{i=1}^n |\tau_i(t) - \bar{\tau}(t)|}{n}$, donde $\tau_i(t)$ es el dato recogido en el periodo de un minuto y $\bar{\tau}(t)$ es el resultado descrito previamente, en periodos de entre 1 y 15 minutos. En la Figura 46 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el procedimiento descrito, el error aleatorio sufrido en la toma de datos es dado por la desviación media absoluta.

Figura 46. Desviación media absoluta de los resultados obtenidos aplicando diferentes periodos de monitorización

Un valor de $\sigma_M < 0,2^\circ\text{C}$ es obtenido al utilizar intervalos de recogida de datos menores o iguales a 10 minutos, por lo que intervalos mayores a éste exceden el límite recomendado por la norma UNE-EN ISO 7726 (21).

3.2.3.3. Descripción del procedimiento empleado para la ubicación de los sensores en los recintos estudiados

Como ya se ha indicado, la dificultad de colocar sensores en la ubicación recomendada obligó a buscar una nueva localización de los mismos sin alterar la calidad de los datos recabados. En esta parte de la investigación se observaron las diferencias entre la colocación de los sensores en las paredes del edificio y del centro; esta cuestión ya fue considerada por varias investigaciones citadas en este texto, Limbachiya (Limbachiya et al., 2012) indicaba que la temperatura radiante media del recinto es similar a la del aire y Pfafferott et al. (Pfafferott et al., 2004) exponía que los sensores ubicados en el centro de los recintos tienen un tiempo de respuesta menor y son más sensibles a los cambios que si estos se ubican en las cercanías de las paredes a la hora de medir la temperatura del aire. De todos los termopares desplegados en esta fase de estudio, se circunscribió la adopción de un procedimiento común para las investigaciones a cuatro sensores del aula; tomando como referencia el sensor colocado en el centro del recinto y colgando a una altura intermedia (T6) se compararon los datos recogidos a lo largo de una semana con los datos mostrados por los sensores colocados a esa misma altura, pero ubicados en las posiciones laterales del aula: en una pared con la cara exterior expuesta a la intemperie (T7), en una pared adyacente a otro recinto cerrado del edificio (T8) y en una carpintería (T2).

Con los registros de datos obtenidos se va a tomar el coeficiente de correlación de Pearson (46), un índice que se utiliza para medir el grado de relación entre dos variables.

$$\rho_{T_x T_y} = \frac{\sigma_{T_x T_y}}{\sigma_{T_x} \sigma_{T_y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_{T_x(i)} - \bar{\tau}_{T_x})(\tau_{T_y(i)} - \bar{\tau}_{T_y})}{\sigma_{T_x} \sigma_{T_y}} \quad (46)$$

Donde $\tau_{T_x(i)}$ y $\tau_{T_y(i)}$ son los datos recogidos en cada minuto de estudio, $\bar{\tau}_{T_x}$ y $\bar{\tau}_{T_y}$ son los resultados medios obtenidos en cada periodo de análisis, σ_{T_x} y σ_{T_y} son las desviaciones estándar de cada sensor estudiado.

Durante la semana en estudio se recogieron 10.080 datos minutales de temperatura por cada sensor, que se tomaron como base para este análisis. La Tabla 12 muestra los valores promedio de temperatura y desviación estándar de las posiciones estudiadas, primero a nivel semanal y después diario; así como el grado de relación de las posiciones T2, T7 y T8 respecto de la posición de referencia (T6).

Periodo en estudio	T6		T2		T7		T8		Coeficiente correlación Pearson		
	Temp media (°C)	Desv. Éstandar (°C)	Temp media (°C)	Desv. Éstandar (°C)	Temp media (°C)	Desv. Éstandar (°C)	Temp media (°C)	Desv. Éstandar (°C)	T6-T2	T6-T7	T6-T8
Semana	26,4	2,3	27,1	2,8	26,5	2,0	26,3	2,1	0,98	0,97	0,99
21.07	24,6	1,7	24,8	2,4	24,5	1,3	24,5	1,5	0,97	0,95	0,98
22.07	24,2	2,5	25,0	2,7	24,4	2,0	24,3	2,1	0,99	0,98	0,99
23.07	26,3	1,9	26,8	2,2	26,3	1,51	26,1	1,7	0,99	0,97	0,99
24.07	27,5	1,5	29,0	2,7	27,6	1,2	27,4	1,4	0,97	0,97	0,99
25.07	27,3	1,6	27,8	2,1	27,4	1,1	27,2	1,4	0,98	0,96	0,99
26.07	27,2	1,6	28,0	2,1	27,4	1,2	27,2	1,4	0,99	0,97	0,99
27.07	27,9	1,8	28,7	2,2	28,1	1,3	27,8	1,5	0,99	0,98	0,99

Tabla 12. Valores promedios de Temperatura (°C), desviación estándar (°C) y coeficiente de correlación de Pearson en las posiciones estudiadas, por semana y para cada día en estudio

El grado de correlación mostrado es muy elevado en todos los casos, sin embargo se rechazaron los resultados por tener una curtosis y un sesgo estandarizado fuera de rango, debido a que los datos tomados durante toda la semana sufrían las variaciones de temperatura propias de la noche y el día, y no seguían una distribución normal al ser analizados en conjunto.

Por este motivo, se realizó un análisis horario del grado de relación entre las posiciones estudiadas. El resultado en este caso muestra distribuciones que pueden ser asemejados con una normal en cuanto al análisis de la curtosis y el sesgo estandarizado. La obtención de un p-valor menor de 0,05 también indica que la hipótesis alternativa de

que la comparación de las variables sea diferente puede rechazarse con un 95% de confianza, aceptándose la hipótesis de que ambas muestras sean iguales. Como siguiente paso se aplicó un criterio arbitrario al tener en cuenta únicamente los valores de grado de relación mayor a 0,95, para asegurar una correlación muy fuerte entre ambas muestras de datos horarios. El sensor T2 ubicado en la superficie acristalada la cumple en un 4% de sus datos, el sensor T7 colocado en la pared cuya cara exterior está expuesta al ambiente lo cumple en un 52% y el sensor T8, ubicado en la partición, muestra un 68% de periodos horarios con un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0,95.

T6-T2	T6-T7	T6-T8
4%	52%	68%

Tabla 13. Porcentaje de horas con un coeficiente de correlación de Pearson mayor que 0,95

El análisis estadístico sobre los datos recogidos se corresponde gráficamente con valores mostrados en la figura 47, en la que se observa cómo los valores de temperatura encontrados en el centro del recinto y en la pared lateral adyacente a la oficina varían sólo unas décimas de grado. En consonancia con el comportamiento descrito por Pfafferott (Pfafferott et al., 2004), la monitorización en los laterales de un recinto es menos sensible a los cambios de temperatura que se dan al comienzo de la jornada laboral en el edificio.

Figura 47. Valores de temperatura recogidos en las posiciones T6 y T8 durante la semana de estudio

Los datos recogidos al colocar el sensor en una partición interior están fuertemente relacionados con los datos recogidos en el centro del recinto, cumpliendo con las recomendaciones establecidas por la normativa estandarizada. El objetivo de no entorpecer el normal funcionamiento del aula se consigue con la adaptación de los puntos donde se va a realizar la monitorización al edificio en uso.

3.2.3.4. Conclusiones parciales. Localización de los sensores y metodología de archivo de los datos recabados

Como consecuencia de los trabajos previos realizados, se obtuvo una propuesta común de trabajo para todas las campañas de monitorización llevadas a cabo y descritas en este documento.

- Los sensores empleados deben ser calibrados y caracterizados de forma previa a su uso en una campaña de experimentación. De lo contrario, la revisión de los datos recabados puede ser engañosa para el investigador, al no detectar los errores que pueden presentar y, en consecuencia, realizar un análisis erróneo de los datos experimentales recabados. La determinación del error sistemático de un instrumento debe ejecutarse de forma previa al trabajo de monitorización.
- De forma independiente a la precisión y la exactitud mostrada por un instrumento, también se ha de comprobar el equipo que ha de recoger los datos. Con este estudio previo se ha comprobado que, la forma de recoger los datos por el equipo incurre en un error mayor al recomendado por la norma UNE-EN ISO 7730 y a la exactitud mostrada por el propio sensor. La recogida de datos empleada en todas las campañas de monitorización se ajustará a un intervalo de tiempo de entre uno y diez minutos como máximo, ya que para intervalos mayores se comete un error en la exactitud de la medida tomada mayor a la recomendada.
- La localización de los sensores puede resultar dificultosa a la hora de seguir las recomendaciones marcadas por la normativa, por lo que en el caso de un edificio en uso, se antojaba inevitable la búsqueda de posiciones alternativas para los instrumentos empleados. Con el procedimiento seguido en esta fase del trabajo, se muestra una correlación casi perfecta entre los datos recogidos en el centro del recinto y en las paredes laterales. A la hora de la elección de la pared donde colocar el sensor, se recomienda que esta no sea afectada por la radiación solar o por los agentes exteriores; la colocación de los sensores en las posteriores campañas se hará en paredes interiores o en caras interiores de los pies derechos de madera que conforman la estructura del edificio. Según los resultados mostrados en este procedimiento, se puede corroborar que la temperatura del aire coincide en gran medida con la temperatura de las paredes laterales y, por tanto, con la temperatura radiante de dicha superficie, tal y como se indicaba en estudios previos.

3.2.4. Descripción del procedimiento seguido para la creación del modelo simulado

El empleo de la herramienta informática DesignBuilder requiere de un proceso de adaptación del edificio al modo de funcionamiento del programa. En primer lugar, la fase de dibujo en tres dimensiones del edificio. Partiendo de un modelo geométrico del edificio, en planta, se definieron los límites del mismo y, con la ayuda de secciones y alzados se definieron las alturas totales de los recintos y las ubicaciones de los

tragaluces o espacios a doble altura. Las modificaciones que se querían realizar sobre el edificio debieron ser tenidas en cuenta a la hora de dibujar el modelo, dado que posteriormente no podían significar una modificación excesiva en la configuración constructiva del edificio. Por ello, también el suelo fue conformado como parte del diseño del edificio. Debido a la cantidad de detalles que requiere el desarrollo completo del modelo simulado de este edificio, la geometría del edificio se encuentra en el Anexo A y el proceso de dibujo y creación del modelo en el Anexo C.

La simulación con el programa para su posterior validación exige del tratamiento de los datos requeridos con fidelidad a la realidad observada durante la monitorización. Por ello, entre otras cosas, en cada visita semanal al edificio se observaban los patrones de comportamiento de los usuarios del edificio.

En cuanto a la ventilación del edificio, se constató que los usuarios abrían las ventanas de la administración y del aula y la oficina durante los meses cálidos desde el inicio de la jornada (8:00 horas) hasta el final de la misma (14:00 horas-15:00 horas) todos los días laborables. Durante las estaciones de otoño y primavera, intervenía más la sensación térmica que la costumbre a la hora de abrir o cerrar las ventanas, pero generalmente se relacionaba la apertura y cierre de las ventanas con la radiación solar que llega al edificio. Los días soleados de otoño y primavera se abrían las ventanas de los invernaderos para permitir la entrada de la energía térmica acumulada en el aire del invernadero hacia los recintos interiores, abriéndolas al inicio de la jornada y cerrándolas al final de la misma. Durante los meses de invierno, se continuaban abriendo las ventanas bajo esa misma premisa, pero sólo en los días completamente soleados y con la motivación de permitir la entrada de la radiación solar hasta el interior del edificio.

Otro funcionamiento distinto se observaba en los tragaluces del edificio. Los tragaluces del aula y el pasillo tenían una apertura oscilobatiente, quedando abiertos por su parte superior. Su apertura se produce de forma continuada desde el mes de mayo hasta mediados de octubre, posteriormente no han vuelto a ver abiertos durante las campaña de monitorización.

En cuanto a la demanda de energía eléctrica, se observó el patrón de uso de las luminarias del edificio. Dado el horario matutino de ocupación, la mayoría de recintos del edificio no hacen uso de las luminarias que tienen instaladas, salvo el aula, las oficinas y la biblioteca. Por tanto, el horario de iluminación también se configuró en el programa entre las 8 de la mañana y las 3 de la tarde, durante los días laborables.

La demanda de energía para calefacción fue revisada por partes. La primera fue cuándo se produjo el encendido y el apagado de la caldera de biomasa, ya que eso implicaba un aumento de la energía producida en el recinto del cuarto técnico y modificaba el balance energético del recinto. En el caso estudiado, la caldera permaneció encendida entre el mes de octubre y el mes de marzo. Además, se hubo de confirmar el uso efectivo de la

calefacción, esto se produjo de forma casi continuada entre el 27 de noviembre y el 15 de febrero del periodo estudiado.

La ocupación del edificio también fue introducida en el programa, ya que el aula permanece ocupada por entre 30 y 50 personas durante las primeras horas de los días laborables, entre los meses de octubre y mayo. Además, el recinto de administración cuenta con dos personas hasta medio día, al igual que la oficina de apoyo del edificio.

El programa cuenta con plantillas predeterminadas para la caracterización de los sistemas constructivos en función de su posición en el edificio, discriminando cubiertas, cerramientos exteriores, particiones interiores, tipos de carpinterías en el edificio o solados interiores y exteriores. Gracias a contar con la información completa del proyecto del edificio, el proceso seguido ha bastado con ordenar los materiales que componen cada sistema constructivo, de forma similar a la que se emplea en otros programas de cálculo de la demanda energética de edificios.

En la programación del modelo se han requerido datos respecto de la ubicación del edificio, altura respecto del mar, orientación al norte y el empleo de un archivo climático creado a partir de datos reales.

En definitiva, la recolección de datos acerca del edificio ha sido más completa posible, para poder dotar al modelo que se va a emplear en las simulaciones de unas características que permitan acercarlo al comportamiento térmico real del edificio.

Una vez creado el modelo numérico, se han seguido las propuestas de diferentes organismos y normativas americanas para validar los resultados de la simulación del edificio respecto de los datos experimentales.

Tras la validación del modelo se ha mostrado de qué manera afectan las estrategias pasivas estudiadas de manera experimental en el edificio. Realizando unas modificaciones en el modelo se pretende exponer, en función de las temperaturas interiores, cómo la implementación de cada una de las estrategias pasivas modifica los resultados de las condiciones interiores del edificio. Un análisis en base horaria para los meses de julio y enero, comparando, sobre los recintos más significativos para cada modificación, los resultados obtenidos en el modelo numérico sobre el modelo del estado actual del edificio.

Además, también se ha calculado cuál es la variación tras cada modificación en el consumo del edificio para satisfacer la demanda de calefacción. De esta manera, el edificio no sólo ha sido analizado desde un punto de vista experimental, sino que también se ha mostrado de forma simulada cuáles son las consecuencias térmicas si no se hubieran ejecutado todas las estrategias pasivas que incorpora el edificio.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

Como se ha comentado en el anterior capítulo, para llegar a mostrar la importancia de las estrategias pasivas empleadas, se ha de comenzar por el entendimiento del funcionamiento del edificio, a nivel térmico y a nivel de uso y ocupación. En el capítulo anterior, se ha comenzado por la selección del procedimiento común para el análisis del comportamiento térmico experimental del edificio. En este capítulo se presentan las campañas de monitorización que se han realizado, dividiéndolas entre campañas puntuales y estacionales para el análisis detallado de determinados sistemas constructivos y una campaña anual para analizar el comportamiento térmico general del edificio.

El objetivo es parametrizar el comportamiento térmico de los sistemas constructivos característicos que se encuentran en este edificio; además de un análisis térmico global del edificio que permita estudiar las consecuencias reales de la adopción en un edificio de las estrategias pasivas que se han ejecutado en él.

Además, los datos obtenidos en la monitorización anual servirán para la calibración y ajuste del modelo simulado del edificio.

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL EDIFICIO POR PATRONES ESTACIONALES Y DE OCUPACIÓN

En cualquier tipo de edificio se pueden establecer diferentes patrones de uso en función de la estación del año, ya sea por el uso de calefacción y refrigeración, por la ventilación, ocupación, iluminación o vestimenta de los usuarios. En este caso, al encontrarnos con un edificio de pública concurrencia, el patrón también se define a escala diaria con unas características diferenciadas entre los días laborables y los fines de semana. Además, debido a su propio uso como aula, el patrón viene condicionado por el calendario escolar de los colegios que visitan y ocupan el edificio.

Por tanto, este capítulo comienza por la caracterización de los patrones que se han encontrado durante el análisis realizado en el edificio, para el posterior análisis por periodos mensuales de los datos recabados durante las campañas de monitorización.

Para la caracterización de los patrones se ha empleado el método de observación instantánea. Las continuas visitas durante los últimos 4 años al edificio nos han permitido trazar experimentalmente un patrón de comportamiento de los usuarios y trabajadores, y el empleo que se hace el edificio, sus instalaciones y la apertura y cierre de ventanas. En la Tabla 14 se muestran los periodos diferenciados en los que se van a dividir los patrones de uso del edificio.

A la hora de llevar a cabo las campañas estacionales realizadas sobre los sistemas constructivos, se han realizado sobre un mismo periodo, y la campaña anual de monitorización engloba todos los periodos que se van a describir en este apartado.

	1 Ene- 28 Feb	1 Mar- 31 Mayo	1 Junio- 31 Julio	1 Agosto- 31 Agosto	1 Sept- 30 Nov	1 Dic- 31 Dic
Actividades usuarios	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí
Trabajadores	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Calefacción	Sí	No	No	No	No	Sí
Ventilación natural	No	Sí	Sí	No	Sí	No
Vestimenta trabajadores	Invierno	Mixta	Verano	Verano	Mixta	Invierno

Tabla 14. Caracterización de los periodos a lo largo del año

Todos los periodos en los que se divide la caracterización del edificio se ven influenciados por la actividad de los trabajadores, por lo que, en caso de ser necesario, la iluminación, calefacción y ventilación se accionan dentro de su horario de trabajo (8-15 horas de lunes a viernes).

En función de las condiciones indicadas en la tabla 14, los parámetros empleados en el cálculo de los valores de sensación térmica durante las campañas de monitorización han sido los siguientes:

- En cuanto a la vestimenta de los trabajadores: 0,5 clo para el verano, 0,8 clo para la vestimenta mixta y 1,0 clo para la vestimenta de invierno. Hay que contar con que los trabajadores disponen de uniforme para el desarrollo de las actividades, por lo que la uniformidad ha permitido no discernir entre género masculino o femenino, o entre labores de administración y de actividades en exterior o en interior.
- En cuanto a las tareas llevadas a cabo en el edificio: Fundamentalmente se dividen entre labores administrativas y tareas de docencia en el aula del edificio. Se han clasificado como tareas sedentarias, con un valor de 1,2 met (70 W/m^2).
- En cuanto a la velocidad del viento en los recintos: Las aberturas del edificio se encuentran cerradas durante la mayor parte del año, y cuando se abren es en la época estival. Además, el edificio se encuentra semienterrado y protegido de la acción del viento según la dirección predominante en Madrid. Por todo esto, se ha escogido el valor de 0,05 m/s como velocidad interior del aire, para el cálculo de la sensación térmica (PMV) en todos los recintos.

La ocupación del centro por los usuarios y trabajadores se encuentra distinguida entre las labores de docencia en el aula y las tareas administrativas. La labor docente se desarrolla fundamentalmente en el exterior del edificio, por lo que no afecta a los cálculos de ocupación en su interior. En caso de que las condiciones climáticas sean

adversas, sí que se desarrollan actividades de interior en el aula, con una ocupación de 40 personas, entre las 9 horas y las 11 horas. La ocupación del centro por los trabajadores se desarrolla fundamentalmente en el exterior, en labores de mantenimiento y cuidado de las plantas. En el interior del edificio permanecen 2 personas dentro del recinto de administración y, como máximo, 2 o 3 personas en la oficina de apoyo, durante el periodo de apertura del centro, ya que están continuamente saliendo y entrando del edificio. Por razones de sobrecalentamiento en la oficina de apoyo, trasladan su ubicación durante los meses de verano a la oficina junto al aula. Como ya se ha indicado, la ocupación del centro por los trabajadores es entre las 8 horas y las 15 horas de lunes a viernes.

Para el cálculo de las ganancias internas por el uso de electricidad, se tiene en cuenta que su tarea administrativa requiere del empleo de un ordenador por persona. En cuanto a la iluminación del centro, sólo puntualmente la biblioteca y el aula del edificio requieren del uso de la iluminación. Dado el uso puntual de la iluminación, no se ha tenido en cuenta ni en las campañas de monitorización ni en la simulación del edificio.

4.2. CAMPAÑAS ESTACIONALES PARA LA MONITORIZACIÓN DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PASIVOS ESTUDIADOS

Cronológicamente hablando, las campañas de monitorización se han realizado en el edificio desde el año 2013 hasta el año 2016. Como se ve en la Tabla 15, en primer lugar se llevaron a cabo las campañas estacionales para los sistemas constructivos y, posteriormente, la campaña anual para observar el comportamiento térmico del edificio.

Campaña de monitorización	Periodo de experimentación
Cubierta vegetal	Mayo 2013
Invernadero, aula y oficina	Julio 2014
Invernadero, aula y oficina	Enero-Febrero 2015
Muro Trombe	Febrero 2016
Cubierta vegetal	Marzo 2016
Monitorización anual	Junio 2015-Junio 2016

Tabla 15. Campañas de monitorización llevadas a cabo

4.2.1. Comportamiento térmico del módulo 1: Invernadero, aula y oficina

En estos recintos (Figura 48) se realizaron sendas campañas de monitorización para mostrar el comportamiento térmico del edificio en esta zona. Es la más representativa por ser el módulo que engloba todas las actividades externas que se realizan en el edificio; también, en este módulo se encuentran la mayoría de estrategias pasivas descritas en las investigaciones que se han encontrado sobre arquitectura bioclimática.

Figura 48. En gris, módulo 1 del edificio, estudiado en esta campaña de monitorización

4.2.1.1. *Análisis del comportamiento térmico durante la estación de verano*

La primera campaña de monitorización se realizó durante el verano de 2014, entre los días 18 y 27 de julio. Fue realizado un análisis de las temperaturas alcanzadas en el módulo estudiado (Figura 49), con el objetivo de observar la influencia de los sistemas constructivos empleados en el edificio; en este caso el espacio invernadero adyacente a ellos fue adoptada con el fin de actuar como un espacio tampón en cuanto a la influencia de las temperaturas exteriores en el interior de los recintos habitables; pero que en las investigaciones consultadas para climas similares en el sur de Europa supone el efecto contrario, produciendo sobrecalentamiento en el interior del edificio. La radiación solar directa sobre los espacios acristalados implica una entrada de flujo de calor hacia el interior por radiación de la onda visible de luz que, al impactar sobre los elementos sólidos se convierte en una radiación emitida en otra longitud de onda, impidiendo su salida hacia el exterior y acumulando la razón de la transferencia de calor en el interior del recinto.

La monitorización se realizó con termopares tipo k y equipos de recogida de datos OPUS 200 y OPUS 208; siendo el guardado de datos a intervalos de 1 minuto, para su posterior tratamiento en diferentes intervalos, en función del tipo de análisis buscado.

Figura 49. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m.)

Para evitar los problemas de sobrecalentamiento detectados en otras investigaciones, en este edificio los espacios invernadero disponen de un alero cuya longitud fue calculada en función de la inclinación del sol durante el verano (Figura 50 izqda.). Además, de los dos espacios interiores, en el aula se dispuso una cortina tupida de color naranja (Figura 50 dcha.), mientras que en la oficina no se colocaron elementos de sombreado móvil (Figura 51).

Figura 50. A la izqda. efecto de sombreado producido por el alero en el edificio, a mediodía en el mes de Julio. A la dcha. imagen del aula del edificio, con sensores termopares ubicados en diferentes posiciones

Figura 51. Imagen de la oficina en estudio, con varios termopares colocados a una altura intermedia del recinto

Durante la época estival, la oficina es ocupada por los trabajadores, quienes en la época invernal se sitúan en la zona administrativa junto al Muro Trombe del tercer módulo del edificio. Esto conlleva una adaptación del uso del recinto a la sensación térmica que los trabajadores manifiestan, abriendo las ventanas del espacio invernadero y de la oficina durante su horario de trabajo, no así las ventanas del aula que no se encontraba ocupada durante el periodo estudiado.

Por tanto, en primer lugar, el análisis va a tener en cuenta las posibles diferencias entre los días laborables y las jornadas festivas, en relación con la ventilación natural que supone la apertura de las ventanas de los recintos indicados; otra variable a tener en cuenta es la presencia de la cortina en sólo uno de los dos recintos; por último indicar que el análisis se va a realizar diferenciando las horas de trabajo de los usuarios y el resto del día.

En la Figura 52 se muestran las temperaturas alcanzadas en los recintos analizados, así como la temperatura ambiente y la radiación solar directa (G). Debido a las variables a estudiar, de aquí en adelante los días sobre los que se van a mostrar análisis detallados van a corresponder a la semana entre el lunes, 21 de julio y el domingo, 27 de julio de 2014, ya que las condiciones climáticas encontradas durante el primer fin de semana del estudio no se corresponden con las condiciones típicas del verano en el clima mediterráneo, con sol y temperaturas máximas superiores a los 30°C.

Figura 52. Condiciones térmicas y de radiación durante la monitorización de julio de 2014

Sobre las condiciones térmicas encontradas en el espacio invernadero (Figura 53), indicar que su patrón de comportamiento tiene una alta correlación con las temperaturas ambientales alcanzadas a lo largo del día; pero no con la radiación solar, con la que hay un desfase de dos horas. Por el contrario, durante el periodo nocturno, la temperatura interior se mantiene entre 2 y 5°C mayor que la exterior. Este comportamiento se asocia a la falta de acciones para el aprovechamiento de la ventilación nocturna del edificio en la disminución de la temperatura en el interior; durante el día, el hecho de alcanzarse temperaturas sin desfase con la temperatura exterior prueba que la tasa de renovación de aire es elevada, debido a la infiltración por la carpintería del edificio. Este comportamiento se repite durante el fin de semana, periodo en que el edificio permanece desocupado, lo que descarta la acción de la ventilación manual por los usuarios como motivo de este efecto registrado.

Figura 53. Condiciones térmicas del invernadero adyacente al aula y la oficina

En cuanto al comportamiento térmico de los espacios interiores de aula y oficina (Figura 54), durante el día sí se muestra el amortiguamiento que supone el encontrarse un recinto interior adyacente, como es el espacio invernadero. Las temperaturas interiores alcanzan unos valores máximos de 5°C menores a la temperatura del recinto invernadero, mientras que por la noche ocurre el efecto contrario, mostrando nuevamente la falta de la ventilación nocturna del edificio para conseguir bajar las temperaturas interiores hasta unas condiciones aceptables según la normativa vigente (RITE (Spanish Government, 2013b)), que establece el valor de la temperatura en 25°C durante el periodo estival.

Figura 54. Condiciones térmicas en los recintos estudiados del edificio

Por tanto, la ausencia de usuarios determina el comportamiento térmico del edificio al no poder efectuar acciones de enfriamiento nocturno, por cuestiones de seguridad del edificio público que se está analizando. No obstante, las temperaturas interiores resultan bastante estables a lo largo del día, rozando los 30°C durante las horas centrales de la tarde, cuando el edificio tampoco se encuentra ocupado. En este resultado se encuentra clara la influencia de la cubierta vegetal y el alero que protegen al edificio y al invernadero, respectivamente. Respecto a la cubierta vegetal, se estudiará su comportamiento e influencia en su apartado correspondiente pero, en cuanto al alero, se demuestra su influencia en que las temperaturas alcanzadas en el interior del invernadero no se deben a la influencia de la radiación solar directa, que sumaría una gran cuantía a la razón de la transferencia de calor que se produce a través del espacio acristalado. No obstante, esta afirmación será nuevamente analizada en el siguiente apartado, con los resultados obtenidos durante la campaña realizada en la época invernal.

Volviendo a la cuestión de que la ocupación del edificio determina el comportamiento térmico mostrado en el estudio, también se observó que el patrón de temperaturas matutino no es el mismo si se encuentran usuarios en el edificio o no. Analizando el periodo de apertura del edificio, de 8h. a 16h., se observan diferencias entre los días laborables (Figura 55) y los festivos (Figura 56). Con la llegada de los trabajadores a las 8 de la mañana se observa una rápida bajada en los valores de temperaturas, correspondiente a la apertura de las ventanas del invernadero y de la oficina. Esta disminución en la temperatura no ocurre en el aula, sin ocupación y cerrada. También se muestra al final de la jornada una estabilización de las temperaturas, que corresponde con el cierre de las ventanas abiertas en esos recintos. Entre los días laborables destaca el miércoles, jornada en la cual los trabajadores no abrieron las ventanas al llegar, mostrando un patrón térmico similar al del aula y al del fin de semana en estudio. Con el siguiente análisis, también queríamos observar hasta qué punto es necesaria la apertura de las ventanas para el correcto funcionamiento del edificio, cuando gráficamente se muestra que el comportamiento térmico sigue patrones distintos.

Figura 55. Evolución de la temperatura durante el horario de apertura, en días laborables

Figura 56. Evolución de la temperatura durante el mismo horario de apertura, en días festivos

4.2.1.2. Análisis sobre la apertura de las ventanas en verano

Dado que las temperaturas en los recintos aumentan linealmente a lo largo de la jornada laboral, el análisis se va a centrar en cuantificar la correlación entre sus temperaturas y en determinar a partir de qué momento se puede descartar la necesidad de la ventilación con las ventanas abiertas.

En primer lugar, se han comparado las temperaturas interiores durante los días laborables jueves y viernes, debido a la similitud en las temperaturas interiores y las condiciones ambientales exteriores. Como se muestra en las figuras anteriores, la

temperatura asciende de forma más pronunciada en la oficina que en el aula los días que se abren las ventanas. Esa relación se puede cuantificar experimentalmente relacionando los valores de temperatura en el invernadero con los del aula y la oficina (Figura 57). El resultado de la relación indica que, en la oficina, donde se encuentran las ventanas abiertas, la temperatura en la oficina asciende 1°C por cada 2°C de aumento de temperatura en el invernadero. Mientras tanto, en el aula, que permanece con las ventanas cerradas, la temperatura en el invernadero ha de ascender en 3°C para que la temperatura del aula aumente en 1°C . Como consecuencia, se concluye que es recomendable cerrar las ventanas para disminuir el ascenso en las temperaturas interiores.

Figura 57. Relación entre las temperaturas alcanzadas en el invernadero con el aula y la oficina, en días laborables

Pero esta afirmación no se puede hacer extensible a toda la jornada laboral, como se observa en las figuras anteriores, la apertura de las ventanas a primera hora de la mañana sí que disminuye las temperaturas de los recintos en varios grados. De ahí la segunda cuestión, cuál sería el tiempo recomendable de apertura de las ventanas. Para este análisis puntual, se ha trabajado con los datos recogidos cada minuto, que posteriormente han sido tratados en periodos de diez minutos. Para cada periodo, se ha obtenido la media de la temperatura registrada (τ), su desviación media y el coeficiente de variación (CV) de los datos en cada periodo, cuyos resultados se muestran en la Figura 58.

Figura 58. Valores de las temperaturas y coeficiente de variación en la oficina, para los días laborables

- Entre las 7 y las 8 de la mañana se producen unas pequeñas variaciones en la temperatura. En ausencia de radiación solar directa, se consideran debidas a la renovación de aire por la influencia de las filtraciones de la carpintería de madera.
- La apertura de las ventanas a las 8 de la mañana provoca una fuerte variación en las temperaturas interiores, debido a la convección forzada que supone la diferencia de presión entre el interior y el ambiente; este proceso dura diez minutos.
- Los siguientes periodos, hasta las 9 de la mañana, los valores de temperatura no sufren variación y el coeficiente de variación se estabiliza en valores similares a los del primer periodo del día.
- La única excepción se registra el miércoles, día en el que la oficina no fue ocupada por los trabajadores y no se abrieron sus ventanas; al contrario que el resto de días, ese día no se observan variaciones bruscas en la temperatura de la oficina.

Por tanto, durante los diez primeros minutos, la ventilación se produce por diferencia de presión entre el exterior y el interior. A partir de esos diez primeros minutos, la ventilación del recinto se produce por flotabilidad, por lo que la temperatura del aire de la oficina fluctuará en función de las temperaturas exteriores. Como consecuencia, se concluye que las ventanas sólo deben permanecer abiertas mientras que se produce la ventilación por diferencia de presión, cerrándose tras los primeros diez minutos de cada día.

Este hecho también queda constatado en la Figura 55 analizando el comportamiento térmico de los recintos al final de la jornada laboral. Cuando los trabajadores cierran las ventanas, la temperatura de la oficina se estabiliza y no sigue aumentando, como sí hace la temperatura exterior y la del invernadero. Desde ese momento, el invernadero recupera su función original, sirve como espacio regulador de las temperaturas exteriores hacia el interior del edificio.

4.2.1.3. *Análisis de la influencia de las cortinas durante la estación de verano*

El siguiente análisis que se va a realizar es evaluar la necesidad de la colocación de cortinas en verano, ya que el alero del edificio impide la radiación solar directa en verano. Para esta parte del estudio se utilizan otros sensores termopares que se instalaron en el edificio; tomando medidas de temperatura de la misma forma que los anteriores, se colocaron a tres alturas sensores en las caras interiores de la carpintería de madera de los recintos, así como en la cortina del aula, para un total de 9 termopares en esta parte del estudio, a sumar a los ya usados en la parte previa del estudio (Figura 59). Las variables a analizar cuentan con las diferencias encontradas entre el aula y la oficina, según si la cortina del aula se encuentra completamente abierta o totalmente cerrada.

Figura 59. Plano y sección del edificio, con la ubicación de los sensores colocados para este análisis

De forma preliminar, según las temperaturas registradas en el aula y la oficina, se encuentra una diferencia en torno a $1 \pm 0,5$ °C entre el aula y la oficina (Figura 54); dado que esta diferencia se aprecia tanto durante el día como por la noche se asocia a la diferencia de tamaño, infiltraciones y envolvente de los recintos; por tanto, la influencia de las cortinas debe demostrarse mediante un análisis detallado de la zona del acristalamiento.

De los termopares nombrados previamente, y colocados según figura en la imagen anterior, se nombra T1 a la posición del termopar colocado en la cara interior del pilar del invernadero, T2 a la posición de los termopares colocados por la cara interior de la carpintería de madera del aula, T3 a la posición de los termopares colocados en la cara interior de la cortina del aula y T10 a la posición de los termopares situados en la cara interior de la carpintería de madera de la oficina.

Con el estudio del comportamiento de todos estos sensores, se propone la comparación de los valores de temperatura en la zona acristalada, al inicio y al final de la jornada laboral (8 y 16h.) durante 3 días distintos (Figura 60), por las diferencias encontradas en la configuración de los recintos.

- El miércoles, día 23 de Julio, los recintos de aula y oficina permanecieron sin ocupación, con las ventanas cerradas y las cortinas del aula abiertas de par en par; por lo que a priori las condiciones de temperatura en ambos recintos deberían ser iguales, salvo esa diferencia constante de temperatura ya indicada; en ausencia de radiación solar directa y ocupación, el balance de energía es similar para ambos recintos y el resultado es el esperado, ya que el comportamiento térmico es similar a ambas horas de estudio.
- El viernes, 25 de Julio, se encuentran las cortinas del aula cerradas y las ventanas del invernadero y de la oficina, abiertas. Al inicio del día se muestra una asimetría de temperaturas en el aula de 3°C entre la altura de 2,5m. y el suelo, pero la diferencia de temperatura entre ambas posiciones -T2 y T3- no llega a un grado; en el caso de la oficina (T10) no se da la asimetría, lo que se justifica debido a la reciente apertura de las ventanas y la ventilación forzada por

la equalización de condiciones entre el interior y el exterior; el régimen turbulento del aire de la oficina en ese momento puede dar variaciones súbitas de temperatura y cualquier valor se considera válido. Al final de la jornada laboral, los valores de temperaturas en ambos recintos son similares, siendo lo esperable que fuesen diferentes dado que en la oficina han permanecido las ventanas abiertas y en el aula, tanto ventanas como cortinas han estado cerradas.

- El domingo, día 27 de Julio y festivo, la oficina y el aula permanecieron cerradas y las cortinas de éste, también. Se observa el mismo patrón y similares temperaturas tanto al inicio como al final de la jornada en ambos recintos.

Figura 60. Valores de temperatura en el invernadero y en la zona acristalada de los recintos aula y oficina

4.2.1.4. *Análisis de los índices de confort establecidos por la norma UNE EN-ISO 7730 durante la estación de verano*

Otra cuestión que también es mostrada en la figura anterior es la asimetría vertical de temperaturas, dándose diferencias de temperatura en torno a 3°C entra la altura de la cabeza y los pies. Esta cuestión se encuentra tratada en lo norma UNE-EN ISO 7730 (Comité Técnico AEN/CTN 81, 2006), como ya se ha visto en el capítulo 2; por los resultados obtenidos en su cálculo queda encuadrado dentro de la categoría B, según la cual al darse diferencias de temperaturas de 3°C, aproximadamente un 5% de las personas que ocupen el edificio se sentirán incómodas.

Paralelamente, y considerando que la norma también marca una categorización de los edificios según la diferencia de temperatura radiante en un recinto, en esta parte del estudio se muestran los valores de temperaturas recogidos a una altura de 1,5 m por todos los sensores empleados en los estudios previos, tanto en la fase de ubicación de sensores y el ajuste del intervalo de tiempo de monitorización, como en los estudios previos de este mismo apartado. Como se muestra en la Figura 61, se emplean un total de 12 termopares, ubicados a una altura de 1,5m de altura sobre el suelo. Se recogen los valores de temperatura a las 12 de la mañana durante toda la semana en estudio y, posteriormente, se realiza una interpolación de esos valores para obtener una representación gráfica de la temperatura a esa altura, con el programa Surfer 11.0. Los resultados muestran que la diferencia de temperatura también ronda los 3°C entre la parte cercana al acristalamiento de los recintos aula y oficina, y la parte opuesta, tanto para los días en que las cortinas y ventanas están abiertas como para el fin de semana.

Figura 61. Ubicación de los sensores y valores de temperatura a una altura de 1,5m., para la semana en estudio

Como se ha visto en la recopilación de investigaciones previas a este estudio, se puede asimilar la temperatura radiante superficial con la temperatura del aire. Aplicando la ecuación dispuesta en la norma UNE-EN ISO 7730, para el cálculo del porcentaje de personas insatisfechas por la asimetría de temperatura radiante por una pared caliente, se obtiene un valor del 7% de usuarios insatisfechos; en este caso el edificio queda categorizado con la clase C por la asimetría radiante.

Para completar el análisis del comportamiento térmico del edificio, se van a exponer los datos respecto del confort de los usuarios durante la jornada laboral en el periodo de estudio. La estimación del voto medio y el porcentaje de personas insatisfechas son los dos valores principales de la norma UNE-EN ISO 7730, ya que también son considerados válidos como método alternativo para la validación de los resultados

según el Reglamento de instalaciones térmicas vigente en España (RITE) (Spanish Government, 2013b). Dicho reglamento habla de valores fijos de temperatura operativa para las estaciones del año, dejando la sensación térmica del usuario por la influencia de la humedad fuera del método de evaluación estándar. Esta parte del trabajo va a mostrar, también, las diferencias que se encuentran entre las diferentes normativas vigentes para la cuantificación y parametrización del bienestar térmico en un edificio.

La exposición de los resultados utiliza los datos obtenidos por los termopares mostrados al inicio de este apartado, en la Figura 49, y los datos ambientales recopilados por la estación meteorológica de AEMET más cercana al edificio. Los datos respecto de la vestimenta se obtienen en función del uniforme de los trabajadores para verano.

En el aula, según se observa en la Figura 62, los valores de PMV y PPD siguen trazas distintas; el valor PMV avanza gradualmente conforme sube la temperatura del aula a lo largo de la mañana; el valor de PPD se desarrolla en función del exponente cuadrado del PMV, por lo que tanto para sensaciones térmicas negativas como positivas, el porcentaje de personas insatisfechas es elevado, mientras disminuye exponencialmente para valores cercanos a 0 del PMV. Respecto de los resultados obtenidos, dadas las altas temperaturas alcanzadas en el exterior esos días, es habitual que en un recinto cerrado las sensaciones térmicas neutras se alcancen durante las primeras horas de la mañana, elevándose posteriormente junto con la temperatura operativa del recinto, y aumentando el porcentaje de personas insatisfechas. En cualquier caso, destacar que en el recinto del aula, los valores de PPD se mantienen por debajo del 20% de personas insatisfechas durante la mitad del tiempo de apertura del centro.

Figura 62. En el aula, valores de PMV y PPD durante las horas de ocupación del edificio

Respecto de los valores alcanzados en la oficina, que se muestran en la Figura 63, se observan diferencias entre los días estudiados. El primer día, lunes 21, la temperatura ambiente es algo más baja que en los días posteriores, lo cual influye en las sensaciones térmicas registradas, pero la apertura de las ventanas y la dirección predominantemente sur del aire son los factores que impiden seguir subiendo la sensación térmica de calor al final de la jornada laboral. La sensación térmica del martes es neutra durante la mitad de la mañana, debida nuevamente a la dirección del aire que contrarresta el aumento de la temperatura ambiente respecto del lunes. El miércoles, día 23 de Julio hay que

recordar que las ventanas permanecen cerradas durante todo el día por lo que, aunque al inicio del día la sensación térmica es mayor que los días anteriores, el índice PPD no alcanza valores mayores al 40% de personas insatisfechas, reflejando la mejor sensación térmica prevista en los anteriores apartados. El jueves, la dirección predominante del aire rola a norte y noroeste, por lo que no coincide con la orientación de las aberturas y la sensación térmica interior se ve influenciada únicamente por la temperatura operativa y la temperatura ambiente, ascendiendo hasta valores casi extremos al final de la jornada laboral. El viernes el viento vuelve a rolar y coincidir con la orientación de las ventanas, por lo que la sensación térmica se ve atenuada cuando éste sopla en la dirección sur; aun así, la temperatura exterior es más elevada que en días anteriores y los índices PMV y PPD vuelven a alcanzar valores muy elevados.

Figura 63. En la oficina, valores de PMV y PPD durante las horas de ocupación del edificio

4.2.1.5. *Análisis del índice de confort según el modelo adaptativo, durante la estación de verano*

Por último, el método adaptativo, usado como procedimiento alternativo en la normativa americana, es el que mejor se ajusta al edificio que se está estudiando. El uso discontinuo del edificio y la ventilación natural como estrategia primaria para la reducción de la temperatura interior en verano, unido con la adaptación de los uniformes empleados por los trabajadores, indican que se trata de un buen ejemplo para probar la adopción de la normativa americana en España.

Aplicando el modelo adaptativo, definido por Brager y de Dear se obtiene la temperatura operativa óptima para cada recinto. Posteriormente, en este estudio se le ha aplicado una banda de 5°C, de forma que el 90% de las personas ocupantes se encuentren a gusto en el recinto.

En la Figura 64 se muestra la banda de temperaturas entre la que la mayoría (90%) de ocupantes se sentiría confortable en el aula del edificio. A pesar de las altas temperaturas reinantes durante esos días, es de destacar que la mayoría de horas en las que el edificio se encuentra abierto, las temperaturas alcanzadas en su interior, quedan dentro de la banda propuesta.

Figura 64. Modelo adaptativo aplicado al aula del edificio, durante los días en estudio

En el caso de la aplicación del modelo adaptativo a la oficina, mostrado en la Figura 65, la temperatura operativa del recinto queda dentro de los márgenes establecidos por el modelo la mayoría del tiempo.

Figura 65. Modelo adaptativo aplicado a la oficina del edificio, durante los días en estudio

El modelo adaptativo define un procedimiento completamente nuevo para la adecuación de la temperatura interior de un recinto. Si bien, en estos momentos, no es esperable que se pueda aplicar a medio plazo en España, en los Estados Unidos de América sí lo es; por lo que no se puede descartar su uso en el futuro.

4.2.1.6. Comparación de los procedimientos empleados para la determinación del confort térmico durante la estación de verano

Los destacable en el caso del modelo adaptativo es la aceptación de muchos resultados obtenidos en nuestro edificio que no hubieran sido considerados válidos con el reglamento actual de nuestro país (RITE). También es destacable que ni siquiera entre los procedimientos habilitados en España se produce una uniformidad en los resultados

obtenidos, ya que la diferencia de horas con resultados aceptables para ambos métodos es considerablemente diferente, como se puede ver en la Figura 66, especialmente en el aula.

Figura 66. En porcentaje, número de horas de apertura del edificio con resultados dentro de los límites establecidos para cada procedimiento

El estudio realizado durante el verano en el edificio muestra ciertos problemas de sobrecalentamiento, que no llegan en ningún caso a los valores extremos de temperatura que se han mostrado en otras investigaciones recopiladas, para nuestra región climática. Tal y como sugerían algunos de ellos, la influencia del alero del edificio se antoja fundamental para conseguir rebajar los valores de temperatura del interior del edificio, dejando la función de las cortinas como medida para evitar el deslumbramiento. La estrategia de ventilación natural llevada a cabo por los trabajadores tiene una influencia suprema para el comportamiento final del edificio, tanto para lo bueno como para lo malo; aunque su apertura matutina baja rápidamente los problemas de sobrecalentamiento nocturnos, la prolongación de su acción a lo largo de la mañana provoca el efecto contrario; por lo que se considera óptimo el cierre de las ventanas cuando la temperatura externa alcance la temperatura de confort interior que se desea conseguir.

4.2.1.7. *Análisis del comportamiento térmico durante la estación de invierno*

El mismo análisis que se realizó durante el verano, fue llevado a cabo durante el siguiente invierno, entre el 21 de enero y el 11 de febrero de 2015.

En el lateral orientado hacia el Sur y abierto con un ventanal se encuentran las mismas cortinas dobles en forma de saco, preparadas para alojar aislamiento y reducir la pérdida de energía térmica del edificio.

Ya se observó en el estudio anterior la poca influencia de las cortinas y se predijo que su uso se vería más justificado en invierno, por lo que en esta parte del estudio el análisis se centra en el papel que juegan las cortinas en los resultados obtenidos.

Se han de tener en cuenta diferentes cuestiones para analizar los resultados:

- Existen dos recintos contiguos, a un lado el aula que se encuentra en uso y con cortinas dispuestas. Al lado la oficina, sin uso en invierno y sin cortinas, por lo que sus cargas internas son diferentes.
- Los periodos no laborables se equiparan las condiciones, ya que sin cargas internas los resultados se pueden comparar de forma directa.
- Las cortinas descritas están configuradas en forma de saco para alojar aislamiento, por lo que se añade esta variable analizando el comportamiento térmico de las cortinas, con y sin aislamiento.

Como premisa para la colocación de aislamiento en cortinas, se experimenta con varios tipos de aislamiento en laboratorio para analizar su adaptabilidad a las cortinas encontradas. Como ya se ha visto en el apartado correspondiente las variables de espesor y peso nos hacen optar por un aislamiento multicapa reflectante Axton Duo, compuesto por dos capas de aluminio y una capa intermedia de lana de roca.

Las cortinas del edificio disponen de dos tejidos textiles que forman un hueco intermedio donde alojar el aislamiento, también se previó su fijación poniendo cintas de velcro por su parte superior, por lo que basta recortar aislamiento con las mismas medidas que cada uno de los paneles en que se dividen las cortinas y colocarlo entre ambas caras de la cortina textil (Figura 67).

Figura 67. Colocación de aislamiento por la parte intermedia de las cortinas

El resultado que se observa a priori es que las cortinas soportan perfectamente el aislamiento colocado por su peso y no destacan por grosor, la única cuestión que se percibe desde el exterior es que las cortinas bloquean el paso de la luz a través de ellas (Figura 68).

Figura 68. Diferencias visibles entre cortinas con y sin aislamiento

La metodología de toma de datos es similar a la utilizada en el citado anterior estudio. Se escogen puntos de referencia en ambas estancias donde se colocan sensores de temperatura; además, en este estudio se incorpora un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad de aire. Por tanto se realiza una rejilla de puntos en ambas estancias, que se van a emplear del mismo modo que en el estudio de verano, por lo que cada fase del estudio hará uso de un determinado número de los sensores colocados en los recintos. Entre las cortinas y las ventanas del aula se coloca un anemómetro de hilo caliente para observar el comportamiento del aire en esa región y evaluar la convección del aire a lo largo del periodo de estudio.

Todos estos puntos disponen de sensores termopar k (Figura 69) conectados a unos data-logger tipo OPUS 200 y OPUS 208 de recogida de datos, al igual que el anemómetro de hilo caliente (Figura 70) y el intervalo de registro de datos se fija en un minuto tomando la media de los datos tomados cada 10 segundos por el data-logger. La recogida de datos sobre la climatología se hace por la estación meteorológica más cercana, junto con la estación meteorológica del IES-UPM. El posterior tratamiento de los datos hará que cada estudio tenga su intervalo de muestreo en las figuras y en su posterior análisis.

Figura 69. Disposición de termopares k durante el periodo de estudio en: Izqda.) Oficina y Dcha.) Aula.

Figura 70. Disposición de anemómetro de hilo caliente para medir velocidad de aire en sentido vertical, en el aula.

Debido a la variable del aislamiento en las cortinas, incorporada a esta fase del estudio, la campaña de monitorización se realizó durante varias semanas. El objetivo era poder

establecer un periodo mínimo de tiempo de monitorización para cada situación, lo que unido a la inestabilidad climática propia del invierno, alargó la campaña. Una buena base de comparación sobre ambos estados se antojaba fundamental para observar la influencia de las cortinas con el aislamiento elegido.

Un primer análisis de las temperaturas del aire en ambos recintos se llevó a cabo teniendo en cuenta únicamente los sensores ubicados junto a la partición interior que separa ambos recintos (Figura 71), por la fiabilidad para reflejar la temperatura del aire que mostraron en el estudio previo a las campañas de monitorización. En el invernadero, el termopar se sitúa nuevamente en la cara interior del pie derecho de madera, para evitar la radiación solar directa sobre él.

Figura 71. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m)

La primera parte de la campaña se realizó entre los días 21 y 26 de enero, mostrándose en la Figura 72 únicamente los días completos de monitorización. Se tiene especial interés en comprobar posibles diferencias de temperaturas entre ambos recintos debidas a las cortinas del aula, por lo que éstas permanecen cerradas casi todo el periodo, salvo durante las horas de trabajo. El clima exterior es completamente soleado y con temperaturas típicas de la estación, de forma que el espacio invernadero muestra su verdadero potencial como espacio almacenador de energía térmica para el edificio. Las temperaturas interiores del invernadero superan los 40°C de temperatura máxima todos los días, incluso superando los 50°C uno de ellos.

Figura 72. Monitorización del módulo estudiado en invierno, periodo con las cortinas del aula sin aislamiento

Esta es una de las primeras sorpresas del edificio, ya que superan con holgura las temperaturas máximas alcanzadas durante el verano. En los estudios previos acerca de los espacios invernadero se comentaba la problemática del sobrecalentamiento en la época veraniega, pero la configuración constructiva del edificio hace que se alcancen similares temperaturas en ambas estaciones. Las temperaturas interiores también son elevadas, alcanzando los 30°C casi todos los días y rozando los 15°C de temperatura mínima, por lo que el edificio muestra innecesaria la acción de la calefacción durante los días soleados, aunque la temperatura exterior varíe entre temperaturas de valores negativos y poco más de 10°C de temperatura máxima.

La poca estanqueidad del edificio queda patente en la propia figura, ya que la temperatura del invernadero sigue la tendencia de la radiación solar, tanto para alcanzar valores extremos de temperatura como para bajar 40°C en pocas horas, hasta llegar a los 10°C desde la puesta del sol hasta la mañana siguiente. Pero funciona perfectamente como espacio almacenador de calor durante el día y como amortiguador del frío ambiente durante la noche; la temperatura interior se mueve entre los 20°C y los 30°C.

Durante el siguiente periodo de monitorización, en el que las cortinas disponían de aislamiento en su interior, la campaña se alargó debido a la climatología cambiante. Las temperaturas alcanzadas en el invernadero vuelven a mostrarse extremas durante los días soleados; sin embargo, los días nublados el invernadero se sitúa a una temperatura intermedia entre el ambiente y la de los recintos interiores. En el caso de los recintos interiores, idéntica situación a la campaña previa sin aislamiento, la temperatura oscila entre los 15 y los 30°C. Durante los días nublados, la temperatura interior se comporta de forma estable y sostenida, lo que pone de manifiesto la actuación de la calefacción por suelo radiante de la que dispone el edificio. Nuevamente, los grandes saltos de temperatura y la alta correlación de la temperatura con la radiación, expone la falta de estanqueidad en el edificio.

Figura 73. Monitorización del módulo estudiado en invierno, periodo con las cortinas del aula con aislamiento

La diferencia entre las temperaturas del aula y de la oficina son similares a lo largo de todo el periodo en estudio; ya durante el verano se vio que la oficina sostenía una temperatura algo más alta que el aula, cuestión que se mantiene según lo mostrado en la Figura 74. La oficina muestra una mayor pendiente de crecimiento de temperaturas a lo largo de la mañana, hasta alcanzar una temperatura máxima 3°C mayor que en el aula; este comportamiento se repite los días laborables, cuando las cortinas del aula permanecieron abiertas por la mañana, y los días festivos, en los cuales las cortinas estuvieron todo el día cerradas. Ahora bien, el efecto de las cortinas también debería servir para amortiguar la caída de la temperatura durante el periodo nocturno, característica no observada durante los días estudiados y que es achacado a las infiltraciones de aire exterior a los recintos, ya que las temperaturas de aula y oficina bajan hasta situarse en torno a los 15°C al comenzar la mañana.

Figura 74. En invierno, condiciones térmicas de los recintos estudiados, las cortinas del aula sin aislamiento

Durante el siguiente periodo estudiado, la influencia de la colocación de aislamiento en las cortinas sí que debería determinar un mejor comportamiento térmico, que disminuya la transferencia de calor hacia el invernadero; pero según la Figura 75 las temperaturas, tras caer el sol, tienden a igualarse entre ambos recintos, por lo que no queda demostrada la influencia de las cortinas con aislamiento en la obtención de mejores

resultados. Las temperaturas máximas sí que son claramente diferentes en ambos, ya que durante la mayor parte del periodo de estudio, la temperatura máxima en la oficina vuelve a ser mayor. Los días nublados de este periodo se ven con más detalle en esta figura, manifestando la acción de la calefacción, ya comentada.

Figura 75. En invierno, condiciones térmicas de los recintos estudiados, las cortinas del aula con aislamiento

La temperatura interior del recinto del aula tiene unos fuertes saltos al final de la jornada laboral, lo que lleva a estudiar qué produce este efecto en el aula. Centrando el estudio en la zona acristalada de ambos recintos, se van a comparar los resultados de temperatura obtenidos por los termopares colocados en la cara interior de las carpinterías de madera, puestos a media altura (Figura 76). También se muestra el termopar colocado a esa misma altura en el invernadero común a los recintos. Debido a la climatología encontrada durante los periodos en estudio, se van a comparar entre sí dos días de cada fase –cortinas con o sin aislamiento- de similares características; en este caso días completamente soleados y con temperatura exterior similar.

Figura 76. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m)

Comenzando por los días de estudio dentro del periodo en el que las cortinas están sin aislamiento, se hace visible la diferencia de temperatura entre ambos recintos, ya que en la región acristalada del aula se alcanzan temperaturas mayores a las de la oficina. Estas diferencias se atribuyen fundamentalmente a las cortinas, ya que la temperatura media del aire en el recinto no se corresponde con estos valores de temperatura. Separando el análisis se comienza por el día laborable, viernes 23 de enero de 2015 (Figura 77).

Figura 77. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 23 de enero de 2015

El análisis de la figura anterior distingue periodos muy claros en cuanto a su comportamiento interior. Los termopares, colocados en la misma situación relativa pero en dos recintos diferentes, obtienen datos de temperatura absolutamente diferentes; el termopar situado en la oficina sigue una evolución de temperatura sinusoidal continua a lo largo del día, desde que comienza a impactar el sol hasta que se pone. Sin embargo, el termopar colocado en el aula distingue dos fases diferenciadas a lo largo del día; las cortinas del aula se abren al principio de la jornada para permitir el paso del sol y su evolución es similar al de la oficina; pero en el momento en que termina la actividad en el aula y se cierran las cortinas, la radiación solar se ve bloqueada por ellas y se alcanzan valores mucho mayores con un salto inmediato en la temperatura al ser cerradas. En cuanto a la temperatura en el invernadero, se observa entre las 14 horas y las 15 horas cómo, por labores de mantenimiento en el invernadero se abren sus ventanas y la temperatura interior cae bruscamente más de 5°C. La temperatura recupera la tendencia anterior en cuanto se cierran las ventanas del invernadero. A éste se accede por la oficina, pero en su apertura de ventanas no se percibe ninguna influencia en su temperatura.

El mismo análisis durante el día posterior también arroja datos significativos, el aula no tiene uso y tiene las cortinas cerradas todo el día; como consecuencia de las cortinas la temperatura durante el día aumenta de forma mucho más acusada que en el caso de la oficina anexa, que no dispone de cortinas y donde la temperatura tiene una evolución mucho más sostenida, no alcanzándose temperaturas tan altas en el interior del recinto (Figura 78).

Figura 78. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 24 de enero de 2015

Una vez analizados los datos recogidos cuando las cortinas no tienen aislamiento insertado, pasamos a observar el comportamiento térmico de los recintos en el periodo de estudio en el que se coloca aislamiento. El primer día en estudio es una jornada laboral en la que el aula ha tenido uso docente en horario matinal y se han abierto las cortinas durante la jornada (Figura 79).

Figura 79. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 5 de febrero de 2015

El comportamiento de las temperaturas seguido durante este día es análogo al correspondiente al día 23 de enero (Figura 77); mientras que el aula se encuentra en uso, las cortinas permanecen abiertas y las temperaturas en ambos recintos son similares, aunque las cargas internas sean mucho mayores en uno que en otro. Al cerrar las cortinas se produce el mismo ascenso repentino de las temperaturas en la zona de las ventanas, ya que bloquean la radiación solar impidiendo que llegue a la zona central del aula.

El mismo análisis durante el día festivo arroja datos similares a lo ya comentado; al permanecer las cortinas cerradas durante todo el día, la temperatura obtenida en el aula alcanza temperaturas mucho mayores que en la oficina (Figura 80).

Figura 80. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 1 de febrero de 2015

Por tanto se observa una clara influencia de las cortinas en cuanto a las temperaturas alcanzadas en la zona acristalada, siendo mucho mayores que las de la oficina anexa por el hecho de cerrar las cortinas. Sin poder determinar la influencia del aislamiento

colocado, ya que el comportamiento es similar en ambos periodos de estudio. Lo que sí se puede observar es que la zona entre la carpintería y las cortinas se convierte en una especie de cámara de aire, puesto que esta gran diferencia de temperatura no se traslada al centro del aula.

Indicar que el aumento de la temperatura de forma brusca al cerrar las cortinas no se traduce en un aumento de la temperatura del aula. Las infiltraciones en los recintos provocan que su temperatura caiga hasta 5°C por hora; esto lleva a analizar como variable en la simulación numérica del edificio cuál sería su comportamiento con una menor tasa de renovación de aire, por la mejora de las infiltraciones a través de su carpintería.

4.2.1.8. *Análisis del flujo de aire debido a las cortinas durante la estación de invierno*

Adicionalmente, se dispone un anemómetro de hilo caliente para medir la velocidad en vertical de la convección creada en la zona de ventanas (Figura 81). Cuando las cortinas se encuentran cerradas, definen un recinto vertical entre la carpintería y las cortinas de 10 cm de anchura; ancho excesivo para la creación de un lazo convectivo según la literatura consultada y a partir del cual se presentan problemas de estratificación del aire.

Figura 81. Ubicación, en plano y en la realidad, del anemómetro de hilo caliente usado en el análisis

El objetivo inicial es encontrar si el funcionamiento es convectivo o se produce flotabilidad, como en el resto del aula. También, saber si existen diferencias entre el hecho de que las cortinas lleven un aislamiento sólido en su interior o no. Se usan para esta parte del estudio los mismos días que se han estudiado previamente.

En la Figura 82 y la Figura 83 se muestran comportamientos similares; las figuras resultantes del análisis durante los días festivos -24 enero y 1 febrero- alcanzan valores similares que las figuras de los días laborables -23 enero y 5 febrero-. El hecho de que durante los días laborables, las cortinas se encontrasen abiertas de 8 a 16 h, debería mostrar un comportamiento diferente que en los días festivos, cuando estaban cerradas, por lo que al no apreciarse, se descarta su funcionamiento convectivo de forma aislada

respecto del resto del aula. La única diferencia entre las figuras se debe a la apertura de las ventanas del aula al comienzo de la jornada laboral el día 23 de enero, debida a labores de mantenimiento y riego de las plantas del invernadero.

Figura 82. Velocidad vertical del aire, registradas los días: a) 23 de enero y b) 24 de enero. Período de estudio: Sin aislamiento

Figura 83. Velocidad vertical del aire, registradas los días: a) 1 de febrero y b) 5 de febrero. Período de estudio: Con aislamiento

Lo que sí se observa es un comportamiento estable durante el periodo nocturno, de entre 0.3 m/s y 0.5 m/s, debido al flujo de convección por flotabilidad. Durante el periodo nocturno, el invernadero alcanza valores de hasta 5°C menos que la zona de cortinas, donde a su vez hay 2°C ó 3°C menos que en la temperatura del aire del aula. Son estas diferencias entre las condiciones de frontera laterales quienes generan el movimiento por diferencia de densidad, en sentido ascendente. También es destacable que, durante el día, la velocidad aumenta hasta casi 1 m/s, magnitud muy elevada debida a la diferencia de 20°C entre la temperatura del invernadero y la del aula. De forma gráfica, mediante un estudio de la asimetría vertical de temperatura en la zona acristala se ven

de mejor manera los saltos en los valores de temperatura que originan esa convección vertical.

4.2.1.9. *Análisis de la influencia de las cortinas durante la estación de invierno*

Al igual que en la campaña de verano, en invierno se consideraron para este estudio, de entre la totalidad dispuesta, los siguientes termopares: T1 es la denominación para el punto de colocación del sensor en el pie derecho del invernadero, T2 es la posición en la carpintería de madera del aula, T3 es la posición por la cara interior de la cortina del aula y T10 es la posición en la carpintería de la oficina, estando las posiciones T2, T3 y T10 compuestas por tres termopares a tres alturas diferentes (suelo, intermedia y techo) (Figura 84). Los sensores que miden la temperatura del aire en los recintos se usarán posteriormente para hallar la asimetría radiante horizontal.

Figura 84. Plano y sección del edificio, con la ubicación de los sensores colocados para este análisis (igual al de la campaña de verano)

Visto el comportamiento similar durante ambas campañas, nos centramos en el análisis durante dos de los días escogidos previamente –días 23 y 24 de enero de 2015- (Figura 85).

Al amanecer, la temperatura es bastante baja ambos días y la mezcla de aire durante toda la noche anterior ha provocado que la temperatura en diferentes planos no sea muy distinta. Al avanzar la mañana, la temperatura exterior del invernadero sube más de 20°C en 4 horas, y la consecuencia de tener la cortina cerrada durante el segundo día es que la temperatura en la zona del acristalamiento sube de forma proporcional.

La acción del alero de la cubierta provoca que no toda la superficie de las cortinas y los cristales estén soleados, por lo que los registros de temperatura recogidos muestran un comportamiento anómalo en el aire, al encontrarse la zona intermedia a mucha mayor temperatura que el aire de la zona superior de los recintos.

Este comportamiento es mucho más acusado conforme avanza el día, provocando a las 16 horas una asimetría vertical de temperatura de más de 10°C. Las últimas figuras de cada día, tomadas después de la puesta del sol muestran una vuelta a la normalidad del

aire del interior del recinto, cuando la asimetría vertical de temperatura es casi imperceptible en comparación con la registrada sólo 4 horas antes.

Figura 85. Valores de temperatura en el invernadero y en la zona acristalada de los recintos aula y oficina, cortina sin aislamiento

4.2.1.10. *Análisis de los índices de confort establecidos por la norma UNE EN-ISO 7730 durante la estación de invierno*

Según el procedimiento de cálculo expuesto en la campaña de verano para calcular el índice PD, la totalidad de las personas que ocupasen regiones cercanas a las cortinas cerradas se sentirían insatisfechas. Sin embargo, al igual que en el verano, sólo un 5% de personas se sentirían insatisfechas si las cortinas estuviesen abiertas. La presencia de las cortinas corridas acumula la recepción de la radiación solar sobre un volumen muy pequeño de aire, por lo que se calienta enormemente esa zona. La radiación solar no pasa hacia el suelo y el comportamiento térmico del resto del aula no es el mismo que en la zona cercana a las cortinas.

Esta diferencia de temperatura entre ambas regiones del aula se estudió en base a los datos recogidos por todos los termopares que se dispusieron durante la campaña de monitorización invernal. A una altura intermedia de 1,7m sobre el nivel del suelo se colocaron termopares en diferentes posiciones del aula y de la oficina. La variable a

estudiar en este caso es la gran diferencia de temperatura que se encontró entre puntos de medición separados entre sí no más de 3 m (Figura 86).

Figura 86. Disposición de los termopares para la elaboración del mapa de temperatura en los recintos

Con los datos de los termopares, se tomaron varias imágenes a lo largo del día durante los días detallados previamente, dentro del periodo de monitorización -23 y 24 de enero y 1 y 5 de febrero-. Además de resaltar nuevamente los grandes cambios de temperatura a lo largo de los dos días, la Figura 87 también nos muestra algunas cuestiones que no se habían visto hasta ahora. A medio día, el aula se encuentra con una diferencia de temperatura de 3°C entre la zona acristalada y la trasera, pero en el caso del segundo día, con las cortinas cerradas, la diferencia de temperatura es mucho mayor. Como se ha dicho, el aumento de temperatura se concentra en la zona acristalada y no pasa hacia el interior. Esto provoca que el aire y el suelo de la región trasera del aula no se calienten a lo largo del día, y la temperatura registrada es 4°C menor que el día anterior. La capacidad de almacenamiento de energía del suelo se pone de manifiesto, mostrando que la temperatura del aire se ve afectada por la diferencia de la energía térmica captada por el suelo. Además, debido a las infiltraciones de aire entre el aula y la oficina, hace que el aire también se comporte de distinta manera en el recinto anexo. En cualquier caso, la diferencia de 4°C entre dos días consecutivos es debida únicamente a la acción de las cortinas, los recintos estaban sin calefacción, no fueron ocupados el viernes, las ventanas y puertas no se abrieron y la única diferencia fue que el viernes se abrieron las cortinas durante las horas de trabajo.

Figura 87. Valores de temperatura a una altura de 1,5 m, con cortinas abiertas por la mañana el día 23, y cerradas todo el día 24

Mismo resultado se observa durante el periodo en el que las cortinas llevaban aislamiento (Figura 88), la temperatura interior del aula es más elevada y con menos diferencia entre las diferentes regiones del aula el día en que las cortinas se abrieron por la mañana.

Figura 88. Valores de temperatura a una altura de 1,5 m, con cortinas cerradas todo el día 1, y abiertas por la mañana el día 5

Antes de continuar con el análisis del confort térmico, puntualizar un detalle mostrado en ambas figuras, la temperatura interior del aula es mayor en la zona trasera que en la zona intermedia. Esto es debido a dos acciones conjuntas, por un lado recordar que el edificio se encuentra semienterrado en la orientación norte y que la temperatura superficial del muro de tierra es casi constante a lo largo de todo el día. Por la noche, la radiación del muro es suficiente para que la temperatura en esa zona sea 0,5°C mayor que en la zona intermedia del aula. Por el día se complementa con el detalle que se quería comentar; el arquitecto dispuso un ventanal en la zona trasera del aula para

permitir la entrada de luz y evitar el efecto cueva en el recinto, y lo pintó de blanco para aumentar la emisividad de esa superficie (Figura 89). Esta segunda razón influye, además de en la iluminación, en la temperatura radiante de esa zona posterior del aula, por lo que la temperatura cuenta con un segundo foco para la recepción de radiación solar directa en el recinto.

Figura 89. Vista exterior e interior del tragaluz abierto en la parte posterior del aula

Por tanto, la sensación térmica que se siente en el aula es completamente diferente según si las cortinas se encuentran cerradas o abiertas. Durante los días soleados de invierno, cerrar las cortinas para evitar el deslumbramiento provoca un índice PD (según norma UNE-EN ISO 7730) cercano al 100%. Realizando el mismo análisis para los días soleados durante los que se abrieron las cortinas, la diferencia de temperatura de entre 3°C y 4°C, lo que se traduce en un 7%-10% de personas insatisfechas. En la idea continuada de que el edificio se utilice como espacio de investigación, se propone realizar un estudio lumínico de los recintos, y realizar una prueba con distintos tipos de cortinas.

Pero continuando con la parametrización de la sensación térmica de los recintos, se procede a realizar un análisis de los índices PMV y PPD (descritos por la norma UNE-EN ISO 7730). Además, y de la misma manera que se realizó en el análisis durante el verano, se va analizar en función del modelo adaptativo. Comparando los resultados durante las horas de apertura de los resultados obtenidos por el procedimiento RITE, UNE-EN ISO 7730 y ASHRAE 55.

Como cabía esperar, para los días soleados de invierno, la sensación térmica torna de valores negativos de PMV por el frío exterior a valores cálidos con la llegada de la radiación solar al edificio. El crecimiento mostrado en las Figura 90 y Figura 91 es lineal a lo largo de las mañanas, siendo las horas centrales del día las que muestran sensación térmica neutra y corresponden con un menor porcentaje de usuarios insatisfechos, según el índice PPD, que se correlaciona con una parábola.

Figura 90. En el aula, valores de PMV y PPD durante las horas de jornada laboral, para los días en estudio

Figura 91. En la oficina, valores de PMV y PPD durante las horas de jornada laboral, para los días en estudio

De entre los cuatro días estudiados en detalle, destaca la forma no lineal correspondiente al día 1 de febrero. Ese día, el sol se nubló hacia las 14 horas, por lo que la radiación solar global pasó de 1000 W/m^2 a menos de 100 W/m^2 . La temperatura interior del edificio bajó 3°C en un intervalo de una hora y la sensación térmica cayó en casi un punto de valoración, según el índice PMV. El día 5 de febrero, ocurrió algo parecido, sólo que la nubosidad fue parcial, cayendo hasta los 600 W/m^2 y no afectando tan acusadamente al interior del edificio.

4.2.1.11. *Análisis del índice de confort según el modelo adaptativo, durante la estación de invierno*

Un análisis de los periodos de ocupación del edificio, utilizando el modelo adaptativo expresado por Brager y de Dear, muestra que la banda de confort térmico se comporta de forma casi estática a lo largo del día. La baja temperatura ambiente durante los días estudiados hace que sea la constante de la fórmula empleada la que indique cuál es el punto medio de la banda de 5°C , por la que un 90% de personas presentes en el recinto se encuentran satisfechas. Las Figura 92 y Figura 93 muestran los resultados para los días estudiados, durante la jornada laboral –entre las 8 horas y las 16 horas-. Debido a la influencia de la baja temperatura exterior y a la alta radiación solar durante esos días, sólo la mitad del día se encuentran valores de temperatura en los recintos dentro de la banda de confort del modelo adaptativo

Figura 92. Modelo adaptativo aplicado al aula del edificio, durante los días escogidos

Figura 93. Modelo adaptativo aplicado a la oficina del edificio, durante los días escogidos

4.2.1.12. Comparación de los procedimientos empleados para la determinación del confort térmico durante la estación de invierno

Realizando una comparativa entre los tres procedimientos de diseño y caracterización térmica de un edificio, se observan resultados similares a los obtenidos durante la campaña de verano. Los procedimientos descritos por la normativa española (RITE) tienen una diferencia en torno al 10%-20% respecto de las horas en las que se cumplen las condiciones interiores de diseño descritas, para cada procedimiento. Aun así, el error es menor que en la campaña de verano, donde la diferencia entre ambos llegaba al 40%, para el caso del aula. El modelo adaptativo vuelve a destacar por el porcentaje de horas durante las que se obtienen buenas condiciones de habitabilidad, aunque no de forma tan clara como en la anterior campaña.

Figura 94. En porcentaje, número de horas de apertura del edificio con resultados dentro de los límites, para los días estudiados

Los días soleados suponen un carrusel en la sensación térmica que se percibe en el edificio. Sin embargo, los días no soleados no son destacables para el estudio del comportamiento del edificio ya que la temperatura interior es sostenida a lo largo del día por la calefacción, por lo que no se alcanzan valores extremos en la sensación térmica. Por tanto, lo más destacable de la eficiencia energética del edificio es que la calefacción no es necesaria durante los días soleados, alcanzándose temperaturas cálidas en el interior independientemente de la temperatura exterior. Debido a las condiciones climáticas de nuestro país, es notorio el ahorro que se puede alcanzar por el hecho de diseñar el edificio con una orientación adecuada. Ésta será una de las variables a estudiar en el modelo comparativo realizado por simulación numérica, objeto de estudio en el siguiente capítulo.

Debido a la complejidad del módulo en estudio y a la coexistencia de diferentes estrategias pasivas para el confort térmico del edificio, este análisis se ha realizado según el resultado conjunto de todas ellas. Pero en el capítulo de simulación numérica se optará por la discretización de estas variables en varias simulaciones, que permitan la parametrización y cuantificación de la influencia de cada una de ellas en el comportamiento del edificio. El espacio invernadero, el alero de la cubierta y las cortinas serán exploradas como un único elemento influenciado en los resultados, modificando mínimamente el edificio para su estudio.

4.2.2. Cubierta vegetal

El sistema constructivo de la cubierta vegetal sí que pudo ser estudiado por separado del resto de estrategias pasivas. Aunque no se duda de su influencia en las particularidades térmicas que ocurren en el edificio, se va a estudiar según el comportamiento que se produce superficialmente en su cobertura, compuesta por terreno vegetal, en función de las estaciones del año de verano y de invierno.

La cubierta vegetal del edificio cuenta con la premisa, al igual que el edificio, de aprovechar las condiciones circundantes en cuanto a orografía, terreno y flora. Este es el motivo por el que la cubierta vegetal no se adapta a las clasificaciones estándar de

cubiertas verdes, si no que emplea la propia tierra extraída para su construcción y el nacimiento de las plantas autóctonas para su cobertura vegetal. Este es el motivo por el que la cubierta se encuentra durante todo el invierno sin hierba en su superficie, y ésta crece al igual que en los campos de alrededor durante la primavera y hasta el otoño. Pierde eficiencia energética para el edificio a costa de mejorar la integración en el hábitat y la reducción de la huella ecológica de todos los materiales empleados.

En la Figura 95 se muestra el estado de las cubiertas, desde el comienzo del crecimiento de plantas durante la primavera hasta el final de su ciclo de vida a finales de otoño

Figura 95. Cubiertas del edificio. A la izquierda, en primavera. A la derecha, en otoño

La cubierta es un elemento constructivo muy importante, tanta que el porcentaje de demanda energética que genera en cualquier edificio es mayor que el de algunas orientaciones de fachada. Es por eso que, cualquier tipo de sistema constructivo empleado en la cubierta, resultará determinante en las condiciones interiores del edificio. Las ventajas conocidas que provoca una cubierta vegetal ya han sido demostradas por el estado actual del conocimiento. En verano, la radiación solar impacta sobre las plantas y evita que la energía térmica se acumule sobre la cubierta, reduciendo el flujo de calor a través de la envolvente. Sin embargo, en épocas frías y lluviosas, la presencia de agua y altas humedades en la tierra provoca un aumento de la conductividad térmica del estrato de tierra de la cubierta.

Este efecto es el que se desea comprobar en las cubiertas del edificio, cómo afecta la presencia de agua al comportamiento térmico de la cubierta. Para ello, la investigación en la cubierta se ha desarrollado en épocas lluviosas de ambas condiciones climáticas. En lugar de realizar la monitorización de las cubiertas en verano e invierno, se llevaron a cabo a finales de primavera y finales de invierno.

En ambos casos, la monitorización se realizó sobre la cubierta del módulo 3 del edificio (Figura 96). Dedicado interiormente a funciones de servicios, vestuarios, sala técnica y una pequeña oficina. La cubierta de ese módulo consta de estructura de madera bajo un panel sándwich con aislamiento, espacio de acumulación de agua con estructura plástica, un fieltro antirraíces y 10 cm de sustrato de tierra con características similares a la del terreno circundante. La sección constructiva de la cubierta se muestra en el anexo A del documento, con la caracterización constructiva del resto del edificio.

Figura 96. Remarcada en diagonal, cubierta monitorizada en el módulo 3 del edificio

Aunque el resto de cubiertas del edificio también cuentan con una cobertura vegetal, el resto han sido reemplazadas y trasplantadas a lo largo del estudio, manteniéndose ésta con un tratamiento natural, sin riego continuado y sin plantas que no hayan surgido de forma natural.

4.2.2.1. *Medidas experimentales durante la época lluviosa de finales de primavera*

La primera campaña de monitorización fue realizada durante la primavera de 2013, entre los días 20 y 30 de mayo. La colocación de sensores de temperatura en la cubierta del módulo fue ideada de manera que se consiguiera un trazado uniforme en la zona central de la misma (Figura 97).

Figura 97. Ubicación de los termopares en la cubierta

Cada uno de los puntos de medición escogidos fueron tratados en dos alturas, uno en la superficie de la tierra y otro en la base del sustrato (Figura 98).

Figura 98. Proceso de colocación de los termopares en la cubierta, a dos alturas

Durante la mayor parte del periodo estudiado las condiciones climáticas fueron óptimas, días de gran insolación y altas temperaturas con la aparición puntual de lluvias que modificaron el comportamiento de la cubierta. De entre todo el periodo en estudio, se escogió una semana de monitorización para su posterior análisis. Para uniformizar el comportamiento térmico sin tener en cuenta el sombreado parcial de determinadas áreas, se obtuvo un valor promedio de la temperatura alcanzada en cada altura de medición de la cubierta (Figura 99). Durante los tres primeros días, las condiciones ambientales fueron totalmente soleadas y similares, gracias a esto se pudo establecer una traza de comportamiento térmico para el periodo cálido de estudio de esta cubierta. Durante el día, la cubierta sigue el comportamiento sinusoidal de la radiación solar directa, alcanzando en su superficie unas temperaturas entre 10°C y 15°C mayores que la temperatura ambiente. La temperatura superficial sube de acuerdo a la radiación solar, alcanzando el valor máximo una hora más tarde que la radiación y decayendo en su temperatura con un desfase de 2 horas respecto de la radiación solar. A partir de ese momento y durante la noche, la cubierta tiene una temperatura superficial similar a la del ambiente.

Respecto de la base del sustrato de tierra, el comportamiento térmico presenta un desfase térmico mucho más elevado. El valor máximo de temperatura tiene un desfase respecto de la radiación solar de 4 horas, y respecto de la temperatura ambiente de 1 hora. Por tanto, se deduce que la influencia de la radiación solar sobre la siguiente capa de la cubierta y el aislamiento está retardada de forma significativa y justifica que las necesidades de refrigeración del edificio se encuentren fuera del periodo de ocupación del mismo. Además, ese punto máximo de temperatura en la base del sustrato también coincide con valores más bajos de temperatura en la cara superficial de la tierra, por lo que la capa de tierra pasa a ser un elemento disipador de calor hacia el ambiente, en lugar de hacia el interior del edificio. La inercia térmica de la tierra provoca de forma continuada este fenómeno hasta el comienzo de la radiación solar al día siguiente, y una diferencia de temperatura entre el exterior y la base de tierra de 8°C. El sentido del flujo térmico en la cubierta vegetal es hacia el exterior a lo largo de 16 horas seguidas.

Figura 99. Valores recogidos durante el periodo en estudio de la cubierta de tierra

Como ya ha sido comentado, los valores de temperatura representados en la figura anterior se han obtenido como valor promedio de todos los puntos de medición empleados. Pero un análisis pormenorizado para cada punto, permite observar variaciones en la temperatura, por diferentes motivos. Por este motivo, se han realizado interpolaciones entre los diferentes puntos para elaborar un mapa de temperaturas en cada altura de medición.

Durante el primer día soleado en estudio (23 de mayo), se tomaron registros puntuales de temperatura a diferentes horas del día (Figura 100). A las 16 horas, momento de máxima temperatura superficial, se observan diferencias de hasta 4°C entre unas zonas y otras. Las regiones de tierra entre los tragaluces acristalados son las que muestran este comportamiento. De sur a norte (en la figura, de abajo a arriba), la parte delantera de la cubierta había recibido radiación de forma uniforme sobre toda la región durante el día, alcanzándose temperaturas muy elevadas. Las zonas de tierra entre los tragaluces muestran que éstos habían protegido de la radiación solar una parte de ellas mientras que, debido al ángulo de reflexión de la luz en los vidrios, la radiación difusa había recaído sobremanera en la otra parte, donde la temperatura muestra valores de hasta 4°C más, en apenas 1 metro de distancia. La zona más al norte, y también más baja según la caída de agua de la cubierta, muestra valores intermedios entre ambos, habían recibido algo menos de sol que la parte más expuesta y sin influencia de los tragaluces, por lo que sus valores son más uniformes. A las 12 de la noche la temperatura superficial de la cubierta aún no es uniforme, aunque en este caso la razón es debida al ángulo de incidencia de la radiación solar durante la tarde. Al ponerse el sol por el oeste, es la zona oeste de la cubierta la que almacena más energía térmica, debido a la radiación ocurrida unas horas antes. A las 8 de la mañana, al comenzar el día, la temperatura superficial de la cubierta sí que es algo más uniforme y la inercia térmica del día anterior ha disminuido su influencia.

Respecto a la base de la capa de la tierra, la inercia térmica y el desfase horario respecto de la radiación hacen que los valores de temperatura sean similares a las 4 de la tarde y a las 12 de la noche, habiéndose producido un máximo de temperatura entre ambos puntos. Como se constata gráficamente, la base de la capa de tierra muestra temperaturas similares a la de la superficie de la cubierta 8 horas más tarde. Del mismo modo, mediante los gráficos isotermos presentados, se demuestra que la mayor parte del día, la temperatura es más elevada en la base que en la superficie de la tierra, demostrando que el flujo térmico es exotérmico hacia el ambiente.

Figura 100. Durante el día 23 de mayo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas

Como se ha explicado previamente, el análisis propuesto también propone observar el comportamiento de la cubierta durante los días lluviosos en épocas cálidas. En esta campaña de monitorización, el único día en el que se pudo realizar un estudio de este tipo se dio el 26 de mayo. En la Figura 101 se advierte el periodo lluvioso que se dio entre las 12 y las 14 horas, si bien la lluvia no fue muy copiosa su consecuencia sí que se denota claramente en el gráfico. Se produce un cambio de tendencia tanto en la radiación solar como en las temperaturas ambiente y superficial de la capa de tierra. Sin embargo, la temperatura en la base de la capa de tierra no se ve influida por los cambios superficiales. En la misma figura, se puede ver cómo unas horas más tarde, durante la siguiente noche, vuelve a producirse un periodo lluvioso, que no se nota en absoluto en un cambio de tendencia en la base del sustrato de tierra, mientras que la temperatura superficial sí que cambia su inclinación. El comportamiento térmico de la cubierta se observa de mejor manera en la Figura 101, durante el periodo de lluvias débiles entre las 12 y las 14 horas, la temperatura superficial se mantiene casi constante, bajando un poco al final del periodo. En la base de la tierra, la temperatura sube de forma sostenida durante estas dos horas, acercándose a los valores registrados en la superficie. Sin embargo, en cuanto el cielo se despeja y la radiación solar vuelve a impactar sobre la

cubierta, los valores superficiales se incrementan iniciando un ascenso de temperatura con la misma tendencia que se da en día completamente soleados. De la misma manera, sin verse afectada, la base de la capa de tierra continúa con su ascenso de temperaturas hasta valores similares a los de días soleados.

Figura 101. Durante el día 26 de mayo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas

En días lluviosos, la temperatura superficial de la tierra sí que disminuye los valores alcanzados respecto de días soleados, mientras que la base de la tierra mantiene el mismo comportamiento térmico que en días anteriores. Como cabía esperar, la resistencia térmica de la capa de tierra disminuye durante los periodos de lluvia en épocas cálidas.

4.2.2.2. *Medidas experimentales durante la época lluviosa al inicio de la primavera*

El mismo procedimiento de monitorización se siguió durante la época lluviosa fría. Entre ambas campañas el calendario sólo dista dos meses, pero los valores de temperatura recogidos en la cubierta varían más de 20°C. Es de esperar que la temperatura ambiente y la temperatura del agua que cae en forma de lluvia influya en un comportamiento diferencial respecto al comentado en el apartado previo.

La monitorización en la cubierta se ejecutó de forma análoga a la explicada en la campaña previa, se escogieron unos puntos de medición en la zona central de la cubierta y, en cada punto de medición de temperatura, se insertaron dos termopares tipo k a dos alturas. La altura de la capa de tierra es de 10 cm y sobre un soporte de madera se dispusieron los dos sensores en cada punto de medición, uno en la superficie y otro en la base de la capa de tierra.

En la campaña explicada en el apartado previo, se ubicaron un total de 12 puntos de medición de temperatura, pero la influencia que ejercen los tragaluces de vidrio sobre

las temperaturas en la región de tierra entre ellos provocaba una variación de temperatura anormal entre puntos de medición muy cercanos. En esta ocasión, se ubicaron un total de 6 puntos de medición, sin disponer sensores de temperatura en la zona entre los tragaluces. La reflexión de los vidrios de los tragaluces aporta energía térmica que no corresponde con la estrategia de la terminación en tierra para la cobertura de una cubierta plana de un edificio. Por tanto, los sensores colocados en esta campaña miden las temperaturas en los puntos extremos de las líneas de medición empleadas en la campaña anterior, donde se observó que el comportamiento térmico de la tierra era uniforme y justificable en función del ángulo directo de incidencia de la radiación solar (Figura 102).

Figura 102. Ubicación de los termopares en la campaña de monitorización

La campaña de monitorización se desarrolló entre los días 11 y 21 de marzo de 2016, tomando los datos de temperatura media cada minuto, para cada sensor puesto en funcionamiento en esta monitorización. Los datos tomados cada minuto han sido recogidos en intervalos de una hora, para mostrar las tendencias de las temperaturas registradas evitando el ruido de las pequeñas variaciones observadas en periodos cortos de tiempo. De este modo, también concuerdan con el periodo de toma de datos de las condiciones ambientales servidas por la estación meteorológica externa.

En la Figura 103 se muestran los valores de temperatura ambiente, radiación solar y precipitación recogidos por la estación meteorológica, y los valores de temperatura en la superficie y en la base de la capa de tierra de la cubierta. Debido a fortuitos cortes de luz, los data-logger empleados no tuvieron alimentación eléctrica desde la tarde del 15 de marzo hasta que fue activada la corriente al comienzo de la jornada laboral del día 16 de marzo. Por esta razón, los datos de la estación meteorológica tampoco han sido representados durante ese intervalo de tiempo.

El clima durante el periodo de estudio tuvo un primer periodo de seis días en los que la radiación solar fue completa o casi completa y las temperaturas ambientales fueron muy similares. Posteriormente, tres días de elevada nubosidad y precipitaciones continuadas durante todo el día 19 de marzo, con intensidad de hasta 5 mm en una hora.

El periodo de estudio se muestra suficiente para analizar la variable de la influencia de la presencia de agua a baja temperatura en una cubierta de tierra.

Durante los días soleados, la figura muestra que la temperatura superficial de la tierra sigue una onda similar a la de la radiación, con un retardo de una hora. A su vez, la temperatura superficial de la tierra alcanza valores máximos de temperatura una hora antes que la temperatura máxima del día. En la base de la capa de tierra, la temperatura máxima se alcanza tres horas más tarde que en la superficie, coincidiendo con el momento en que la temperatura de la superficie comienza a ser más baja que en la base de la capa, por lo que el flujo térmico desprende energía térmica hacia el ambiente, en lugar de hacia el edificio. A partir de ese momento, durante 14 horas continuadas, el flujo térmico se dirige hacia el exterior con una diferencia de 6°C entre la base de la tierra y la superficie.

Figura 103. Valores recogidos durante el periodo en estudio de la cubierta de tierra

Por el contrario, durante el día 19 de marzo, en el cual llueve desde la medianoche hasta la tarde, el comportamiento térmico de la tierra se muestra muy diferente. Anteriormente se ha visto que durante los periodos nocturnos, el flujo es exotérmico hacia el ambiente, sin embargo, mientras cayó la lluvia, los valores de temperatura fueron muy similares entre ambas caras de la capa, con apenas 1°C de diferencia entre ambas. Del mismo modo, en cuanto amaneció y la temperatura ascendió, la temperatura en el exterior volvió a ser mayor que en la base, pero por apenas 2°C de diferencia. Cuando dejó de llover, sobre las 15 horas, la tierra comenzó a secarse gradualmente por efecto de la radiación y las temperaturas volvieron a mostrar tendencias similares a las de los días soleados.

Es de destacar el efecto de la lluvia en la capa de tierra, durante el día lluvioso la temperatura en la superficie resultó 10°C menor que en los días completamente soleados, pero la temperatura en la base de la tierra, a sólo 10 cm de profundidad apenas descendió un par de grados respecto de un día soleado.

De una forma más gráfica, podemos mostrar los resultados anteriores recogiendo los valores de cada punto de medición en sus dos alturas, y posteriormente interpolarlos, para conseguir una representación con líneas isotermas, de las temperaturas recogidas a diferentes horas del día. Ya que durante el periodo nocturno la diferencia de temperaturas entre ambas caras permanece estable, es preferible centrarse en el comportamiento de la cubierta a lo largo del día, desde las 8 de la mañana a las 8 de la noche con intervalos de 4 horas.

En la Figura 104, se muestran las temperaturas recogidas a lo largo de uno de los días soleados del periodo de monitorización, el 12 de marzo. El día comienza con valores casi negativos de temperatura en la superficie, mientras que la temperatura en la cara inferior es de entre 6°C y 8°C, tal y como se ha visto en la figura anterior. La ausencia de radiación desde muchas horas atrás confiere un comportamiento homogéneo entre todos los puntos medidos en cada altura. A mediodía, la temperatura en la superficie se ha incrementado más de 20°C en un intervalo de 4 horas, por el contrario los valores de temperatura recogidos en la cara inferior apenas han sufrido cambios. A mediodía, se observan grandes cambios de temperatura entre unas zonas y otras, debidas al ángulo de incidencia de la radiación solar y la altura de la cubierta, ya que por su caída la esquina inferior izquierda es el punto más elevado de la cubierta.

Figura 104. Durante el día 12 de marzo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas

A media tarde, la temperatura en la superficie ha seguido en su ascenso y homogeneización en los valores recogidos, siendo más elevada la temperatura en la parte más alta de la cubierta y que ha recibido más radiación. Desde mediodía, la temperatura en la superficie ha variado 4°C. En este mismo intervalo, la cara inferior de la tierra ha incrementado su temperatura en 10°C de media, ya que por el desfase en sus temperaturas respecto de la superficie, ha sido en este periodo cuando la energía térmica transmitida por la radiación ha alcanzado la cara interior de la capa de tierra. Cuatro horas más tarde, ya sin radiación solar, la temperatura superficial cayó 20°C desde

media tarde mientras que la temperatura en la base sigue muestra valores similares tras haber alcanzado un máximo a las 6 de la tarde.

Durante el día 19 de marzo, la cubierta mostró valores de temperatura completamente diferentes al patrón seguido durante los días soleados. En la Figura 105 se exponen los mismo intervalo de temperatura tratados en el caso anterior, para poder comparar incluso visualmente las diferencias encontradas entre ambos días. Los días soleados, las diferencias entre la temperatura en ambas caras de la capa de tierra oscilaban abruptamente, siendo mayor en la superficie durante el día y en la cara inferior durante la noche. Por el contrario, durante el periodo lluvioso, las temperaturas en ambas caras de la capa son muy similares, con diferencias de no más de 1°C o 2°C. También destaca su estabilidad, si en el análisis anterior, en periodos de 4 horas los saltos de temperatura eran de hasta 20°C, durante este día la temperatura se incrementó 8°C en un periodo de 8 horas, entre las 8 horas y las 16 horas de este día. Eso sí, en cuanto se acabó el periodo de lluvia, la temperatura en la cubierta volvió a valores similares a los registrados en días anteriores, con diferencias entre ambas caras de ente 6°C y 8°C.

Figura 105. Durante el día 19 de marzo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas

De esta manera, se demuestra que la conductividad del agua modifica sustancialmente la conductividad de la capa de tierra del edificio. Mientras que en periodos secos, las diferencias de temperatura entre sus caras son elevadas, durante el periodo lluvioso las temperaturas son similares entre ambas caras. La presencia de agua en la tierra hace que su resistencia térmica caiga sustancialmente y apenas suponga un freno para la transferencia de calor entre el exterior y el interior. Teniendo en cuenta que este apartado fue considerado para observar la cubierta durante un periodo frío, se mostraba de vital importancia conocer la función de la tierra como elemento superficial de la envolvente del edificio.

Dada su importancia, en el apartado dedicado a la simulación numérica y la cuantificación de la influencia de este sistema constructivo, se simulará el comportamiento térmico del edificio con otros acabados y sistemas constructivos en su cubierta. De esta manera, se desea comprobar las ventajas y desventajas que tiene su utilización respecto de materiales constructivos tradicionales.

4.2.3. Muro Trombe

En este apartado, el elemento constructivo que se va a analizar es el muro Trombe. Un sistema constructivo que fue desarrollado durante este siglo pasado y del que se encuentran muy pocos ejemplos constructivos en uso. Como ya se ha visto en las investigaciones previas a esta tesis, la mayoría de ellas se fundamentan en los resultados obtenidos por ejemplos construidos en celdas de ensayo o por simulaciones numéricas y cálculos energéticos sobre los que teorizar en el comportamiento de este sistema constructivo. Por ello, al encontrarse el ejemplo del muro Trombe en el edificio a estudiar, se hizo un gran hincapié en realizar una campaña de monitorización sobre el mismo.

Dentro del convenio entre el Ayto. de Pozuelo de Alarcón y la UPM, se realizó esta campaña de monitorización junto con otra tesis doctoral que se encuentra en desarrollo en la Escuela Técnica Superior de Edificación. La tesis se focaliza en el desarrollo de sensores e instrumentación de bajo coste, para la monitorización de edificios. Por ello, esta investigación no se ha realizado con termopares tipo k, como hasta ahora. Se ha utilizado un sistema termohigrómetro que se basa en la plataforma Arduino. Para diferenciar el enfoque entre ambas tesis, en ésta se va a hablar de los resultados numéricos obtenidos durante la campaña, y la del compañero se centra en el protocolo de programación, calibración y topología de la instrumentación empleada para realizar la experimentación.

Situado en el tercer módulo del edificio, bajo la cubierta de tierra estudiada en los apartados previos. El muro Trombe construido se compone por un vidrio simple, una cámara de aire con aberturas hacia el interior y una masa térmica (1 pie de ladrillo), que recibe la longitud de onda visible de la radiación solar y la distribuye hacia el interior, tal y como lo concibió Félix Trombe hacia mediados del siglo XX. En el ejemplo construido en este edificio, el vidrio del muro Trombe no se encuentra a la intemperie, si no que fue concebido como partición entre un espacio invernadero dedicado a cuarto técnico y las dependencias interiores, de oficina y vestuarios (Figura 106).

Figura 106. Vista del muro Trombe desde el exterior del edificio

Al no encontrarse al exterior, la masa térmica del muro Trombe sólo recibe un porcentaje de la radiación solar que llega al edificio. El vidrio exterior hace que la radiación recibida por el vidrio del muro Trombe sólo corresponda con la parte que no haya sido reflejada ni absorbida. Por lo tanto, sólo la radiación visible llega al vidrio del muro Trombe, de la que éste deja pasar una gran parte hacia el ladrillo que forma la masa térmica del muro. La radiación solar fuera de la fracción de onda visible -que el vidrio absorbe en gran medida- no llega de forma directa al vidrio del muro Trombe, ya que se ha de transmitir por convección a través del aire encerrado en el cuarto técnico del edificio, y por conducción a través del vidrio del propio muro Trombe.

Como se ve en la figura anterior, el muro Trombe abarca la longitud total del módulo, pero en altura se desarrolla sólo hasta una altura de dos metros. El resto de la superficie del muro no cuenta con vidrio por la cara exterior, además de estar guarnecido y pintado. Dado que el muro Trombe ocupa una posición intermedia respecto de la zona administrativa, se dispusieron dos ventanas que dan luz natural a la oficina del módulo. A lo largo de la extensión del muro Trombe se encuentran seis aberturas de las mismas dimensiones que los ladrillos, tres a una altura de 40 cm y otras tres sobre ellas, a una altura total sobre el suelo de 1,7 metros (Figura 107).

Figura 107. Plano esquemático de la situación de los sensores (cotas en metros)

Siguiendo el esquema empleado en los trabajos anteriores, planteamos un mallado de puntos de medición en los que colocar los termohigrómetros. Sobre la zona central del muro, sin tener en cuenta la zona de ventanas, se colocaron cuatro termohigrómetros,

uno por cada abertura del muro Trombe. Los sensores allí alojados tenían como cometido, monitorizar las condiciones de temperatura y humedad en el muro Trombe, y mostrar el efecto del lazo conductivo que se produce al abrir las aberturas y provocar el movimiento del aire en la cámara, por diferencia de densidad y temperatura. Además, para completar el mapa térmico de la temperatura en la cámara, se ubicaron otros dos puntos de medición en la propia cámara de aire, a las mismas alturas que las aberturas. No se encuentran centrados entre las aberturas por la situación de un pie derecho de madera en el cuarto técnico, que produce sombra sobre el muro Trombe.

La instrumentación empleada no tiene el mismo sistema que el empleado hasta ahora, los sensores requieren de un montaje completo del circuito electrónico, por lo que cada uno de ellos se dispuso sobre una placa de prueba y se conectó con tres cables a la placa de Arduino, alimentación, tierra y señal digital del sensor (Figura 108).

Figura 108. Prototipo del sistema empleado, probado en laboratorio previamente

La placa de Arduino empleada carece de módulo de almacenamiento de datos, por lo que fue conectada a un ordenador que se encargaba de ello durante toda la monitorización.

Debido a la dificultad de ejecución de la monitorización en una cámara de aire, al encontrarse casi cerrada, los sensores fueron ubicados colgándolos con cuerdas entre las aberturas del muro Trombe (Figura 109). Por muy rudimentario que pueda parecer el sistema, los datos fueron recogidos sin ningún fallo durante todo el periodo en estudio.

Figura 109. Ubicación de los termohigrómetros en la cámara de aire del muro Trombe

Como parte de la prueba del sistema utilizado, se tomaron los datos en intervalos de 15 segundos. Con esa base, los datos empleados en el estudio propuesto, fueron tomados en intervalos de una hora. En este apartado se muestran los datos tomados en ese intervalo, coincidiendo con los datos servidos por la monitorización de la estación meteorológica externa. El periodo de monitorización comprende entre el 11 y el 16 de febrero de 2016, aunque para el análisis se emplearon sólo los días completos de monitorización, entre el 12 y el 15 de febrero.

Un primer análisis, mostrado en la Figura 110 indica una fuerte relación entre los datos de temperatura recogidos en los sensores termohigrómetros y la radiación solar global.

Figura 110. Datos tomados durante la campaña de monitorización del muro Trombe, con la radiación solar global como variable física externa

Sin embargo, un análisis comparativo mostrado entre las temperaturas de los sensores y la radiación solar directa muestra una relación aún mayor, como se ve en la Figura 111.

Figura 111. Datos tomados durante la campaña de monitorización del muro Trombe, con la radiación solar directa como variable física externa

Durante los dos primeros días del estudio, la nubosidad en el ambiente no permitía la radiación solar directa sobre el edificio. Este hecho, unido a que la radiación difusa reflejada por las nubes y los edificios circundantes no es emitida en la misma longitud de onda que la originaria del sol, nos indica que la mayor influencia sobre un muro Trombe se produce cuando el día está completamente soleado y la radiación solar llega al edificio de forma directa. Por este hecho, el análisis que se va a efectuar sobre el muro Trombe va a ser ejecutado utilizando los datos de la estación meteorológica con la variable de la radiación solar directa, no con la radiación solar global.

De la figura anterior también se desprende que los valores de temperatura tomados por los sensores son similares, con una desviación máxima de $2,81^{\circ}\text{C}$ entre el dato recogido por un sensor y la media, y una desviación media de $0,16^{\circ}\text{C}$ a lo largo de los días estudiados. Por esto, la figura y los valores que se van a emplear en la primera parte del análisis son los resultados de la temperatura media recogida por cada sensor, como se muestra en la Figura 112.

Figura 112. Temperatura media en la cámara de aire del muro Trombe, con la radiación solar directa y la temperatura ambiente como variables físicas externas

Sobre los resultados mostrados en esta figura se observa que la temperatura exterior muestra variaciones de hasta 6°C durante los dos primeros días mientras que la temperatura interior de la cámara de aire permanece casi estable, con variaciones mínimas de temperatura. Siguiendo con el análisis de la relación entre la temperatura exterior y la de la cámara, el día 15 de febrero la temperatura exterior varía 5°C a lo largo del día mientras que la temperatura en la cámara de aire asciende hasta 10°C . La relación es mucho más fuerte con la radiación solar directa que con la temperatura exterior. Estableciendo una relación lineal simple entre la temperatura media de los sensores y la radiación solar directa, el valor estadístico R-cuadrado indica que el modelo ajustado en base a la radiación directa explica el 73,27% de la variabilidad en la variable dependiente de ella, la temperatura media tomada en los sensores. Por tanto, se puede indicar que, con un coeficiente de correlación de 0,856, existe una relación moderadamente fuerte entre la radiación solar directa y los valores de temperatura obtenidos en el periodo de estudio.

Profundizando en esta cuestión, se van a utilizar datos de temperatura que se emplearán en la monitorización anual general del edificio, que se estaba llevando a cabo al mismo tiempo. La comparación entre los datos recogidos en el cuarto técnico y la temperatura media resulta en una correlación aún más elevada, lo que podría ser lógico teniendo en cuenta que sólo están separados por un vidrio simple, pero lo más interesante es que tampoco en el cuarto técnico se varía la temperatura interior si no existe radiación solar directa (Figura 113).

Figura 113. Temperatura medida en el cuarto técnico, la cámara de aire del muro Trombe y la radiación solar directa, durante los días estudiados

De esta forma, se demuestra que las características de los vidrios en el edificio son las que influyen de forma determinante en las temperaturas alcanzadas en su interior. De igual manera, es la radiación solar directa, y su impacto sobre la superficie masiva del muro Trombe, la que explica las variaciones en la temperatura de la cámara de aire. Efecto que potencia el movimiento de aire por flotabilidad, y el lazo convectivo que se produce entre la cámara de aire del muro Trombe y el recinto del edificio al que le unen las aberturas del muro Trombe.

Por otra parte, queda por cuantificar la influencia que supone la presencia de un muro Trombe en los valores de temperatura recogidos en el espacio adyacente. Para ello, y nuevamente de forma puntual, se van a utilizar los datos, en intervalos horarios, que se tienen del espacio administrativo durante el periodo de estudio. La Figura 114 muestra los valores de temperatura obtenidos en los dos recintos adyacentes al muro Trombe. En esta figura se observa que la relación entre la temperatura del muro Trombe y la del cuarto técnico no es similar con la que tienen con la oficina adyacente. Durante los días soleados, las temperaturas en el cuarto técnico y la cámara de aire suben abruptamente, mientras que la temperatura en el interior se muestra mucho más estable.

Figura 114. Temperatura medida en el cuarto técnico, la cámara de aire del muro Trombe y la oficina adyacente al muro Trombe, durante los días estudiados

Estableciendo una correlación entre los valores de temperatura en los tres recintos, se obtiene que el valor estadístico R-cuadrado entre el cuarto técnico y la cámara de aire es mayor a 0,9. Mientras tanto, el valor estadístico R-cuadrado indica que la temperatura en la cámara de aire explica únicamente el 26,7% de la variabilidad mostrada en los valores de la temperatura de la oficina. Por lo que la influencia de la temperatura de la cámara de aire del muro Trombe con el edificio es muy débil.

La influencia de la presencia de un muro Trombe en este edificio queda supeditada a otros muchos factores que coexisten con él. La presencia de varias estrategias pasivas y los problemas de infiltración demostrados en las campañas previas, hacen que la influencia sea mucho menor de la deseada. No obstante, la presencia de un ejemplo de muro Trombe, construido en un edificio cuyo fin es la educación y la investigación, permite su investigación y la demostración física del funcionamiento y de la influencia de la radiación solar directa sobre el comportamiento térmico del mismo.

Para finalizar el análisis, hasta el momento se ha trabajado con los valores medios de las temperaturas recogidas por todos los sensores. Por esto, queda por llevar a cabo un estudio de la temperatura en cada sensor y observar las diferencias entre ellos. Dado que la radiación solar directa es la que influye en el comportamiento térmico del muro, se va a llevar a cabo durante diferentes horas del día más soleado dentro del periodo en estudio, el 15 de febrero.

La Figura 115 muestra los valores de temperatura en los puntos de medición utilizados, los cuales posteriormente han sido interpolados para obtener una representación de líneas isotermas que representa de forma gráfica la variación de la temperatura sobre una superficie virtual dentro de la cámara de aire. Además, está representado sobre un modelo informático los diferentes ángulos de incidencia de la radiación solar sobre el volumen del módulo en el que se encuentra el muro Trombe.

Figura 115. Comportamiento térmico del muro Trombe a diferentes horas del día 15 de febrero de 2016

En la parte superior aparecen los modelos desarrollados para las primeras horas del día, las 9 horas y las 11 horas de la mañana. El sol amanece por el este y, hasta media mañana la radiación solar no impacta de forma directa sobre la superficie del muro Trombe. Esto se constata por los valores de temperatura representados, ya que en un intervalo de dos horas, la temperatura de la cámara de aire ve incrementada su temperatura en 10°C. En la siguiente imagen, a las 15 horas, el sol impacta frontalmente sobre la fachada del edificio, orientada hacia el sur. La temperatura había subido de media 4°C en este intervalo de tiempo, mucho menos que en el caso anterior. Al final del día, la temperatura en el interior de la cámara de aire había disminuido sensiblemente y se había homogeneizado respecto de los valores obtenidos en las horas anteriores del día.

Es destacable la homogeneidad en las temperaturas encontradas en todos los puntos de medición, siendo incluso superiores en la zona inferior del muro Trombe. Esta cuestión será estudiada en la simulación numérica, apuntando como variable para el posterior análisis a la influencia de la poca estanqueidad y la ocupación del edificio en estos resultados, ya que los valores de temperatura durante el día anterior, que resultó ser festivo, siguen mostrando homogeneidad en los diferentes puntos de medición, pero la temperatura en la parte superior del muro Trombe es levemente superior a la de los puntos situados en la base del muro.

4.3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL EDIFICIO A LO LARGO DE UN AÑO COMPLETO

Después de haber analizado cada una de las estrategias pasivas encontradas en el edificio, una campaña de monitorización anual fue llevada a cabo. La monitorización del módulo del aula resultó interesante y mostró cómo, de forma natural, en un edificio se pueden alcanzar valores de temperatura mayores en invierno que en verano, por lo que poder caracterizar su comportamiento térmico a lo largo de todo el año era necesario para tener una visión completa del edificio.

La monitorización del edificio se efectuó entre el 5 de Junio de 2015 y el 30 de Junio de 2016, tomando datos de temperatura en todos los recintos susceptibles de estar ocupados durante gran parte del tiempo, o por su importancia desde el punto de vista de la investigación. Esto es, fue recogida la temperatura de todos los invernaderos del edificio ya que son los primeros recintos en los que se manifiesta la influencia de las condiciones climáticas exteriores, aunque no estuvieran ocupados. También se monitorizaron los recintos administrativos, el aula y la biblioteca del edificio, ya que es en ellos donde se desarrolla la actividad cotidiana del centro de educación ambiental. Por el contrario, no se monitorizaron los vestuarios, servicios y cocina del edificio, al ser recintos con puntual ocupación y carecer de importancia a la hora de catalogar el edificio según su comportamiento térmico. Por último, el pasillo del edificio también fue monitorizado, en dos puntos de hecho, pero por su ocasional ocupación será empleado para puntualizaciones en los resultados obtenidos en los demás recintos, no por sí mismo. Para entender las oscilaciones de temperatura en el edificio, se obtuvieron datos meteorológicos a lo largo de toda la campaña.

El proceso de monitorización durante más de un año obligó a buscar soluciones idóneas para realizarla sin menoscabar la ocupación y el uso del edificio, lo que conllevó su propio proceso de implantación del sistema de monitorización en el edificio. Por la misma razón, la duración de la monitorización, se encontraron diversas dificultades con la posterior adaptación de la metodología a las condiciones reales del edificio. A pesar de todo ello, una monitorización de un edificio en uso pudo ser realizada durante más de un año, con unos resultados que muestran la singularidad y el ejemplo que supone una construcción de este tipo dentro del encorsetado parque inmobiliario actual.

4.3.1. Implantación del sistema de monitorización en el edificio

En este análisis no se hizo especial hincapié sobre ninguno de los sistemas constructivos, si no que los datos de temperatura recogidos en cada recinto se corresponden con el valor de la temperatura del aire en ese recinto. Hay que tener en cuenta que el edificio se ha encontrado en uso durante toda esta fase de monitorización, por lo que la elección de puntos de medición en el centro de los recintos –como sugiere la normativa- hubiera sido incompatible con la realización de actividades a lo largo de esta campaña. Esta es la razón principal por la que, en la fase previa de esta tesis,

ajustamos el intervalo de tiempo en la toma de datos y fundamentamos la elección de un punto representativo para la medición en una estancia, después de lo cual se concluyó que un sólo punto de medición por recinto representa suficientemente las variaciones térmicas que se presentan en condiciones normales de uso.

Las condiciones climáticas exteriores fueron monitorizadas de diferentes maneras, con hasta tres fuentes diferentes de información. A lo largo de todo el periodo de monitorización se emplearon como bases de datos las estaciones meteorológicas de AEMET más cercanas, en este caso las situadas en Pozuelo de Alarcón y en la ciudad universitaria de Madrid, que distan 5 km de la situación del edificio. También se tomaron datos de la estación meteorológica de la propia UPM, situada en el Instituto de Energía Solar. Además, y para disponer de datos más cercanos se ubicaron un termohigrómetro ambiental y un piranómetro en la propia cubierta del edificio. Entre todos estos sistemas se obtuvieron datos completos de las variables de temperatura, humedad, radiación, pluviometría y dirección y velocidad del viento. Aunque por causas que se explicarán en las incidencias ocurridas a lo largo de la monitorización, algunas de estas fuentes de datos fueron descartadas para su uso en el análisis de la monitorización.

Un total de 10 termopares tipo k se emplearon en esta monitorización del edificio (Figura 116), todos ellos fueron colocados en algún tipo de soporte, en pies derechos de madera o en particiones interiores del edificio (Figura 117).

Figura 116. Ubicación de los sensores de temperatura empleados en la monitorización. Fuente: Elaboración propia

Situados a una altura de 1,7 metros, tal y como sugiere la normativa, sus datos se interpretan como la temperatura media del aire en cada recinto. Los que pueden sufrir la radiación directa del sol se ubican protegidos del mismo, colocándolos en orientaciones sombreadas.

Figura 117. Ubicación de los termopares en las posiciones 1 (izqda.) y 2 (dcha.). Fuente: Elaboración propia

El tratamiento posterior de los datos iguala la temperatura obtenida por ellos con la temperatura radiante media del recinto, y por tanto, con su temperatura operativa. Esta afirmación ya ha sido demostrada en investigaciones previas a esta tesis, y su colocación junto a elementos constructivos ha quedado validada en este mismo documento, al realizar un estudio sobre la elección de un punto representativo para la medición de la temperatura.

4.3.2. Incidencias durante la campaña de monitorización

Como era de esperar, a lo largo de todo un año hubo modificaciones sobre el planeamiento original de la monitorización.

La primera razón fue la utilización del edificio para diversos actos, al tratarse de un edificio público se promueven eventos de pública concurrencia incluso en días festivos. Por esta razón, en la monitorización a lo largo del año se tuvieron que retirar los sistemas para poder celebrar estos actos. La pérdida máxima de datos por esta razón fue de una semana, y la pérdida total de datos no excede de un 10% respecto del año en que se monitorizó el edificio. Hay que tener en cuenta que el aula es un espacio polivalente, abierto hacia el exterior y que se puede agrandar incorporando la oficina anexa con el movimiento de las particiones móviles que habitualmente las separan. Por esta misma razón, ya que los eventos o las clases en el aula así lo requerían, el aula permanecía con la partición del aula abierta durante la mitad del tiempo. La primera modificación sobre el planeamiento supuso la determinación de la apertura del aula a lo largo de las 24 horas del día durante todo el periodo de monitorización, por esto, a partir de septiembre de 2015 se decidió considerar un recinto único a las dos estancias. La consecuencia fue la retirada del termopar situado en la posición 3, ya que se duplicaban los datos, y la colocación del termopar número 2 colgado del techo en el centro del aula. A partir de este momento, el termopar de la ubicación 2 no se encontraba junto a ningún elemento constructivo si no que estaba colgado y tomando registros de la temperatura del aire en el centro del recinto. La altura de 1,7 metros resultó suficiente para no interferir en la celebración de las jornadas con alumnos, y se retiró puntualmente cuando el evento lo requería.

Respecto de los termopares empleados no hubo ninguna otra incidencia a lo largo del tiempo. Sin embargo, la monitorización de la estación meteorológica sí que conllevó sucesivos cambios. Los dos primeros meses de monitorización coincidieron con la entrada del verano, razón por la que las temperaturas alcanzadas en la cubierta eran bastante elevadas. La falta de un lugar protegido para la ubicación de la caja con los sensores, llevó a el calor excesivo, tormentas y vientos racheados dejaran inservibles un par de equipos de recogida de datos, OPUS 200. Por esta razón se decidió dejar de monitorizar la meteorología por nuestros propios medios.

Al dejar de tomar datos climáticos con nuestros equipos, revisamos los datos servidos por el resto de estaciones meteorológicas. La estación meteorológica de Pozuelo de Alarcón no sirve los datos requeridos, por faltar la dirección, velocidad del viento y presión ambiental. Estos datos sí son servidos por la estación meteorológica AEMET de la ciudad universitaria, razón por la que ésta es escogida como la referencia para la campaña y su posterior uso en la simulación numérica del siguiente capítulo. De forma paralela, los datos respecto de la radiación solar -directa y global- son tomados de la estación meteorológica del Instituto de Energía Solar de la UPM. Se hace una comparación entre los datos tomados por nuestros equipos, durante los meses de junio y julio, y los de las estaciones que se van a emplear, con un coeficiente de variación menor al 3%, por lo que se concluye que los datos tomados por la estaciones meteorológicas escogidas son válidos para nuestra experimentación. Entre ambas estaciones la distancia es menor a 1 kilómetro. Los datos servidos por éstas son horarios, motivo por el cual decidimos emplear esos intervalos de tiempo como referencia para el análisis de la campaña de monitorización anual.

A lo largo de todo el año, lo único que se les pide a los usuarios es que ejecuten las actividades de forma normal, sin importar la presencia de sensores. Se van tomando anotaciones del estado de los equipos y del uso de las instalaciones de forma semanal, intervalo de visitas al edificio en los que se recogen los datos. Salvo tareas de mantenimiento en cuanto a la fijación de los sensores y caídas puntuales de éstos, no existe ninguna incidencia que impida un desarrollo válido de la monitorización.

4.3.3. Campaña anual de monitorización en el edificio

Como se ha indicado previamente, la monitorización del edificio se ha dividido en periodos mensuales. Las condiciones climáticas y el calendario escolar condicionan el uso del edificio, razón por la cual en esta parte del documento se van a escoger cuatro meses para representar el comportamiento térmico anual. Los cuatro meses escogidos van a ser los de julio y octubre de 2015, y enero y abril de 2016, por ser los meses centrales de cada estación del año. El resto de meses analizados se muestran en el anexo B.

Debido a los diferentes usos del edificio entre los tres módulos de los que se compone, el análisis llevado a cabo en el edificio se divide en función del módulo y del uso correspondiente.

4.3.3.1. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 1 durante julio de 2015*

Durante este mes se pretende observar las condiciones interiores del edificio en la época estival. El periodo lectivo ya había terminado y los únicos ocupantes eran los trabajadores. Lo interesante de este periodo fue la influencia que tienen los usuarios sobre el edificio, ya que se dan condiciones muy variables entre los días festivos y los días laborables. La apertura y cierre de las ventanas, la modificación de la vestimenta debido a las altas temperaturas y el accionamiento puntual de estrategias de ventilación son las cuestiones más reseñables y que se van a mostrar en el análisis propuesto.

El primer módulo analizado va a ser el mismo que se estudió durante la campaña del verano anterior: el aula y la oficina. Si en la campaña anterior se había hecho hincapié en la influencia que tenían las estrategias pasivas incorporadas en el edificio, en este caso la monitorización fue mucho más simple, con sólo un termopar recogiendo datos de temperatura en cada recinto.

Como corresponde al verano, las temperaturas exteriores fueron muy altas y, como en el año anterior, la presencia de un alero en su orientación sur y el invernadero modificaron sustancialmente el comportamiento esperado en un edificio sin climatización. La Figura 118 muestra las temperaturas de los recintos monitorizados, en la que se observa cómo el recinto del invernadero alcanza temperaturas muy elevadas a lo largo del día, amortiguando la transferencia de la energía térmica del ambiente exterior a los recintos habitables del edificio. En éstos, la temperatura oscila entre los 25°C y los 30°C, siendo algo cálida pero soportable por los trabajadores. Como ya se ha indicado previamente, durante la monitorización del año anterior, la diferencia de temperatura entre el aula y la oficina se mantiene en torno a 1°C incluso durante el periodo nocturno, por lo que achacamos a la diferencia de superficie y volumen de los espacios esta diferencia. Aun así, el uso de la oficina y la apertura de las ventanas de ésta hacia el exterior resultan en una diferencia de temperatura de hasta 3°C durante los días laborables respecto del aula, que permaneció con las ventanas y la puerta cerradas durante la mayor parte del periodo.

Figura 118. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1

Al haber sido estudiado este módulo con mayor profundidad el año anterior, se propone una modificación en el módulo con el uso de un sistema que habitualmente no se emplea. En la figura anterior se observa cómo, entre los días 19 y 26 de julio, las temperaturas alcanzadas en el invernadero del edificio son mucho menores que en los días pasados y posteriores, notándose ligeramente en la caída de las mínimas diarias de temperatura. El edificio cuenta con una climatización forzada de origen natural para verano (Figura 119), formada por unos conductos que toman el aire de forma natural desde la cara norte del edificio. Los conductos discurren bajo el forjado sanitario y el aire se distribuye hacia el interior por una serie de rejillas a nivel del falso techo del edificio. El accionamiento mediante un interruptor pone en marcha el motor y la succión forzada de aire desde el exterior.

Figura 119. Plano esquemático de la ventilación natural forzada del edificio y entrada de aire exterior. Fuente: Elaboración propia

Es un sistema que no se utiliza habitualmente, y que para este análisis se ha activado de forma excepcional. La motivación de su uso es comprobar la influencia del sistema sobre la temperatura interior del edificio, al mismo tiempo que se cuantificar su potencial de uso y la capacidad de refrigeración que puede aportar. Durante esa semana, las ventanas exteriores del invernadero permanecieron cerradas. La consecuencia más notoria es una bajada de casi 10°C en las temperaturas máximas alcanzadas en el invernadero (Figura 120).

Figura 120. Valores de temperatura recogidos durante la semana en que se puso en funcionamiento el sistema

Aunque el sistema de climatización no tiene rejillas de salida en el invernadero, las infiltraciones y aberturas de las ventanas interiores del invernadero muestran cómo el aire insuflado desde el exterior es capaz de refrigerar los tres recintos de manera continuada a lo largo de toda la semana. Por lo que, en primer lugar, destacar cómo una toma de aire en la orientación correcta y su paso por el subsuelo, aunque no sea a través de la tierra, es capaz de hacer sentir su influencia en un volumen mayor al de una vivienda habitual. La entrada de aire natural desde la orientación norte baja las temperaturas 2°C de media en los recintos interiores, a lo largo de toda la semana.

Aun así, la sensación térmica, medida a través del cálculo del valor del PMV, es cálida a lo largo de todo el mes de julio (Figura 121), con valores ligeramente calurosos en los recintos aula y oficina, y calurosos o muy calurosos en el invernadero.

Figura 121. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1

A consecuencia de esto, el método Fanger que desarrolla el índice sobre el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) para el mismo periodo de estudio, muestra en la Figura 122 cómo la inmensa mayoría de personas estarían incómodas en el recinto del invernadero la mayor parte del tiempo. Por el contrario, en los recintos aula y oficina, contando con la adaptación de la vestimenta a la época del año, la mayor parte de los usuarios permanecerían en ellos satisfactoriamente.

Figura 122. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1

Por los valores mostrados en la figura anterior, el edificio podría ser categorizado como tipo C en cuanto al confort térmico interior, permaneciendo casi todo el periodo por debajo del valor del 20% para el índice PPD.

Para mayor profundidad en el análisis, hemos decidido caracterizarlo en función del porcentaje de horas en los que cumple con los procedimientos de diseño de un edificio especificados en el RITE, reglamento de obligado cumplimiento en España para el diseño térmico de un edificio. La temperatura operativa marcada por el RITE debe permanecer entre 23°C y 25°C en el interior del edificio para el verano, aunque también admite que el índice PPD se establezca por debajo de 15%, lo que corresponde con una categorización B para el edificio.

Tal y como se constató durante el año anterior, los dos procedimientos aceptados por dicho reglamento muestran unos resultados dispares. La Figura 123 indica que ninguno de los recintos muestra valores de temperatura dentro de los límites establecidos por RITE (0% de horas dentro de los límites, en la figura), pero si empleamos el procedimiento desarrollado en la norma UNE-EN ISO 7730, la mayoría de horas a lo largo del mes, el edificio sí se encuentra dentro de los límites de confort térmico establecidos.

Figura 123. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1

4.3.3.2. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 2 durante julio de 2015*

Al analizar lo ocurrido en el módulo 2 durante el mes de julio, queda probada la tendencia en el comportamiento de los espacios invernadero. La Figura 124 muestra cómo las temperaturas en esas zonas del edificio se encuentran de forma continuada por encima de los 25°C a lo largo del mes. El módulo 2 del edificio tiene un único recinto ocupado habitualmente, que es la oficina de administración, en conjunto se comporta de forma análoga al descrito en el caso del aula del módulo 1. Lo destacable aquí es la presencia de la biblioteca del edificio en este módulo; al ser un recinto que, salvo la cubierta, sus paredes no se encuentran expuestas al ambiente exterior. Por una parte, sería esperable que este recinto tuviera menor temperatura, al ser su límite norte el muro de tierra, en contacto con el terreno. Sin embargo, la temperatura es muy similar al de la

oficina, de la que está separada por el pasillo y la temperatura de la biblioteca sólo era 1°C menor de media respecto del espacio administrativo.

Figura 124. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2

La sensación térmica aparejada a estas temperaturas también es cálida en todos los recintos. Como se ve en la Figura 125, sólo en el invernadero en contadas ocasiones la sensación térmica se encuentra dentro de categorías aceptables; sólo por las noches y a consecuencia de las filtraciones a través de su carpintería.

Figura 125. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2

Por tanto, en este módulo, el cálculo del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) (Figura 126) alcanza valores de insatisfacción cercanas al 60% incluso en las zonas habitables.

Figura 126. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2

En definitiva, el porcentaje de horas durante las que el edificio se encuentra en condiciones satisfactorias de ocupación es mucho menor que en el módulo anexo. Lo más destacable, según la Figura 127, es que los espacios habitables se encuentran menos horas que el propio invernadero dentro de unos límites aceptables. Debido a los grandes cambios en la temperatura que sufría el invernadero, la mitad de esas horas en las que su temperatura estaba dentro de los límites aceptables eran en el periodo nocturno, fuera del horario laboral. Mientras tanto, la administración del edificio sólo recogía horas dentro de los límites durante el periodo nocturno, y debido a que en esos momentos la puerta y las ventanas estaban cerradas, la inercia térmica era menor y disfrutaba de menos horas en condiciones aceptables que el invernadero. Por último, la temperatura en la biblioteca estuvo durante todo el mes algo por debajo de la administración, al encontrarse sin aberturas hacia el exterior y sin poder ventilar y evacuar la energía térmica diurna, de ahí que el porcentaje de horas aceptables tampoco fuese mayoritario a lo largo del mes de julio.

Figura 127. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2

4.3.3.3. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 3 durante julio de 2015*

Por último, recordar que el módulo 3 del edificio tiene unas características aún más particulares, al estar compuesto por recintos no habitables, salvo la oficina de apoyo. Se vio en una campaña anterior, en la que se evaluaba el muro Trombe, que la influencia de éste y el cuarto técnico del edificio no eran muy elevadas durante los meses de invierno respecto de las temperaturas interiores. La evaluación de los recintos en verano no cambia en gran medida esa influencia (Figura 128), sin embargo sí queda patente la diferencia en el comportamiento del cuarto técnico respecto del resto de espacios invernadero, siendo las temperaturas nocturnas entre 3°C y 5°C mayores que en los demás invernaderos. Los valores de temperaturas mínimas por las noches apenas bajan de los 30°C y alcanzando los 40°C en su interior casi todos los días del mes de julio. Estas altas temperaturas son causadas por dos motivos bien distinguidos; por un lado la falta de ventanas en el cuarto técnico evita el poder regular las temperaturas interiores durante el día, por lo que el calor se acumula en su interior sin poder evacuarse; por la misma falta de ventanas correderas, la infiltración en este recinto es menor a la de los

anteriores y ese excedente de energía térmica sigue sin poder ser evacuado durante el periodo nocturno. Por último, no hay que olvidar que se trata de un cuarto técnico, en el que se ubica la caldera de biomasa del edificio, los depósitos auxiliares ayudan a que, como en verano sólo da servicio al agua caliente sanitaria del edificio, no se encienda a pleno rendimiento habitualmente, pero su calor y trabajo constante aumentan la energía térmica a evacuar del recinto.

Figura 128. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3

Por tanto, la ausencia de tantas aberturas como en el resto de módulos y la falta de ventilación natural del cuarto técnico resulta en una sensación térmica bastante calurosa en este módulo del edificio (Figura 129).

Figura 129. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3

De ahí que un gran porcentaje de personas, según el índice PPD, se muestran insatisfechas en la ocupación de este módulo (Figura 130). Este resultado teórico se ve refrendado en la realidad del edificio, ya que los ocupantes de la oficina de apoyo situada en este módulo trasladan su estancia y su equipamiento informático a la oficina del módulo 1, junto al aula.

Figura 130. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3

Con todas las cuestiones previas expuestas, no cabía esperar otro resultado que el expuesto en la Figura 131, donde se observa que las horas dentro de los límites aceptables para todos los recintos se sitúa en torno al 10%. Siendo además la mayor parte de esas horas durante el periodo nocturno, en el que no está ocupado el edificio.

Figura 131. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3

4.3.3.4. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 1 durante octubre de 2015*

Como ya se ha estudiado suficientemente, la mayoría de la demanda energética de un edificio se da en los meses centrales del verano y del invierno, resultando los meses de otoño y primavera más variables para la evaluación del comportamiento térmico de un edificio. Esto mismo ocurre en nuestro caso de estudio, en las figuras se va a poder observar cómo los días con una gran insolación las temperaturas recogidas serán similares a las del mes de julio. Por el contrario, los días nublados y lluviosos las temperaturas descienden bruscamente. Además, el periodo nocturno es más largo que en verano y la insolación no es tan elevada, por lo que las filtraciones en el edificio influyen en que las temperaturas interiores no sean tan calurosas.

En el módulo 1 se produce un gran cambio; como ya se anticipó, una de las incidencias sufridas es la retirada de la partición que separaba el recinto del aula y la oficina, debido a la gran cantidad de eventos y actividades docentes del edificio en periodo lectivo. De

ahí que, en las siguientes figuras del módulo 1, haya desaparecido la referencia a la oficina.

Como se muestra en la Figura 132, la influencia de los aleros en este edificio vuelve a demostrarse determinante, durante los meses anteriores, el ángulo de la radiación solar ha ido decreciendo por lo que alcanza a impactar sobre el cristal del espacio invernadero. Los días soleados se alcanzan en su interior temperaturas máximas que sobrepasan los 40°C, barrera que no se superaba en julio. Por otra parte, esa radiación aún no alcanza el recinto interior del aula, ya que sus temperaturas son menores que las conseguidas en los meses cálidos (Figura 117). Este efecto de la radiación, unido a las filtraciones de aire del edificio, provoca unas diferencias en las temperaturas nocturnas de hasta 20°C en el invernadero. Respecto al aula del edificio, las temperaturas se encuentran casi todo el día dentro de límites aceptables, salvo durante los días en los que la radiación solar y la temperatura ambiente es menor, cuando tanto el invernadero como el aula alcanzan temperaturas por debajo de los 15°C (13 de octubre).

Figura 132. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1

Por tanto, hablar de valores más bajos de temperaturas implica una sensación térmica mucho menos calurosa en el edificio. Obviando el análisis en el invernadero, la sensación térmica en el aula del edificio se torna en ligeramente fría o bastante fría (Figura 133), lo que anticipa la cercanía del invierno y la puesta a punto y el mantenimiento de la calefacción del edificio.

Figura 133. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1

En la Figura 134 se observa cómo ambos recintos sufren una gran insatisfacción según el índice PPD. Sin embargo, así como en verano la insatisfacción venía provocada por el calor aquí se encuentran mezclados los periodos de insatisfacción por calor en el invernadero durante el día y la insatisfacción debida al fresco ambiente que comienza a dominar las noches de octubre. La alta variabilidad de las condiciones climáticas provocan que el periodo entre el 13 y el 14 de octubre se den condiciones interiores de insatisfacción de forma continuada. Primero por el frío dominante el día 13 y, después, por la gran cantidad de insolación del día posterior. Esto provoca periodos de más de 24 horas por encima de los límites aceptables, representados de la misma forma, pero debido a causas totalmente opuestas.

Figura 134. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1

Los grandes saltos en las temperaturas interiores provocan que sólo en periodos cortos, la temperatura interior permanezca entre los límites establecidos por el RITE (Figura 135). Sin embargo, el procedimiento establecido por la norma UNE-EN ISO 7730, en el que se tiene en cuenta la adaptación de la vestimenta de los usuarios resulta en un porcentaje de horas mucho más elevado para ambos recintos. Otra nueva discordancia entre dos procedimientos establecidos como válidos dentro de un mismo reglamento nacional. Además de esto, lo más destacable es recordar que estas horas se producen en diferentes tiempos del día; para días soleados se producen a la noche posterior al periodo diurno, mientras que en días nublados se cuentan en las horas centrales del día, cuando el edificio sí está ocupado por trabajadores y alumnos.

Figura 135. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1

4.3.3.5. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 2 durante octubre de 2015*

Similares resultados en el módulo 2 del edificio (Figura 136), ya que las temperaturas interiores de los recintos se ven influenciadas por las condiciones climáticas exteriores. Los primeros días del mes, los trabajadores abren las ventanas del invernadero y de la oficina, como resultado se obtienen temperaturas semejantes entre el invernadero y los recintos interiores del edificio. A partir de la semana siguiente, los usuarios cambian sus hábitos y dejan de abrir estas ventanas, por lo que el invernadero sufre grandes cambios en su temperatura a lo largo del día y la noche. La única fuente de radiación solar en el aula es a través del invernadero y, como aún no ha bajado lo suficiente el ángulo de radiación solar, su temperatura es casi estable entre 20°C y 25°C. La temperatura en la biblioteca sí que tiene variaciones significativas algunos días del mes, durante los que alcanza temperaturas entre 30°C y 35°C, aunque estos datos son erróneos y son debidos a la ubicación del sensor termopar.

Figura 136. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2

Cuando se colocó, su posición no era susceptible de recibir radiación solar que alterase los datos recogidos. Sin embargo, se ha observado que la variación del ángulo del sol durante algunos meses de otoño y primavera quedaba en una posición por la que entraba el sol hasta el espacio de la biblioteca impactando sobre el termopar (Figura 137). Por esta misma razón, nublados parciales a lo largo de las horas de un día provocan saltos entre mediciones horarias por las que la temperatura baja y vuelve a subir casi 10°C en una hora. No se pudo encontrar otra posición para el termopar debido a que la superficie vertical de la partición es de mortero enfoscado, y la adherencia de cintas adhesivas sobre ella es nula, por lo que se colocó en la superficie de la carpintería, quedando expuesto al sol puntualmente.

Figura 137. Ubicación del sensor termopar de la biblioteca y radiación solar sobre la biblioteca durante el mes de octubre de 2015

Al igual que en el módulo 1, la sensación térmica calculada por el índice PMV se mueve entre ligeramente fría y bastante fría a lo largo del mes de octubre (Figura 138). Salvo en el invernadero donde la sensación térmica varía entre muy caliente y muy fría a lo largo de un día.

Figura 138. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2

No obstante, el valor del PPD es aceptable en los recintos administración y biblioteca, al calcularse en menos de un 20% el porcentaje de personas insatisfechas durante casi todos el mes (Figura 139).

Figura 139. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2

De ahí que el porcentaje de horas en las que la sensación térmica se posiciona dentro de los límites establecidos por la norma sean mayores al 90% para la administración y la biblioteca del edificio.

Figura 140. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2

4.3.3.6. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 3 durante octubre de 2015*

En el módulo 3 del edificio se repitió el comportamiento térmico del edificio ya descrito en los módulos anteriores. La Figura 141 muestra cómo el cuarto técnico, que recibe radiación solar directa alcanza temperaturas muy elevadas mientras el resto de recintos del módulo no sufren muchas variaciones en sus temperaturas, permaneciendo casi todos el mes entre 20°C y 25°C.

Figura 141. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3

Como consecuencia, la sensación térmica en el cuarto técnico es muy calurosa durante casi todo el día (Figura 142). La sensación térmica en la oficina de apoyo y en el pasillo interior fluctúa entre ligeramente fría y bastante fría. Con una sensación térmica mucho más agradable, al comienzo del mes, los trabajadores retornan a su oficina y desalojan la que se encuentra junto al aula.

Figura 142. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3

El porcentaje de personas insatisfechas (PPD) es mucho menor que en el mes de julio, pasando a situarse por debajo del 20% casi todo el mes de octubre (Figura 143).

Figura 143. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3

De ahí que el porcentaje de horas durante las que la oficina de apoyo está dentro de los límites sea absolutamente mayoritario (Figura 144). Resultado también mayoritario para el pasillo del edificio, e incluso para el cuarto técnico.

Figura 144. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3

4.3.3.7. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 1 durante enero de 2016*

Enero es un mes singular dentro de la monitorización anual del edificio. En primer lugar, al principio del mes se acumulan muchos días festivos entre los fines de semana y las vacaciones de navidad. Posteriormente, la actividad se recupera a pleno rendimiento. Además, este es el primer mes que se va a estudiar con la calefacción de suelo radiante del edificio encendida. La climatología a lo largo del mes es muy cambiante, con días soleados durante los que las temperaturas interiores son similares a las del verano, y días nublados y con bajas temperaturas en los que la calefacción se vuelve necesaria para mantener al edificio en condiciones interiores aceptables para los usuarios y las múltiples visitas del edificio.

En la Figura 145 se observan claramente los días en los que el sol radia con toda su potencia, las bajas temperaturas exteriores no influyen en el comportamiento térmico del módulo 1 ya que las temperaturas pasan de los 25°C en el aula y de los 35°C en el invernadero. Por el contrario, los días nublados se hace necesaria la puesta en marcha de la calefacción m para mantener la temperatura interior del edificio dentro de un margen aceptable. Los días nublados en los que no se usa el aula y, por tanto, no se acciona el termostato de temperatura de la calefacción, apenas se llega a 18°C de temperatura máxima durante el día en el aula. En el invernadero, ya que no se dispuso suelo radiante, la temperatura es aún más baja que en el aula, denotando la poca estanqueidad del recinto y su total dependencia de la radiación solar. El ángulo de la radiación solar en invierno es mucho más bajo que en otoño, por lo que la radiación solar directa se introduce hasta el aula, y causa de los 25°C ó 30°C de temperatura máxima durante los días soleados.

Figura 145. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1

La combinación de la alta radiación solar durante los días soleados y la baja temperatura que se impone durante los días nublados resulta en sensaciones térmicas, calculadas con el índice PMV, muy dispares en días consecutivos (Figura 146). El invernadero es el que sufre mayor variación y el que se mueve del extremo de sensación muy cálida a una sensación muy fría en pocas horas. El aula, al situarse reguardada de las inclemencias por el invernadero se mueve entre valores de sensación térmica más estables y neutros y apenas superando los valores de ligeramente cálido o ligeramente frío.

Figura 146. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1

EL porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en el invernadero (Figura 147) sí alcanza cotas de casi el 100% en periodos puntuales del mes, debido a la radiación solar acumulada durante los días soleados. Al mismo tiempo, el aula varía entre 5% y el 20% casi todo el mes. La temperatura del aula durante los días sin actividad y nublados sí que hacía esperar valores más elevados, pero aun así se encuentran dentro de valores de porcentaje de PPD aceptables.

Figura 147. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1

De hecho, en la Figura 148 queda patente que las condiciones térmicas en el aula son aceptables durante casi todo el mes, con un 95% de horas por debajo de un índice PPD del 15%. Aunque eso no se refleja en el intervalo de temperatura impuesto por el RITE, de entre 21°C y 23°C, ya que está un poco por debajo de ese límite la temperatura media del recinto aula.

Figura 148. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1

4.3.3.8. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 2 durante enero de 2016*

En el módulo 2 del edificio, las temperaturas del invernadero se revelan más bajas que las del módulo 1 (Figura 149). Por un lado, y por motivos de deslumbramiento, la radiación solar durante los días soleados se combate bajando las cortinas situadas en la cara interior de la carpintería exterior del invernadero. También influye que las horas de insolación son menores a los meses pasados, unido eso a que el invernadero de este módulo está levemente girado respecto del sur, el resultado es que la temperatura del invernadero nunca alcanza valores similares a los del módulo 1. Las primeras horas de sol del día, la radiación llega desviada respecto de la orientación del módulo, no impactando contra el interior. Como ya se ha comentado, en el caso de la biblioteca el sol no llega directamente a su superficie interior salvo en contados periodos. Al final del mes de enero se observa cómo el sol penetra hasta el interior resultando valores de temperatura erróneos por acción de la radiación solar contra el termopar. Al inicio del mes de enero, no se produce este efecto por estar el sol más bajo e impactar contra zonas superiores a la de la altura de posición del termopar. En el anexo correspondiente, se verá cómo también ocurre este error en los datos recogidos del termopar durante los meses de noviembre y febrero.

Figura 149. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2

El valor PMV para los recintos de este módulo es casi neutro a lo largo de todo el mes para el espacio administrativo y para la biblioteca (Figura 150). La causa es la adaptación de la vestimenta de los usuarios durante los meses fríos del año, que para este cálculo se han considerado de pantalón largo, camisa y jersey. La sensación térmica es moderadamente fría en el invernadero, debido a las causas ya explicadas en la temperatura.

Figura 150. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2

Con esta modificación en la vestimenta, los resultados del índice PPD son cercanos al 5% durante todo el mes en la administración y la biblioteca (Figura 151), no así en el invernadero donde la consecuencia de una sensación térmica fría es un grado de insatisfacción elevado mayoritariamente a lo largo del mes de enero.

Figura 151. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2

De ahí que el porcentaje de horas por debajo de un PPD del 15% sea casi del 100% tanto para el espacio administrativo como para la biblioteca (Figura 152). En este módulo, con un apoyo puntual de la calefacción para los días nublados, las condiciones interiores son idóneas para la actividad en el edificio.

Figura 152. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2

4.3.3.9. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 3 durante enero de 2016*

En el módulo 3 del edificio, el cuarto técnico presenta una temperatura por encima de 20°C para todo el mes de enero (Figura 153). En los demás espacios invernadero, la falta de estanqueidad resultaba en unas temperaturas más bajas que en este recinto durante el mes. Además, los días en que es necesaria la calefacción del edificio también se notan en el cuarto técnico, ya que su temperatura permanece por encima de 20°C (días 20 a 22 de enero). La actividad de la caldera y la salida de todos los tubos de calefacción a través del cuarto técnico aportan una cantidad de energía térmica suficiente para mantenerlo por encima de los 20°C. Los fines de semana, que es cuando la caldera no se enciende, sí que se recogen temperaturas mínimas por debajo de los 20°C (días 23 a 25 de enero). Por su parte, la oficina de apoyo muestra valores de temperatura entre 20°C y 25°C, similares a los del resto de recintos habitables del edificio. En el pasillo del edificio se recogen valores más bajos de temperatura (entre 17°C y 21°C) debido a que, en sus dos extremos se encuentran las puertas del edificio, por lo que la renovación del aire y la influencia de la temperatura exterior es mayor que en los demás recintos.

Figura 153. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3

El valor PMV en el cuarto técnico es cálido a lo largo de todo el mes de enero (Figura 154), por la radiación solar y la caldera, como ya se ha dicho. Mientras que el valor

PMV es casi neutro a lo largo del mes para la oficina de apoyo, y ligeramente frío para el pasillo del edificio.

Figura 154. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3

Un valor de PPD inadecuado sólo se alcanza en el cuarto técnico durante las horas centrales de los días soleados (Figura 155), permaneciendo el resto del tiempo en valores del 5% de personas insatisfechas. Valor casi constante del 5% para los recintos de oficina y pasillo del edificio.

Figura 155. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3

Esto se refleja en que el módulo 3 se encuentra mayoritariamente por debajo del límite del 15% para el valor PPD, a lo largo del mes de enero (Figura 156).

Figura 156. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3

4.3.3.10. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 1 durante abril de 2016*

De un mes de abril, correspondiente a la primavera se pueden esperar condiciones similares a las obtenidas durante el mes de octubre. La radiación solar es muy importante durante el mes, pero las condiciones climáticas pueden determinar que el comportamiento térmico del edificio sea muy variable entre los días calurosos y los días nublados y lloviosos.

Aun así, las temperaturas interiores recogidas son muy estables a lo largo del mes. En el invernadero, la oscilación térmica entre el día y la noche es similar en días soleados (entre 15°C y 30°C cada día) y algo menor en los días nublados, con máximas que no pasan de los 20°C (Figura 157). El aula del edificio permanece entre 15°C y 22°C casi todos los días sin necesidad de calefacción en el edificio. Además, las temperaturas mínimas se recogen durante la noche, fuera del periodo de actividad del edificio.

Figura 157. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1

El valor PMV para la sensación térmica es neutro para el aula y ligeramente cálido para el invernadero (Figura 158), durante las horas de apertura del edificio. Por esto, la calefacción ya no se considera necesaria después del invierno en el edificio.

Figura 158. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1

A pesar de que los valores de PMV son de ligeramente fríos durante las noches, el resultado del índice PPD no pasa de valores del 20% salvo en los momentos puntuales (Figura 159), tanto para el aula como para el invernadero.

Figura 159. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1

Por esto, el valor del PPD se encuentra entre el 80% y el 90% de las horas dentro de límites aceptables para los usuarios, lo que incluye la mayoría del periodo nocturno (Figura 160). Sin embargo, la temperatura de los recintos aún se considera fuera de los límites confortable, por tener mayoritariamente valores de temperatura por debajo de los 21°C.

Figura 160. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1

4.3.3.11. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 2 durante abril de 2016*

Ya se vio durante el mes de enero que la temperatura en el invernadero del módulo 2 estaba por debajo de las temperaturas de los otros dos módulos. Por la leve variación en la orientación sur del edificio hacia el suroeste, la radiación solar no impacta desde el primer momento del día y las temperaturas no alcanzan valores tan cálidos. En días soleados, la temperatura del invernadero apenas rebasa los 25°C, con mínimas de entre 10°C y 15°C (Figura 161). Por efecto de la amortiguación que supone el contar con un espacio invernadero, el espacio administrativo y la biblioteca del aula se mantienen entre 18°C y 22°C durante todo el mes de abril.

Figura 161. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2

Las temperaturas agradables de estos recintos se trasladan a un valor de PMV en torno a valores de neutro a lo largo de todo el mes (Figura 162), para los recintos de administración y biblioteca.

Figura 162. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2

De tal manera, que al encontrarse el índice PPD directamente ligado con el valor del PMV, sólo se encuentren porcentajes de personas insatisfechas mayores al 20% en el invernadero del módulo 2 (Figura 163). Los tramos horarios en que esto ocurre es durante el periodo nocturno y debido a las bajas temperaturas por lo que, no se dan estos valores en el periodo de ocupación del edificio.

Figura 163. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2

Durante todo el mes de abril, los recintos de administración y biblioteca presentan valores de PPD por debajo de los establecidos por la normativa (Figura 164),

determinando que las condiciones interiores de habitabilidad son óptimas desde el punto de vista del confort térmico.

Figura 164. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2

4.3.3.12. *Análisis del comportamiento térmico en el módulo 3 durante abril de 2016*

Para finalizar, el módulo 3 del edificio vuelve a mostrar datos en sus temperaturas a los ya observados en los meses anteriores. La estanqueidad y la alta carga de energía térmica del cuarto técnico resulta en unas temperaturas de entre 25°C y 35°C durante todo el mes de abril (Figura 165). Mientras, la temperatura en la oficina de apoyo y el pasillo varía entre los 20°C y los 25°C.

Figura 165. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3

Como consecuencia, los valores de PMV para la sensación térmica son neutros para los recintos habitables y cálidos para el cuarto técnico del edificio (Figura 166).

Figura 166. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3

Al igual que en el resto de módulos del edificio, el índice PPD sólo alcanza valores superiores al 20% en el invernadero (cuarto técnico) (Figura 167). Aunque, si en el módulo 2 era por frío, en este es por el calor remanente del cuarto técnico, que no se pierde hacia el exterior del edificio.

Figura 167. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3

Con unas temperaturas ente 20°C y 25°C a lo largo del mes de abril, lo esperable era que el porcentaje de horas en los que permanece el módulo 3 dentro de límites aceptables para su ocupación fuera del 100%, como así ocurre.

Figura 168. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3

4.3.4. Consumo energético del edificio a lo largo del año

La producción energética del edificio también se realizó bajo la premisa del empleo de sistemas que produjesen un bajo consumo de CO₂, lo que significó el empleo de algunos tipos de sistemas de energía renovable y conseguir la mayor cuota de producción y autoconsumo del edificio posible.

En primer lugar, la energía eléctrica demandada por el Aula de Educación Ambiental se produce dentro de sus instalaciones, mediante un panel fotovoltaico de 5kW junto con un aerogenerador de 700W, que luego es distribuida de forma conjunta a todos los edificios del complejo sin poder discernir el consumo real de cada uno de ellos.

En cuanto al consumo de energía para calefacción, el edificio cuenta con una caldera de biomasa que consume pellets de madera, la caldera tiene un suministro de pellets y aire forzado mecánicamente desde el depósito de acopio de pellets que se encuentra dentro del propio cuarto técnico.

La producción de agua caliente sanitaria se consigue parcialmente con el aporte de un colector de tubos de vacío, situado por la cara exterior del vidrio del cuarto técnico. Su aporte llega a un depósito auxiliar, que se encarga de distribuir esa agua caliente a los baños y vestuarios del edificio.

La caldera de biomasa del edificio consume pellets tipo DIN-plus para satisfacer la demanda de energía de calefacción y parte del agua caliente sanitaria. En total, el consumo de la caldera supone 50.000 kWh al año. Esta cifra destaca ya que el consumo corresponde a 142,6 kWh/m², por encima del consumo anual medio de una vivienda y muy por encima del consumo que se puede encontrar en edificios diseñados bajo el estándar alemán Passivhaus. A pesar de esto, el edificio produce el resto de energía demandada por sus propios medios, lo que rebaja la calificación energética realizada en el propio edificio. Además, debido a que el consumo de pellets del edificio tiene un coeficiente de equivalencia mucho menor al de producción eléctrica o por gas, la calificación energética del edificio es mucho mejor que en la mayoría de edificios del parque inmobiliario actual.

5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EDIFICIO

Como último paso en el análisis y la caracterización del edificio, esta tesis demuestra, mediante el uso de una herramienta de simulación numérica, la influencia de las estrategias pasivas estudiadas de forma experimental.

Según la normativa española, el edificio cuenta con la calificación energética más alta, aplicando el procedimiento vigente para su caracterización, mediante el cálculo con el programa CE3X, cuestión ya nombrada previamente. Esta herramienta informática obtiene como resultado los kilogramos de dióxido de carbono que produce el edificio, en lugar de eso, esta tesis se centra en el análisis de las condiciones interiores del edificio y los cambios que se producirían en caso de no haber incorporado las estrategias pasivas seleccionadas.

La herramienta informática seleccionada se trata de DesignBuilder v5.0.1.020, que ya ha sido elegida en muchas de las investigaciones presentadas como herramienta válida para la simulación en fase de diseño de diversas edificaciones. El motor de cálculo de esta herramienta es el programa informático EnergyPlus v8.5, aunque para la obtención de los resultados numéricos que se presentarán se ha empleado la versión 8.6 de dicho programa, por ser la más reciente en el momento de la realización de los análisis de los resultados.

Al ser un motor de cálculo en base a la normativa de los Estados Unidos de América, existen multitud de diferencias respecto de la normativa española, que han debido ser modificadas para la caracterización del edificio. El proceso de creación del modelo numérico se explica en el anexo correspondiente de esta tesis.

El resultado final de la creación de este modelo se presenta en la Figura 169, en la que se muestran los tres módulos del edificio sobre los que se ha experimentado. También se ha considerado importante para la creación del modelo la contextualización del edificio en su entorno, con la incorporación de la orografía circundante, que deja semienterrada la cara norte del edificio.

Figura 169. Imagen renderizada del edificio CREAS obtenida con el programa DesignBuilder. Fuente: Elaboración propia

La reproducción del edificio se ha realizado teniendo el acceso completo al proyecto del edificio. Todos los materiales y sistemas constructivos han sido introducidos fielmente a lo expresado en el proyecto, adaptándolo a la mecánica de la herramienta de diseño por ordenador que incorpora el programa informático empleado.

Para su creación, se han tenido en cuenta todas las recomendaciones encontradas en las guías de buenas prácticas distribuidas por los organismos de Estados Unidos, así como para la validación del modelo numérico creado.

Los datos referentes a los valores de los parámetros empleados para la realización del modelo simulado se encuentran en el subcapítulo 4.1 (Caracterización del edificio por patrones estacionales y de ocupación) y el anexo C (Modelización del edificio con el programa DesignBuilder), de este documento.

5.1. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO GENERADO DEL EDIFICIO

La normativa americana ASHRAE Guideline 14-2015 establece que para validar la calibración de un modelo numérico se ha de realizar durante al menos 8760 horas, lo que implica un año completo. Esta razón explica en parte la motivación de realizar una campaña anual de temperaturas sobre los recintos significativos del edificio CREAS.

Se han recogido de la manera que establece la norma, incluyendo datos completos en cuanto al rango horario de ocupación y apertura del centro. También se ha especificado el periodo de funcionamiento de la caldera de biomasa del edificio, su rendimiento y la temperatura de consigna (21,5°C). Al haber recogido datos horarios de todas las variables atmosféricas a través de estaciones meteorológicas cercanas (AEMET y IES UPM), se ha implementado en la herramienta informática el archivo climático real a lo largo del periodo de monitorización anual.

La validación en base al consumo de energía del edificio se antojaba dificultosa por diferentes motivos. El primero es que el acopio de pellets en el edificio se lleva a cabo de forma anual, por lo que no podía ser cuantificado el consumo horario de materia prima. Además, la distribución del agua caliente para calefacción se realiza de forma conjunta para todos los recintos. Dada la variedad de tipos de recintos y diferencias en su comportamiento térmico y ocupación, requería de la colocación de un medidor de consumo de energía en cada uno de los circuitos. De cualquier manera, en esta tesis no se persigue la validación del modelo en cuanto a su consumo energético, si no poder observar cómo se comporta térmicamente el edificio en cada punto, ya que cada uno de los tres módulos que lo conforman fueron diseñados empleando diferentes estrategias pasivas.

Llegados a este punto, se optó por la validación mediante los mismos procedimientos y cálculos propuestos por la normativa, pero tomando como base las temperaturas recogidas en cada recinto durante la campaña de monitorización anual. Por tanto, los resultados numéricos simulados de temperatura en cada recinto se han comparado con

los datos reales en base al coeficiente de variación del error medio cuadrático (CVRMSE, por sus siglas en inglés) y al error medio del sesgo normalizado (NMBE, por su siglas en inglés).

Los resultados de la validación del modelo numérico simulado del edificio se han realizado en todos los recintos que se habían monitorizado durante la campaña anual. El modelo simulado con el programa DesignBuilder se ha considerado como válido cuando los coeficientes calculados en los periodos mensuales de cada recinto se han situado por debajo de los límites marcados por la normativa de referencia. Según la normativa ASHRAE 14-2015 el valor mensual ha de ser menor de $\pm 10\%$ para el NMBE y menor del 30% para el coeficiente CVRMSE.

Para el módulo 1, la Tabla 16 muestra que todos los valores se encuentran por debajo de los límites establecidos, con una tendencia a sobreestimar la temperatura interior durante los meses cálidos y subestimarla en los meses fríos. Durante el periodo cálido, se entiende que esto ocurre debido a la influencia humana, ya que los usuarios abren y cierran las ventanas cuando su sensación térmica es elevada, lo que no permite una correcta modelización de los patrones para la apertura y cierre de las ventanas exteriores e interiores en el modelo numérico. Durante el periodo frío, en algunos recintos los valores son levemente menores durante los días soleados, mientras que en recintos adyacentes son algo mayores. Se entiende como causa la dificultad de establecer en el programa periodos de apertura y cierre de las ventanas por radiación solar y no por ocupación. Además, según consta en la información consultada, el programa puede presentar variaciones debidas a la configuración inclinada del techo y la apertura de un gran hueco para un tragaluz en la parte superior. Aun así, cumple con los límites establecidos por la normativa y se prefiere mantener un valor uniforme de parámetros a lo largo de todo el año, en lugar de realizar un ajuste por estaciones del año, ya que podría dar lugar a errores cometidos por la aproximación de los resultados a la realidad.

Módulo 1		Invernadero 1		Aula		Oficina	
		NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE
2015	Junio	1,7	4,4	-4,8	9,3	-0,5	8,3
	Julio	-2,5	7,6	-7,2	9,3	-5,5	8,9
	Agosto	0,3	7,6	-3,7	6,9	0,4	5,7
	Septiembre	-1,3	7,1	-3,9	8,1	1,9	7,0
	Octubre	-2,6	7,1	-4,9	7,3		
	Noviembre	-2,6	10,0	0,3	7,4		
	Diciembre	4,4	11,8	7,1	10,7		
2016	Enero	7,8	12,9	7,1	11,9		
	Febrero	2,7	10,6	5,6	9,7		
	Marzo	0,3	9,4	2,1	7,9		
	Abril	-3,6	8,6	-7,1	10,2		
	Mayo	1,3	5,0	-2,2	6,3		
	Junio	-3,0	4,5	-8,8	9,4		

Tabla 16. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 1

En el módulo 2 del edificio (Tabla 17) los resultados muestran cómo durante los meses de invierno, la temperatura se sobreestima en invernadero al mismo tiempo que se

subestima la del recinto de administración. Durante las visitas al edificio se observó que la apertura de las ventanas entre ambos se producía sólo durante los días soleados, parámetro que no se puede insertar en el modelo simulado. Por esta razón las temperaturas reales en el invernadero no son tan elevadas como indica el modelo ni tan bajas como indica en la administración. El motivo es la entrada de la energía térmica acumulada en el invernadero durante los días soleados hacia el recinto de la administración. El programa entiende la apertura y cierre de ventanas por criterios de ventilación, temperatura y ocupación, pero al tratarse de la apertura de ventanas entre dos recintos no se puede insertar la variable deseada. Al situarse las desviaciones dentro de los límites se prefirió nuevamente mantener un criterio uniforme en las características de los recintos.

Módulo 2		Invernadero 2		Administración		Biblioteca	
		NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE
2015	Junio	1,8	4,5	-1,5	3,8	5,9	7,0
	Julio	1,8	4,8	-1,7	2,7	4,4	5,6
	Agosto	2,8	7,0	-0,2	2,0	5,0	6,1
	Septiembre	-4,8	12,7	0,3	2,3	4,4	5,7
	Octubre	-5,5	11,6	-0,5	4,7	3,4	9,2
	Noviembre	-9,8	17,8	-2,4	7,8	3,8	14,5
	Diciembre	-9,5	15,4	8,2	10,3	1,8	5,6
2016	Enero	-4,0	12,8	9,4	14,3	0,6	6,9
	Febrero	-7,8	12,9	8,4	10,1	1,6	8,9
	Marzo	-4,4	9,8	6,4	8,8	-1,1	5,8
	Abril	1,0	7,7	6,5	8,6	-1,2	6,9
	Mayo	1,3	6,0	3,0	5,7	3,5	5,2
	Junio	-1,7	6,2	-2,3	3,1	3,0	4,5

Tabla 17. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 2

En el módulo 3 del edificio, el problema encontrado es la configuración constructiva del edificio. El cuarto técnico cuenta con un gran ventanal inclinado, y según se ha constatado en el manual del programa, la propia inclinación del cristal modifica el tratamiento que el programa hace de la radiación solar. A falta de un mejor desarrollo de las características térmicas de los vidrios inclinados, y al encontrarse dentro de los límites no se modificó la configuración original del proyecto. Respecto a los recintos interiores, el módulo cuenta en su cubierta con cuatro grandes tragaluces. Estos tragaluces son prolongados hacia el interior introduciendo iluminación natural en tres recintos por un mismo hueco. Esto provoca unas aberturas interiores en el techo que comunican los recintos en dos direcciones. Nuevamente, tal y como se indica en diferentes guías del programa, se producen problemas en el tratamiento de grandes huecos horizontales, ya que al parecer considera el movimiento de aire en un solo sentido. El programa informático no procesa correctamente la ventilación horizontal en altura, a través de una abertura compartida. El criterio seguido en este módulo ha sido el mantener la configuración original del edificio y probar los resultados numéricos del programa, y evaluar posteriormente si se ha de modificar el proyecto. La Tabla 18 expresa los problemas constatados en el pasillo del edificio, ya que el programa obtiene temperaturas interiores mayores que las reales. Tal y como se indica en las guías del

programa, la convección de aire por flotabilidad a través de los huecos superiores no fluye de forma real, acumulándose la temperatura en el pasillo.

Módulo 3		Cuarto técnico		Oficina de apoyo		Pasillo 2	
		NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE	NMBE	CVRMSE
2015	Junio	3,9	5,6	-1,2	6,1	-0,4	4,5
	Julio	-1,1	4,9	-4,5	6,5	-4,1	5,0
	Agosto	-0,8	6,5	-3,4	5,9	-3,6	4,5
	Septiembre	-4,0	12,1	-1,3	5,0	-3,5	4,7
	Octubre	-9,4	14,4	-0,8	4,8	-4,0	5,7
	Noviembre	-5,8	15,2	0,3	5,6	-7,1	8,9
	Diciembre	1,0	18,1	5,2	6,8	-3,8	5,5
2016	Enero	-5,3	15,4	3,8	7,1	-3,8	7,0
	Febrero	-2,7	10,4	3,1	5,4	-3,2	5,0
	Marzo	-1,9	9,1	-1,2	6,5	-5,8	7,4
	Abril	0,6	10,9	-0,9	7,9	-3,6	7,4
	Mayo	2,0	6,3	-0,1	5,4	-0,7	3,5
	Junio	1,2	5,4	-4,1	6,7	-3,4	4,4

Tabla 18. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 3

A pesar de contar con valores para el sesgo y para el error medio cuadrático que rozan el límite máximo, el uso del programa queda validado para la modelización numérica del edificio. Todos los valores mensuales se encuentran por debajo de los límites establecidos por la normativa ASHRAE.

Para la validación del modelo también se ha tenido en cuenta la comparación entre el consumo energético anual real del edificio (50000kWh) y el consumo energético anual según el modelo. En el caso del modelo, el consumo estimado es de 48189,70kWh, lo que supone un 3,7% menos que el consumo real del edificio. De esta manera, también se concluye que el consumo estimado por el programa es muy similar al consumo real del edificio, por lo que sirve de referencia para calcular el porcentaje de variación en el consumo energético debido a las modificaciones que se van a realizar sobre y el edificio.

5.2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS EN EL EDIFICIO

Tras la validación del modelo numérico simulado con el programa, el último objetivo a cubrir por esta tesis es analizar la influencia de las características más destacables del edificio. La monitorización llevada a cabo en el edificio a lo largo de los años ha permitido conocer cuáles son los resultados experimentales en el edificio. La validación del modelo numérico ha ayudado a conocer características del edificio que no habían podido ser evaluadas, como son las filtraciones de aire que se producen a través de la envolvente. Por último, proponer en este apartado modificaciones sobre el planteamiento del diseño del edificio permite analizar la influencia de la multitud de singularidades que ofrece este edificio respecto del resto del parque inmobiliario actual. La orientación hacia el sol del edificio y la disposición de los aleros y los invernaderos en esa cara son determinantes para los resultados obtenidos, por lo que van a ser analizados en comparación con los resultados obtenidos en la simulación numérica del

estado actual del edificio. La presencia de una cubierta de tierra para reducir el impacto visual del edificio también es una variable a añadir en este estudio. Además, los grandes saltos de temperatura detectados durante todo el año también indican que la ventilación del edificio es completamente diferente a las de otras tendencias constructivas como el estándar Passivhaus, por lo que se ha añadido entre las características destacables y los estudios propuestos, aunque no sea una estrategia pasiva propiamente dicha.

Poder implementar propuestas alternativas en el edificio ya fue tomado como base en la fase de validación del modelo numérico, por lo que se definió de manera que las alteraciones propuestas en este apartado no supusieran cambios en el planteamiento del diseño del edificio.

Para el análisis de los resultados obtenidos se van a considerar las nuevas temperaturas interiores de los recintos, tras las modificaciones pertinentes en cada caso. La comparación de las temperaturas tras las reformas con las temperaturas originales de la simulación dan una idea más precisa de cuál es el efecto que se consigue y la influencia de cada modificación ejecutada. De esta manera, se evita el error que se arrastra de las diferencias entre el modelo simulado original y los datos experimentales tomados en el edificio.

Se van a estudiar en intervalos horarios los dos meses centrales de las estaciones de verano e invierno, por ser los más determinantes en cuanto a las temperaturas obtenidas en el interior del edificio. Como base, el estudio se va a realizar sobre todos los recintos que se monitorizaron en la realidad, aunque en función de las modificaciones propuestas en cada caso, sólo se mostrarán gráficamente los recintos en los que se observen diferencias entre el estado actual y la modificación propuesta.

También, al disponer de los resultados del consumo anual de energía para calefacción en el edificio, podemos comparar los resultados de la simulación del estado actual con los resultados obtenidos tras cada modificación. En este caso, la estrategia es cuantificar la variación en la demanda de energía que supone la implementación de cada una de las estrategias pasivas estudiadas en las simulaciones.

5.2.1. Aleros del edificio

Es el primer sistema constructivo analizado, ya que tanto en las investigaciones consultadas como en esta tesis se ha considerado que su presencia modifica los resultados y regula el comportamiento térmico de un edificio.

En el modelo simulado, los aleros de los módulos 1 y 2 se han retirado sin necesidad de modificar el resto del edificio. El nuevo frente del edificio queda enrasado con las ventanas de los invernaderos. En el caso del módulo 3, el efecto de sombreado en el edificio surge debido a la inclinación hacia el interior que tiene la propia carpintería y el vidrio, por lo que no existe un alero como tal, se trata de un retranqueo. Además, también en los módulos 1 y 2, los tragaluces del aula y del pasillo contaban con un pequeño alero en la parte sur, para la protección solar, que han sido retirados al efectuar

esta modificación. La Figura 170 muestra el modelo numérico simulado con el que se ha trabajado en esta fase del estudio, sin los aleros en los invernaderos y en los tragaluces de los módulos 1 y 2.

Figura 170. Imagen renderizada del edificio, sin los aleros en los frentes de los invernaderos y en los tragaluces de los módulos 1 y 2

Al no haberse realizado modificaciones sobre la configuración del módulo 3 del edificio, se va a llevar a cabo el análisis sobre los recintos de los módulos 1 y 2.

Comenzamos el análisis de la variante propuesta en el mes de julio, por ser el mes del verano en el que el edificio aún sigue ocupado. En el módulo 1 sólo existen dos recintos, el invernadero y el aula del edificio. La presencia del alero en la cubierta se nota claramente en las temperaturas alcanzadas en el invernadero 1, tal y como se muestra en la Figura 171 las temperaturas máximas aumentan entre 3°C y 5°C durante todos los días del mes. La causa es el aumento de radiación solar directa sobre el invernadero, y la consecuencia el aumento de temperaturas.

Figura 171. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

En el aula, el aumento de las temperaturas máximas es algo menor (1°C-3°C), gracias a que el invernadero regula la transferencia de energía térmica hacia el interior. También es debido a que, aunque se hayan retirado los aleros, la cubierta del propio invernadero sigue proporcionando sombra sobre la región interior del módulo (Figura 172).

Figura 172. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

En el módulo 2 del edificio, la orientación del frente sur está desviada unos grados hacia el este respecto del módulo 1. A esta orientación hay que sumarle que la inclinación de la cubierta y el alero es más horizontal que en el módulo anterior, por lo que el efecto del alero era mucho mayor. Así se ha constatado según los resultados de las temperaturas simuladas en este módulo, la Figura 173 muestra cómo las temperaturas máximas del invernadero aumentan entre 5°C y 8°C respecto al estado actual, debido al gran incremento en la radiación solar directa recibida por este recinto. También se observa cómo las temperaturas máximas se alcanzan una hora antes que en el estado actual ya que, como se ha nombrado, el módulo se encuentra algo girado al este y la recepción de la radiación solar se produce antes.

Figura 173. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

Aun así, nuevamente la cubierta del invernadero produce sombreamiento suficiente al espacio de la administración como para que no penetre la radiación hasta el interior. Como consecuencia, si en el recinto del invernadero se nota el aumento de las temperaturas máximas, en el recinto de la administración la temperatura aumenta 1°C, en parte también debido a la amortiguación de la entrada de energía térmica que supone el contar con un espacio intermedio entre el exterior y el interior.

Figura 174. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

Al otro lado del pasillo, encontramos la biblioteca del edificio. Aunque también se le ha retirado el alero al tragaluz del pasillo, apenas se notan cambios en la temperatura interior (Figura 175). Aunque esto también es debido a que la biblioteca se encuentra en contacto con el terreno exterior por la cara norte, que permanece a temperaturas estables mucho menores a las del ambiente a lo largo de todo el mes.

Figura 175. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

El módulo 3 del edificio no ha sufrido ningún cambio, ya que el frente sur del edificio tenía un retranqueo por lo inclinación hacia el interior de la carpintería exterior. De ahí que no se observen cambios en las temperaturas del edificio para los recintos de este módulo (Figura 176 y Figura 177).

Figura 176. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

Figura 177. Valores de temperatura en la oficina de apoyo para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado

La presencia de los aleros como elemento fijo se diseñó de forma que impidiese la radiación solar directa en el interior para los meses de verano, por lo que preveían que su función en invierno no fuese esencial en este aspecto. El modelo numérico simulado no hace más que exponer los resultados esperados, ya que las temperaturas en el invernadero y en el aula apenas varían a lo largo de todo el mes de enero (Figura 178 y Figura 179).

Figura 178. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado

Figura 179. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado

La diferente orientación del módulo 2 sí que implica un cambio en el comportamiento térmico de los recintos. La entrada durante más horas diarias de radiación solar en el invernadero provoca un aumento de las temperaturas máximas a lo largo de todo el mes. Como es lógico esta consecuencia sólo se presenta los días soleados a lo largo del periodo estudiado, siendo iguales las temperaturas a las del estado actual para los días nublados (Figura 180).

Figura 180. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado

Este aumento en las temperaturas máximas registrado en el invernadero también se traspasa levemente hacia el recinto de la administración, pero con subidas en las temperaturas máximas de sólo 1°C respecto del estado actual del edificio.

Figura 181. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado

Durante ambas estaciones del año, la presencia de los aleros en el edificio tiene una influencia notoria en las condiciones interiores del edificio. El aumento de la radiación solar directa sobre los invernaderos provoca unos aumentos en las temperaturas máximas de 5°C de media en ambas estaciones. Si en el estado actual del edificio ya se definieron las temperaturas de los invernaderos como elevadas, con una sensación térmica bastante cálida, este aumento provocado por la falta de los aleros no hace más que refrendar el efecto invernadero que se produce en estos espacios cuando la radiación solar impacta sobre ellos. Por el contrario, gracias a ellos, los recintos interiores adyacentes a ellos no sufren tantas variaciones de temperatura, manteniéndose mucho más estables a los cambios de temperaturas exteriores entre el día y la noche y entre el verano y el invierno.

En cuanto a la demanda de energía del edificio, es lógico pensar que la acumulación de energía térmica durante los días soleados debería implicar una reducción en la demanda del edificio. El resultado de esta simulación cifra en 45384,02kWh el consumo de energía para calefacción en el edificio, lo que supone una reducción del 5,2% sobre la demanda actual. No obstante, el aumento constante de temperaturas a lo largo del año también conllevaría un aumento de la demanda energética en verano. Al no disponer el edificio de sistemas de refrigeración, no es posible cuantificar la desviación total de la demanda de energía. En cualquier caso, el aumento de las temperaturas en los invernaderos durante los meses cálidos no hace recomendable la retirada de los aleros del edificio.

5.2.2. Invernaderos

Precisamente es la influencia de los invernaderos la estrategia que se quiere evaluar con la modificación propuesta en este apartado. La presencia de invernaderos provee a los edificios de espacios intermedios entre el ambiente exterior y los recintos habitables interiores, tanto en invierno como en verano. Al servir como espacio amortiguador de los cambios de temperaturas exteriores entre las estaciones, los recintos interiores muestran un patrón de temperaturas más estables a lo largo del año. Como ya se ha dicho, la premisa establecida en el edificio para evaluar estas modificaciones es

mantenerlo lo más intacto posible respecto de su estado actual. En este caso, las modificaciones se han ejecutado sobre los módulos 1 y 2, retirando los espacios acristalados de la versión real del modelo simulado y colocando en su lugar unos huecos que permitan la unificación de recintos. El haberlo realizado de cualquier otra manera habría supuesto la alteración estructural del edificio y la unificación de recintos, cuestión que se ha mantenido para que el programa evalúe por separado las condiciones térmicas de cada uno de ellos. El módulo 3 también cuenta con su propio espacio invernadero, denominado cuarto técnico, en el edificio se ha planteado un muro Trombe, y su modificación supondría un cambio total en el edificio. En esta decisión también influyó la normativa respecto a la seguridad ante incendios, ya que al ser un recinto especial, la comunicación entre éste y otros ha de realizarse mediante vestíbulo de independencia, y el requerimiento en la resistencia térmica de las particiones también es mayor que en el caso de que fuese un simple invernadero.

Por tanto, con la base original del edificio es su estado actual, se ha quitado las áreas que definían las carpinterías interiores de los invernaderos, siendo sustituidas por huecos de la misma dimensión que los cristales. En la Figura 182 se muestra la imagen del edificio con el que se ha trabajado en esta modificación, el módulo 1 cuenta con un hueco que ocupa casi la totalidad de la superficie adyacente entre los recintos. El módulo 2 ha mantenido las dimensiones originales de la carpintería, por lo que su hueco sólo ocupa la parte superior de la superficie, manteniendo un antepecho de ladrillo en la parte inferior de las mismas dimensiones que el actual. Al no haber efectuado cambios en el otro módulo del edificio, son sólo los recintos de los módulos afectados los que van a ser evaluados.

Figura 182. Imagen renderizada del edificio para la modificación propuesta, sin carpintería intermedia que separe los invernaderos del aula y la administración

La consecuencia lógica de la retirada de esta separación es la continuidad en las temperaturas de los recintos adyacentes. Aunque esto también demuestra que el programa trata correctamente los huecos verticales entre diferentes recintos.

Durante el mes de julio, el invernadero que es quien sufría unas grandes variaciones en sus temperaturas diurnas y nocturnas muestra unos cambios algo menores en su temperatura a lo largo del día (Figura 183); es el recinto del aula el que aumenta su

temperatura máxima a lo largo del día ya que carece del efecto amortiguador que tienen los invernaderos (Figura 184).

Figura 183. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

Las temperaturas se equiparan en ambos recintos, con temperaturas máximas en el aula 3°C superiores a las obtenidas según el modelo simulado del estado actual del edificio. El aula del edificio, al ser un espacio habitable sí que requeriría de un sistema de refrigeración para el verano, debido a que sus temperaturas durante la jornada laboral se encuentran por encima de la recomendación en cuanto a la temperatura operativa máxima en un recinto de un edificio.

Figura 184. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

En el módulo 2 del edificio provoca el mismo efecto, las temperaturas máximas y mínimas en el invernadero no se mueven en un rango tan amplio como en el estado actual (Figura 185).

Figura 185. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

De la misma manera, es el recinto de la administración el que, con su aumento en las temperaturas máximas (Figura 186), denota que existe una mezcla del aire entre ambos recintos.

Figura 186. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

El módulo 3 no se evalúa en esa ocasión ya que no se han realizado modificaciones, por lo que los resultados de temperaturas son iguales en ambos casos. Es de destacar la similitud en las temperaturas alcanzadas en los recintos de aula y administración respecto de las temperaturas reales medidas en la campaña de monitorización anual. Al finalizar ese análisis ya se indicó que el programa restringía algunas cuestiones en cuanto a la simulación de la influencia humana en los edificios. Durante el verano, los trabajadores del edificio mantenían las ventanas abiertas entre los recintos a fin de aumentar el caudal de aire que entraba y reducir la sensación de calor por la difusividad térmica del aire en movimiento.

Del mismo modo, también se indica que el programa no permite valorar la apertura y cierre de las ventanas los días de invierno en que la radiación solar directa es elevada. Por esto, las temperaturas resultantes durante el mes de invierno se acerca más a la realidad mostrada en el capítulo anterior que el propio modelo simulado en el estado actual.

En el invernadero, la radiación solar durante los días soleados, y el aporte de la calefacción del aula durante los días nublados, provocan que las temperaturas máximas resultantes sean menores en los días soleados, y mayores temperaturas a lo largo del día durante los días nublados (Figura 187).

Figura 187. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

En el aula, el aire caliente acumulado en el invernadero durante los días soleados aumenta la temperatura interior del recinto (Figura 188). El resto de días, un aumento del aporte de la calefacción, hasta alcanzar la temperatura de consigna, provoca que su temperatura se mantenga sin apenas cambios respecto del estado actual.

Figura 188. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

Similares consecuencia en los recintos del módulo 2 analizados en este apartado. El invernadero 2 muestra unas temperaturas mínimas elevadas unos 5°C respecto del edificio original, por el aporte de la calefacción debido al aumento de demanda energética de un volumen algo mayor (Figura 189). Como ya se ha destacado previamente, la costumbre de los usuarios de abrir las ventanas durante los días soleados provoca un igualamiento en las temperaturas resultantes en el invernadero y en la administración, tal y como se observó en la realidad.

Figura 189. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

Debido al aumento del volumen a calefactar, durante los días nublados, el recinto de administración sólo se acerca a la temperatura de consigna durante los momentos finales de las jornadas laborales. En el momento de apagar el suministro de calefacción, el recinto vuelve a temperaturas más bajas con rapidez, en parte debido a la falta de estanqueidad del edificio, ya detectada en las campañas de monitorización efectuadas. Durante los días soleados, la temperatura interior se atempera con la del invernadero, de forma similar al efecto buscado por los usuarios en la realidad.

Figura 190. Valores de temperatura en el recinto del administración para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado

En esta investigación se ha de destacar la gran variación que presenta el programa en sus resultados con los del modelo original. Del mismo modo que no parece acercarse al correcto funcionamiento en el caso de huecos horizontales, en los huecos verticales mejora sus resultados. Como consecuencia de los patrones de uso de los usuarios, los resultados simulados de temperatura se acercan al comportamiento térmico real del edificio, durante los días soleados de invierno y durante el periodo veraniego.

Por la propia configuración del edificio y por la variable usada en el cálculo de la temperatura del aire en el programa, las temperaturas son muy similares entre los recintos invernaderos y sus adyacentes.

Como en la modificación anterior, la demanda de calefacción del edificio en este supuesto es un 7,9% menor a la del edificio de referencia, con un total de 44376,58 kWh consumidos en calefacción. Esto nos lleva a pensar en la idoneidad de la ubicación de los espacios invernadero en otros tipos de edificios. La respuesta a esta pregunta es que en las regiones frías de nuestro país, donde la demanda de calefacción es mucho mayor que la de refrigeración, podría considerarse el no colocar espacios invernadero. Por el lado contrario, en las regiones templadas y cálidas de nuestro país sí se muestra clara la influencia de la presencia de los invernaderos, al reducir la transferencia de calor hacia los recintos interiores de los edificios, por lo que su colocación, en lugar de balcones abiertos, provocaría una menor demanda de refrigeración en el interior.

5.2.3. Cubierta vegetal

Esta modificación no se aprecia visualmente en el edificio, puesto que se ha ejecutado a nivel de programación, modificando las características constructivas del edificio. Las superficies del edificio con cubierta vegetal han sido sustituidas por el tipo de cubierta que se colocó en la parte superior de los tragaluces, formada por un panel sándwich con aislamiento en su cara intermedia. Se podía haber escogido cualquier otro tipo de cubierta para su sustitución, pero la mayoría de ellas hubieran supuesto un cambio mayor del deseado en el edificio, afectando a la estructura de pares y correas de madera que componen la estructura de la cubierta. Los resultados van a ser analizados sobre los recintos habitables de los módulos 1 y 2, es decir, el aula y la administración del edificio, por ser los recintos más grandes y con mayor superficie de cubierta vegetal sobre ellos.

Hay que recordar que la cubierta vegetal del edificio se ha diseñado para que sean las propias plantas de los alrededores las que la colonicen, por lo que el índice del área de hojas es prácticamente nulo (0,25 en el modelo numérico simulado). El sistema constructivo estudiado se compone en su superficie de una capa de tierra de 10 cm, sin plantas sobre él. Esta es la composición superficial real de la cubierta, y la que se ha comparado al ser sustituida por una cubierta terminada en un panel sándwich. Recordar en este momento que toda la información constructiva del edificio se encuentra en el anexo A del documento.

De los resultados obtenidos para la época de verano, se concluyen dos cuestiones relacionadas entre sí. Por un lado, referente a la comparación propuesta, la cubierta acabada con un panel sándwich con aislamiento no afecta de ninguna manera a los resultados del edificio. Las temperaturas del aire simuladas según ambos supuestos son prácticamente iguales en todos los recintos del edificio.

Figura 191. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional

Figura 192. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional

De forma complementaria, se puede concluir que la protección en un edificio por una capa orgánica no afecta de forma negativa respecto de una solución tradicional, lo que se puede tomar como una ventaja. El mantenimiento de una cubierta vegetal se asocia normalmente a un encarecimiento debido a los cuidados que requieren las plantas en él ubicadas, además de suponer un gasto continuo por el regado diario que se ha de hacer sobre ellas. La cobertura sin una vegetación definida no supone ninguno de estos gastos.

Durante el mes de enero, los resultados también son similares en ambos casos (Figura 193 y Figura 194).

Figura 193. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de enero, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional

Figura 194. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional

En las investigaciones consultadas como referencia, el ahorro que supone la colocación de una cubierta vegetal en lugar de una tradicional se cifra en torno al 20% para la demanda de refrigeración. En nuestro caso de estudio, la cubierta cuenta con escasa vegetación, lo que la convierte en una cubierta con acabado en tierra. Por tanto, la ventaja de fenómenos como la evapotranspiración por las plantas y la protección de la radiación solar directa no se dan en el edificio estudiado.

Haber adoptado la premisa de dejar que las plantas colonicen la cubierta no se ha traducido en una reducción de la demanda de energía calorífica en invierno o en verano, por lo que una de las propuestas como futura línea de investigación sería la colocación de plantas de pequeño y mediano porte en su superficie, para observar las diferencias en las condiciones térmicas del edificio que provocaría su presencia en la cubierta.

De forma paralela se ha detectado con esta modificación que, en invierno, se pierde mayor cantidad de energía por la cubierta de los tragaluces del edificio que por la cubierta vegetal. Al colocarla sobre toda la superficie de la cubierta, la demanda de energía asciende un 12,5%, hasta los 54245,95 kWh, por lo que habría que evaluar en posteriores investigaciones la respuesta de la cubierta con otro tipo de tecnología constructiva, con valores de resistencias mayores a la transferencia de calor.

5.2.4. Renovación de aire

Dado que se ha nombrado en varias ocasiones la falta de estanqueidad del edificio, era una de las modificaciones que debían ser probadas en la fase de simulación. La estanqueidad del edificio es, cuando menos, pobre en comparación con otros edificios. La propia naturaleza del diseño del edificio provoca cuestiones como la colocación de ventanas de madera correderas en el frontal de los invernaderos y en la separación con el aula y el recinto de administración. Su cierre no es estanco, si no que se realiza con un gancho. El tope entre las hojas de las ventanas es simple, sin burletes que sellen la junta, o geometrías complejas como las de rotura de puente térmico en las ventanas de aluminio. No obstante, dada la naturaleza educacional del edificio, con continuos actos y la entrada y salida de personas de diferentes edades tampoco hubiera sido eficiente si se hubiera diseñado de la misma manera que una casa Passivhaus, al no poder permanecer cerradas todo el tiempo.

Esta última es la razón por la que, en la modificación para el modelo simulado propuesto en este apartado, no se ha optado por la opción de restringir la ventilación a 0,6 renovaciones de aire por hora, como indica el estándar alemán. Hemos optado por una solución intermedia de 1 renovación de aire por hora, aceptada como una buena tasa de renovación de aire, incluso en casas ejecutadas en el clima mediterráneo bajo la premisa de comportarse como una casa pasiva.

Esta modificación afecta nuevamente a cuestiones de codificación en el programa, por lo que el edificio no sufre ningún tipo de cambio respecto de la realidad. En la realidad, podría ser llevada a cabo en el edificio, pero requeriría del cambio por completo de la carpintería. Las ventanas deberían ser practicables en su apertura, con goznes y bisagras en uno de los laterales, nunca oscilobatientes por su gran tamaño y peso. La carpintería podría seguir siendo de madera, pero las juntas y los cierres de las ventanas deberían impedir las filtraciones de aire a través de ellas mediante burletes de plástico.

Esta comparación se va a realizar sobre los recintos que tienen exposición directa o indirecta (a través de los invernaderos) hacia el exterior.

En el módulo 1 del edificio, los recintos invernadero y aula no muestra cambios importantes en sus temperaturas con esta modificación (Figura 195 y Figura 196). La reducción de la estanqueidad sólo provoca una pequeña reducción en el rango de temperaturas diario en los recintos.

Figura 195. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio

Figura 196. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio

En el caso del módulo 2 del edificio, no muestra cambios respecto del estado actual simulado (Figura 197 y Figura 198). La diferente configuración del invernadero, el alero, las ventanas a media altura y la orientación hacen que no se observen cambios en las temperaturas resultantes a lo largo del mes de julio.

Figura 197. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio

Figura 198. Valores de temperatura en el recinto del recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio

En el caso del módulo 3, sólo vamos a tener en cuenta los efectos sobre el cuarto técnico, ya que hay que recordar que, entre éste y los demás recintos del módulo se encuentra el muro Trombe, sin aperturas de ventanas. La Figura 199 tampoco indica cambios significativos, ya que en este recinto la carpintería es fija y sin aberturas, por lo que las filtraciones no son tan significativas como en el resto de invernaderos. Esta cuestión ya quedó patente en la campaña de monitorización anual del edificio, constatada con una simple visita al recinto, donde siempre al entrar se nota que es un área sin ventilación natural.

Figura 199. Valores de temperatura en el recinto del cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio

El gran cambio debido a la estanqueidad viene durante los meses gélidos. El análisis sobre las temperaturas del edificio durante el mes de enero deja claro que la mejora de la estanqueidad provocaría un aumento de las temperaturas interiores del recinto. La Figura 200 y la Figura 201 muestran claramente este aumento de temperaturas, con un aumento constante a lo largo del mes de entre 3°C y 5°C.

Figura 200. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio

Figura 201. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio

Mismo efecto en el módulo 2, aunque no con tanta intensidad como la observada en el módulo 1. Aun así, el aumento de las temperaturas es constante entre 1°C y 3°C, como se muestra en la Figura 202 y en la Figura 203.

Figura 202. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio

Figura 203. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio

El cuarto técnico del módulo 3 es el otro gran afectado del edificio. En un recinto ya de por sí poco ventilado, las temperaturas serían 5°C mayores de media en el interior del recinto. El resultado sería una sensación térmica mucho más cálida, incluso en invierno, con lo que habría que pensar si la falta de ventilación requeriría de la instalación de algún ventilador de extracción mecánica para mejorar la calidad del aire interior del recinto.

Figura 204. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio

La estrategia de reducir la ventilación del edificio a través de las filtraciones provocaría un gran cambio en las condiciones térmicas interiores a lo largo de todo el año. Las temperaturas subirían varios grados en cada recinto, por lo que habría que cambiar la estrategia de ventilación del edificio. Proponer la ventilación nocturna en verano, para disipar hacia el ambiente exterior el calor permanente sería deseable. Al mismo tiempo, durante los meses invernales, el edificio requeriría de menor gasto de calefacción al tener mayores temperaturas interiores y acumularse la energía térmica de los días soleados para su disfrute durante los días nublados del periodo invernal.

De hecho, el resultado arrojado por el programa en cuanto a la demanda de energía para calefacción es de 32411,54kWh, por lo que un ahorro del 32,8% se podría conseguir con la mejora de las filtraciones y la estanqueidad del edificio.

5.2.5. Orientación del edificio

En cuanto a la orientación del edificio, ésta es una estrategia de la que ya se habló al comenzar a recabar información sobre las estrategias pasivas para la concepción del edificio. Por ello, habría que recordar cómo las diferentes investigaciones consultadas indicaban que unos cambios de entre 10°C y 15°C respecto del sur provocaban unos cambios en el comportamiento térmico de los edificios.

Por ello, en esta modificación propuesta en el modelo simulado, vamos a proceder a girar el edificio 15 grados hacia el este y el oeste, incluida la orografía circundante. Esta opción sí que se observa en el modelo, debido a la marca del norte que provee la interfaz del programa. Sin embargo, esta modificación vuelve a ser un cambio en la programación del programa DesignBuilder, sin afectar a la configuración constructiva del edificio.

Los resultados van a ser analizados sobre los recintos que reciben la radiación solar directa y los adyacentes a ellos, que van a ser los afectados por los cambios en la orientación.

5.2.5.1. *Giro de 15 grados hacia el oeste*

Con un giro de 15 grados, la parte más afectada del edificio es el módulo 1, ya que en el estado actual se encontraba casi alineado con los ejes cardinales y, con el giro, se encuentra más expuesto a la radiación solar vespertina. Con el giro, son los otros dos módulos los que se quedan alineados con los ejes cardinales (Figura 205).

Figura 205. Imagen renderizada del edificio, con la orientación girada 15 grados hacia el oeste

En julio, el módulo 1 del edificio presenta un aumento en sus temperaturas máximas de 3°C para el invernadero y de 0,5°C para el aula (Figura 206 y Figura 207). A pesar de que la radiación solar llega más tarde cada día, también recibe más horas de radiación solar durante la tarde. El alero del módulo no fue diseñado para impedir la radiación del edificio con esta orientación, por lo que también ocurre que la caída del sol durante la tarde provoca una mayor radiación sobre el invernadero, de ahí que las temperaturas aumenten en esta magnitud.

Figura 206. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Aunque es posible que el sol de la tarde llegue a impactar ladeado sobre alguna zona del aula, las temperaturas apenas aumentan con esta nueva orientación, gracias a disponer del espacio invernadero que se encarga de amortiguar la influencia de las condiciones ambientales exteriores.

Figura 207. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

El módulo 2 del edificio apenas sufre cambios en sus temperaturas con esta nueva orientación. La alineación del edificio con respecto a los ejes cardinales le confiere una orientación completamente al sur y no se ve afectado, como en el anterior módulo, por la radiación solar de la tarde.

Figura 208. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Figura 209. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Cuestión similar ocurre en el módulo 3 del edificio, su orientación ha quedado casi completamente alineada con los ejes cardinales y no le afectan sustancialmente los cambios (Figura 210). Aun así, sí que se aprecia que las temperaturas máximas aumentan unas décimas de grado, debido a que algo de radiación solar de la tarde llega a influir sobre los resultados obtenidos, al quedar levemente orientado hacia el oeste.

Figura 210. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

El análisis del edificio para el mes de enero no tiene las mismas consecuencias, en este caso el módulo 1 del edificio presenta unas diferencias en las temperaturas máximas de apenas unas décimas de grado, tanto en el aula como en el invernadero (Figura 211 y Figura 212).

Figura 211. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Figura 212. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Es el módulo de 2 del edificio el que, al quedar alineado con los ejes cardinales, presenta cambios en sus temperaturas máximas. El aumento del impacto de la radiación solar por las tardes, durante el invierno, calienta más los recintos del módulo y provoca un aumento de la temperatura máxima de 3°C durante los días soleados para el invernadero y de 0,5°C para el recinto de administración. (Figura 213 y Figura 214).

Figura 213. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Figura 214. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

El cuarto técnico, a pesar de contar con similar alineación que el módulo 2, no presenta cambios significativos en sus temperaturas (Figura 215). La falta de alero que le proteja de la radiación también provoca que el sol llegue de forma similar con cambios en la orientación leves, como en este caso.

Figura 215. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste

Este cambio en la orientación hacia el oeste ha afectado, sobre todo, al módulo 1 del edificio que queda más expuesto al sol vespertino durante las tardes de verano. Por la misma causa, también se ha notado un aumento en las temperaturas máximas en el invernadero del módulo 2 del edificio, que pasa de una orientación sureste a una orientación sur. El aumento en las temperaturas máximas no se transmite de forma significativa más allá de los espacios invernaderos, expuestos hacia el sol, por lo que esta variación no supone un gran cambio en las condiciones interiores del edificio.

El consumo total de la caldera con esta modificación es de 47672,42 kWh, lo que supone una reducción del 1,1% respecto del consumo estimado para el estado actual del edificio.

5.2.5.2. *Giro de 15 grados hacia el este*

Tras el giro hacia el oeste del edificio, en esta ocasión se va a proceder a un cambio en la orientación de 15 grados hacia el este. De esta manera, el módulo 1 del edificio pasa a tener una orientación similar a la de los ejes cardinales y los otros dos módulos se orientan hacia el este (Figura 216). Según las investigaciones previas a esta tesis, de entre todas las variaciones hacia el sur, ésta debería ser la más desfavorable desde el punto de vista de la demanda energética del edificio.

Los recintos del edificio que se van a analizar van a ser los mismos que en el anterior caso.

Figura 216. Imagen renderizada del edificio, con la orientación girada 15 grados hacia el este

Durante el mes de julio, la modificación realizada en el modelo, con el giro de 15 grados, no se nota especialmente en el módulo 1 del edificio (Figura 217 y Figura 218). Las temperaturas siguen una evolución similar a los resultados obtenidos al realizar la simulación del estado actual. El cambio de orientación ha dejado este módulo en orientación casi completamente al sur, por lo que entre la orientación original (ligeramente sudoeste) y la actual, no ofrece cambios en su comportamiento, tal y como se recoge en la literatura consultada.

Figura 217. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

Figura 218. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

El giro del modelo simulado sí que ha afectado algo más al módulo 2. Al igual que pasaba en el anterior caso, parece que el alero de la cubierta no cubre la llegada del sol del mismo modo, por lo que las temperaturas máximas interiores del invernadero y de la administración son levemente superiores al estado actual del edificio (Figura 219 y Figura 220).

Figura 219. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

Figura 220. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

En el caso del módulo 3, la ausencia de alero en su cubierta hace que el giro de este módulo no se vea afectado por cambios en la radiación solar recibida, por lo que las temperaturas son muy similares a las obtenidas en la simulación del estado actual del edificio (Figura 221).

Figura 221. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

La comparación realizada sobre el mes de enero tampoco arroja grandes diferencias en las temperaturas obtenidas en el módulo 1 (Figura 222 y Figura 223). Al igual que ocurre con la comparación realizada sobre el mes de julio, el cambio en la orientación entre sudoeste y sur no afecta especialmente a las temperaturas interiores del edificio.

Figura 222. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

Figura 223. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

El módulo 2 queda expuesto a la orientación sudeste con este cambio, por lo que sí se muestran cambios en los resultados obtenidos para el mes de enero. Las temperaturas mínimas obtenidas en el módulo 2, tanto en el invernadero (Figura 224) como en el aula (Figura 225) a lo largo del mes son unas décimas de grado Celsius menores de forma constante. También son 2°C menores las temperaturas máximas del invernadero 2 durante los días soleados. Indica una menor radiación solar y una mayor pérdida de energía a través de la envolvente, que provoca un mayor uso de la calefacción en el edificio por tardar más tiempo en alcanzar el valor de la temperatura de consigna.

Figura 224. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

Figura 225. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

El módulo 3 del edificio, a través del análisis de las temperaturas en el cuarto técnico denota una muy pequeña variación en las temperaturas resultantes de este cambio propuesto (Figura 226). La ausencia de un elemento protector de la radiación provoca que esta modificación no afecte en gran medida a la cantidad de energía solar que llega por radiación al cuarto técnico del edificio, por lo que es casi imperceptible la disminución de la temperatura interior al realizar esta modificación.

Figura 226. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este

La modificación de la orientación del edificio afecta de forma muy leve al edificio estudiado. Durante el verano, el giro del edificio afecta levemente al alero diseñado para el módulo 2, que presenta unas temperaturas levemente más elevadas. Por la misma causa, es este módulo el que más muestras de cambio en su comportamiento presenta durante el invierno. El análisis durante el mes de enero deja visible la mayor exposición a la orientación sudeste, que en las investigaciones consultadas resultaba la que mayor demanda de energía presentaba. Como resultado, el edificio requiere de un consumo de 48922,70 kWh en calefacción, lo que representa un aumento del 1,5% respecto del consumo resultante para la configuración original del edificio.

5.2.6. Edificio sin envolvente enterrada

Como última estrategia pasiva, ya se expuso en las investigaciones consultadas que los resultados experimentales indicaban una menor pérdida de energía a través de esas superficies, debido a la gran inercia térmica del terreno, y su desfase respecto de las temperaturas exteriores de invierno y verano. Por este motivo, no se podía obviar el hecho de qué hubiera ocurrido si el edificio no se hubiera diseñado aprovechándose de la orografía exterior.

Para la modificación propuesta, en el programa se ha eliminado el bloque de componente correspondiente al terreno (Figura 227), dejando al edificio sobre un terreno llano colocado a cota de suelo de la planta de entrada del edificio. El cambio no sólo se ha realizado sobre el modelo, si no que la configuración constructiva ha cambiado. La cara norte del edificio ha sido construida en la realidad por un muro de tapial calicastro, que en este caso ha sido sustituido por una tipología de muro de ladrillo de doble hoja. Pudiendo elegir cualquier sistema constructivo, se ha escogido el mismo tipo que ya se había empleado en el edificio para los muros de las orientaciones expuestas a la intemperie, fundamentalmente en las caras este y oeste del edificio.

Al ser la cara norte del edificio la más afectada con este cambio, para este análisis se ha optado por mostrar las temperaturas en los recintos afectados por esta orientación y este cambio en la configuración constructiva. De entre los recintos estudiados experimentalmente, el aula, el pasillo y la biblioteca tienen diversas superficies en contacto con la cara norte, y ejecutadas en la realidad con ese muro de tapial calicastro que se empleó para conservar el carácter natural y biodegradable del edificio.

Figura 227. Imagen renderizada del edificio, sin la orografía exterior. Suelo a nivel de planta 0 del edificio

Durante el mes de julio, el aula queda expuesta casi por completo al ambiente exterior, por lo que sus temperaturas son levemente mayores respecto a la configuración real del edificio (Figura 228).

Figura 228. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno

Como era de esperar, el recinto más afectado por este cambio es la biblioteca, ha pasado de encontrarse protegida de las altas temperaturas exteriores por el muro de tapial a encontrarse expuesta al exterior por la cara norte del edificio. La temperatura interior de la biblioteca aumenta de forma constante entre 2°C y 3°C a lo largo de todo el mes de julio. Mientras que la temperatura del terreno durante el mes de julio ronda los 20°C, la temperatura exterior alcanza entre 35°C y 40°C, por lo que era esperable un mayor flujo de energía desde el exterior que provocase un aumento en las temperaturas interiores de la biblioteca (Figura 229).

Figura 229. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno

El pasillo del edificio también se ve afectado por ese aumento de temperaturas, aunque de forma más leve que en el caso de la biblioteca. La influencia de una temperatura mayor en todos los recintos de biblioteca y baños de la cara norte, aumenta de forma constante en unas décimas de grado centígrado las temperaturas obtenidas con esta simulación (Figura 230).

Figura 230. Valores de temperatura en el pasillo para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno

Por la razón encontrada durante el mes de julio, la exposición de la cara norte al ambiente exterior conllevaría un descenso en las temperaturas interiores de los recintos. De forma contraria, el módulo 1 presenta unas temperaturas muy similares a las obtenidas mediante la simulación del estado original (Figura 231), por lo que la consecuencia indica un mayor aporte de energía térmica por parte de la calefacción por suelo radiante del edificio.

Figura 231. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno

El análisis de las temperaturas en la biblioteca sí que indica un ligero descenso en las temperaturas del recinto (Figura 232). A pesar del mayor aporte de calefacción, era de esperar que la temperatura interior fuese levemente afectada por la exposición al ambiente exterior.

Figura 232. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno

Por la misma causa, el recinto del pasillo muestra temperaturas muy similares a las obtenidas en los resultados del edificio en su estado actual (Figura 233).

Figura 233. Valores de temperatura en el pasillo para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno

Como era de esperar, la modificación en la exposición del edificio al ambiente exterior por su cara norte implica una serie de cambios en las condiciones interiores del edificio. Las temperaturas resultantes durante el mes de julio son algo mayores en los recintos estudiados, mientras que las temperaturas durante el mes de enero son levemente menores a las resultantes del estado actual del edificio.

Esta modificación realizada sobre el edificio estudiado conlleva un aumento en el consumo de energía por calefacción. 52289,12 kwh sería el consumo en el caso de no haber optado por la solución semienterrada de la cara norte del edificio, lo que significa un aumento del 8,5% en la cantidad de energía requerida por este modelo respecto de la configuración original del edificio.

6. CONCLUSIONES

En esta tesis hemos estudiado, de manera sistemática, la influencia de las estrategias pasivas presentes en el edificio en estudio, mediante campañas experimentales y la simulación numérica del edificio.

Las conclusiones generales de este estudio son que, con la configuración constructiva actual del edificio, y en relación a sus **estrategias pasivas**:

- Sólo algunas de ellas pueden considerarse como estrategias que presenten ventajas a lo largo de todo el año. En particular, la orientación del edificio al recorrido solar, la ventilación natural del edificio y la construcción de edificios semienterrados.
- Lo habitual es que cada una de las estrategias incorporadas a un proyecto sólo resulten efectivas durante un periodo del año, o bien durante los meses cálidos o, por el contrario, durante los meses gélidos. En el edificio en estudio, en verano son adecuadas las aberturas orientadas del edificio, la prevención del sobrecalentamiento por sombreado y la cubierta con cobertura vegetal. Por el contrario, en invierno son adecuadas las estrategias que utilizan el muro Trombe, el suelo como acumulador de energía térmica y los espacios invernadero.
- En el edificio estudiado, las estrategias pasivas diseñadas consiguen que la sensación térmica se mantenga dentro de los límites establecidos por la normativa la mayor parte del tiempo.

Esta investigación se ha dividido en tres partes: diseño de la metodología experimental, recogida de datos en el edificio y diseño y simulación numérica del edificio.

En cuanto a la **metodología experimental** empleada, las conclusiones más importantes son:

- La toma de datos en la monitorización de edificios debe ser realizada en intervalos de tiempo de 10 minutos, como máximo para cumplir con la normativa actual.
- Mediante estudios de correlación de series temporales de temperatura, hemos mostrado que los instrumentos de medición pueden situarse sobre la superficie de las particiones interiores de los edificios y considerar que los datos recogidos concuerdan con la temperatura media del aire del recinto.
- La colocación de los instrumentos de medición en un edificio debe considerar la variación del ángulo solar, ya que en la campaña anual se ha comprobado cómo un termopar no expuesto al sol durante la mayor parte del año queda al descubierto en determinados periodos de otoño y primavera. Por tanto, temperaturas con errores de hasta 10°C pueden ser obtenidas por la colocación deficiente de un instrumento de medición

Partiendo de estas premisas, se han realizado las **campañas de monitorización**, de las que podemos concluir que:

- La campaña de monitorización sobre el módulo 1, compuesto por aula, invernadero y oficina resultó determinante para hallar la influencia real de cada uno de los sistemas estudiados. La presencia del alero, protector de la radiación, deja la función de las cortinas interiores en un elemento cuya única utilidad es evitar el deslumbramiento en el interior, o por razones de privacidad.
- Este alero, diseñado con una longitud que sólo permite la entrada de radiación solar en invierno, influye de forma determinante en los resultados de condiciones térmicas interiores del edificio. Las investigaciones sobre espacios invernadero en climas similares al nuestro han destacado los problemas de sobrecalentamiento durante el verano. Con la incorporación de aleros en la parte superior y los laterales de las carpinterías se solventa casi por completo este problema. De hecho, en el edificio estudiado se ha demostrado que se alcanzan valores superiores de temperatura en los invernaderos durante el invierno.
- Las cortinas presentes en el aula del edificio no tienen influencia positiva en el confort térmico a lo largo de todo el año. De hecho, durante el invierno, cerrar las cortinas del aula provoca que la temperatura interior sea 2°C menor a medio día que si estuvieran abiertas. La inserción de aislamiento multicapa en su interior tampoco muestra ninguna influencia sobre los resultados experimentales.
- Para conseguir un funcionamiento adecuado de la estrategia del suelo como acumulador de energía, se deben mantener las cortinas abiertas durante los días soleados de invierno, para permitir la entrada de la longitud de onda visible hasta el interior del edificio. La temperatura interior de los recintos es mayor cuando se permite la entrada directa del sol. Por el contrario, la presencia de cortinas corridas provoca el aumento de la temperatura sólo en la región circundante a las cortinas, presentando el resto del recinto valores menores de temperatura.
- Durante la campaña de monitorización invernada se ha comprobado que la temperatura interior de los invernaderos seguía una tendencia muy similar a la de la radiación solar. En el momento que el sol cae al atardecer, la temperatura interior se desploma de forma instantánea. Esto revela tanto la gran cantidad de energía que se acumula en los recintos, como las filtraciones del edificio que provocan su rápida pérdida de temperatura.
- La estrategia de ventilación nocturna del edificio en verano no puede ser aplicada en nuestro caso de estudio, por lo que las temperaturas interiores no disminuyen durante la noche lo suficiente como para que la temperatura interior del edificio sea menor de 25°C al comienzo del día siguiente.
- Durante el verano, la ventilación del edificio se ha de realizar durante los primeros diez minutos de ocupación del edificio. Posteriormente, las ventanas de la orientación sur deben permanecer cerradas para disminuir en un 33% el crecimiento de las temperaturas a lo largo de la jornada laboral.

- La falta de mayor cantidad de vegetación en la superficie de la cubierta provoca que, durante el verano, la temperatura en su superficie esté correlacionada con la radiación solar, con sólo una hora de desfase entre los valores máximos de radiación solar y temperatura. Aun así, es de destacar cómo una profundidad de tan solo 10 cm de tierra provoca un desfase en las temperaturas máximas entre la superficie del sustrato y su base de varias horas. Este hecho afecta al comportamiento del flujo de calor en la cubierta, ya que la relación de temperaturas entre la tierra y la temperatura ambiente provoca que el flujo de calor sea en sentido saliente durante 16 horas al día. Por tanto, la masa térmica de la tierra provoca que el elemento constructivo sea un disipador de calor del edificio cuando la temperatura ambiente aún está alcanzando los valores más altos del día.
- En invierno, la caída de lluvia sobre la cubierta provoca que las temperaturas superiores e inferiores del sustrato de tierra se igualen. Por tanto, el agua en las cubiertas vegetales provoca la pérdida del desfase térmico entre ambas caras y reduce hasta el mínimo la resistencia a la transferencia de calor a través de la envolvente del edificio.
- La colocación del muro Trombe en el edificio no tiene las consecuencias esperadas. Al situarse, entre él y el exterior, otro espacio interior no acondicionado, la radiación solar no impacta contra el vidrio del muro en toda su longitud de onda. Tal y como se ha observado en la campaña de monitorización invernal, sólo la longitud de onda visible, cuando hay una alta radiación solar directa, conlleva un aumento de temperatura en la cámara de aire del muro Trombe.
- Las temperaturas en los invernaderos sufren unos grandes cambios todo el año a lo largo del periodo diario y nocturno, con temperaturas que varían desde los 40°C como temperatura máxima y los 15°C como temperatura mínima, sólo los días en que las nubes afectan a la radiación solar se observa una reducción en las temperaturas máximas de los invernaderos.
- Durante el verano, la sensación térmica es bastante calurosa o muy calurosa durante todo el día. La poca estanqueidad del edificio vuelve a mostrarse como clave en las fluctuaciones de temperatura recogidas.
- Los espacios invernadero aíslan el edificio de las condiciones climáticas exteriores en el invierno, ya que sólo se catalogan como un poco frías a primera hora del invierno, para posteriormente aumentar su temperatura y la sensación térmica conforme sale el sol por el este del edificio.
- El diseño de los aleros queda mostrado como suficiente para los meses centrales de las estaciones de invierno y verano, sin embargo se observa cómo la variación del ángulo en el recorrido solar a lo largo del año hace que existan periodos en las estaciones intermedias de otoño y primavera en que las condiciones interiores del edificio tengan los mismos resultados en temperatura y sensación térmica que los de la estación de verano.

- La orientación del edificio hacia el sur y permitir la radiación solar hasta el interior del edificio provoca que la calefacción sólo sea necesaria durante los días laborables que resulten nublados. Dado que su periodo de ocupación también se produce sólo de día, durante los días soleados de invierno las temperaturas en el interior de los recintos alcanzan entre 25°C y 30°C sin necesidad de la ayuda de la calefacción.

Los resultados en cuanto a la **evaluación del confort térmico** son diferentes en función del **procedimiento empleado** para ello. Los procedimientos que tienen en cuenta la sensación térmica y la adaptación de la vestimenta de los usuarios a las condiciones climáticas obtienen mayores porcentajes de aceptación. El procedimiento que tiene en cuenta el valor de la temperatura no muestra porcentajes mayores al 50% de horas en que el edificio cumple con este requerimiento. De hecho, el porcentaje de horas durante el invierno y verano es cercano a 0%. Por el contrario, para los procedimientos cualitativos, los porcentajes de horas en que el edificio cumple con sus requerimientos es muy elevado durante casi todo el año, salvo en verano.

Una vez obtenidos los registros experimentales en las diferentes campañas, hemos diseñado un **modelo informático del edificio** para simular numéricamente su comportamiento térmico en función de las diferentes estrategias pasivas. Dicho modelo se ajusta a la normativa de referencia. Para validar este modelo, nos hemos centrado en las similitudes de las series temporales de temperatura entre las simulaciones numéricas y las obtenidas experimentalmente. Una vez validado el modelo, hemos podido estudiar la **influencia de los diferentes sistemas constructivos pasivos** y obtener las siguientes conclusiones:

- La presencia de los aleros en la parte superior de los invernaderos evita que las temperaturas máximas asciendan hasta valores de 45°C durante el verano y de más de 40°C durante el invierno. Esta subida en las temperaturas no sólo afecta a los invernaderos, ya que los recintos interiores también ascienden en sus temperaturas máximas entre 1°C y 2°C durante el verano.
- La retirada de los aleros conllevaría una mayor insolación en el periodo entre otoño y primavera, con lo que la demanda de calefacción hubiera descendido un 5,2%; pero el aumento de las temperaturas en verano llevaría al edificio a la necesidad de la instalación de sistemas de climatización, por lo tanto sigue siendo recomendable la instalación de los aleros dadas las condiciones climáticas del país.
- Sin la presencia de invernaderos, la temperatura en los recintos interiores sería más elevada a lo largo de todo el año. Esto conllevaría un menor gasto en calefacción, cifrado en un 7,9% según la modelización, pero las temperaturas interiores se elevarían hasta los 35°C durante el verano, por lo que serían considerados fuera de los límites de 30°C para el desarrollo de la actividad laboral, recogida en la normativa.
- La cubierta vegetal del edificio pierde todas sus propiedades características desde el momento en que no se encuentra completamente plantada y su índice de

áreas de hojas ha sido catalogado como 0,25. Por esta causa, la influencia esperada en las condiciones interiores del edificio durante los meses cálidos no se observa en ninguno de los recintos comparados. Durante los meses fríos sí que se puede concluir que la cubierta vegetal supone un mejor aislamiento para el interior que la otra tipología de cubierta tradicional encontrada en el edificio. El consumo de calefacción crecería un 12,5% en este caso, aunque está más asociada con la poca resistencia a la transferencia de calor de la cubierta tradicional que al beneficio del uso de la cubierta vegetal.

- Aunque la estanqueidad del edificio no es una estrategia pasiva de la envolvente realizada por algún sistema constructivo en concreto, se incorporó posteriormente su análisis, debido a su importancia. El cambio en las condiciones térmicas interiores del edificio en invierno es notorio. Un aumento constante de temperaturas de 5°C respecto de la situación actual responde a una reducción del 32,8% el consumo de calefacción en el edificio.
- El giro del edificio 15 grados hacia el sudeste es la que mayor demanda de calefacción supone al edificio, cifrada en un 1,5%, acompañado de una ligera bajada de temperaturas máximas en los invernaderos de los módulos 2 y 3 del edificio.
- El giro de 15 grados hacia el sudoeste supone una reducción en el consumo de calefacción del 1,1%, aunque los mayores cambios se presentan en el módulo 1 del edificio, ya que queda orientado completamente en esa orientación, lo que aumenta la recepción de radiación solar por el invernadero y aumenta las temperaturas máximas entre 3°C y 5°C para el invierno y el verano, respectivamente.
- El diseño del edificio como un edificio semienterrado conlleva un ahorro del 8,5% en el consumo de calefacción. En verano, un edificio no enterrado aumentaría la temperatura en la biblioteca en 3°C de forma constante, ya que en lugar de encontrarse con un terreno con gran inercia térmica, quedaría expuesta a las altas temperaturas exteriores. Durante el invierno, por la misma causa, al encontrarse expuesto a las condiciones climáticas exteriores, los recintos que se encuentran en la orientación norte no sufren una mayor disminución de las temperaturas gracias a un mayor uso de la calefacción, que es quien se encarga de suplir esa demanda de energía.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con el objetivo de un estudio completo del edificio, el siguiente paso sería extender la recogida de datos experimentales y el modelo informático del edificio al resto de tecnologías constructivas. En particular, puede ser de gran interés conocer el efecto real sobre el comportamiento térmico real sobre el edificio de los pozos provenzales. Así mismo, se pretender extender la metodología utilizada en esta tesis a otro tipo de edificios.

En esta tesis se ha evaluado la influencia de las estrategias pasivas en función de su configuración constructiva actual, por lo que se propone optimizar los resultados obtenidos al realizar modificaciones sobre el modelo simulado. Realizar modificaciones en cuanto a la configuración de los aleros. Programación de la ventilación del edificio antes de abrir o durante el periodo nocturno. Revisar la aportación de la cubierta vegetal con una cobertura intensiva de plantas. Son algunas de las optimizaciones que pueden otorgar un mejor conocimiento de la influencia de estas estrategias pasivas.

Sería deseable poder seguir con la implantación de sistemas de medición que sean creados de forma expresa para cada caso, en particular con los instrumentos y equipo de Arduino.

Utilizar las herramientas desarrolladas para poder predecir el comportamiento térmico del edificio y hacer las recomendaciones consecuentes.

ÍNDICE DE CALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN REALIZADA EN ESTA TESIS

Publicación

- Simulation and monitoring campaign in a sunspace, analysis of its influence over the building thermal performance. A case study. Rubén Felices Puértolas, Carmen Viñas Arrebola, Juan carlos Losada González. DYNA vol.92 - 2, pp. 209 - 213. 2017. ISSN 0012-7361.

Trabajos presentados en congresos nacionales o internacionales

- Monitorización, simulación y comparación de resultados en un espacio invernadero y su aplicabilidad a la edificación. Abstracts of the international conference on technological innovation in building. ISBN 978-84-16397-28-0.
- Monitorización, simulación y comparación de resultados en un espacio invernadero y su aplicabilidad a la edificación. International conference on technological innovation in buildings. ISBN 978-84-16397-28-0.
- General methodology applied to monitoring a building and assess its energy performance. Coinvedi 2015-book of extended abstracts. ISBN 978-84-933567-6-7.

Méritos

- Gracias a los conocimientos adquiridos durante la realización de esta tesis, en la actualidad mi vinculación con la UPM es como Técnico de Laboratorio. Las tareas que se me han encomendado es ayudar a otros investigadores en la realización de sus Trabajos Fin de Máster y Tesis Doctorales, con los instrumentos, equipos de medida y herramientas informáticas que se han empleado en esta tesis.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Abbassi, F., & Dehmani, L. (2015). Experimental and numerical study on thermal performance of an unvented Trombe wall associated with internal thermal fins. *Energy and Buildings*, 105, 119–128. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.042>
- Abbassi, F., Dimassi, N., & Dehmani, L. (2014). Energetic study of a Trombe wall system under different Tunisian building configurations. *Energy and Buildings*, 80, 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.036>
- AEMET. (2016). Agencia Estatal de Meteorología. Retrieved September 26, 2016, from <http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion>
- Aksoy, U. T., & Inalli, M. (2006). Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region, 41, 1742–1754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.011>
- Al-Temeemi, A. A., & Harris, D. J. (2004). A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates. *Energy and Buildings*, 36(3), 251–260. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.005>
- Alkaff, S. A., Sim, S. C., & Ervina Efzan, M. N. (2016). A review of underground building towards thermal energy efficiency and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 692–713. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.085>
- Allocca, C., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*, 35(8), 785–795. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00239-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00239-6)
- ANSI/ASHRAE. (2002). ASHRAE Guideline 14-2002 Measurement of Energy and Demand Savings. *Ashrae*, 8400, 170.
- Ascione, F., Böttcher, O., Kaltenbrunner, R., & Vanoli, G. P. (2015a). Methodology of the cost-optimality for improving the indoor thermal environment during the warm season. Presentation of the method and application to a new multi-storey building in Berlin. *Applied Energy*, 185. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.169>
- Ascione, F., Böttcher, O., Kaltenbrunner, R., & Vanoli, G. P. (2015b). Summer Overheating in a New Multi-storey Building in Berlin: Numerical Study for Improving the Indoor Microclimate. *Energy Procedia*, 75, 1305–1314. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.195>
- Asdrubali, F., Cotana, F., & Messineo, A. (2012). On the evaluation of solar greenhouse efficiency in building simulation during the heating period. *Energies*, 5(6), 1864–1880. <https://doi.org/10.3390/en5061864>
- Ashrae Standard. (2012). ASHRAE Standard 55-2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *Ashrae Standard*, 8400. <https://doi.org/ISSN1041-2336>

- Athienitis, A. K., & Chen, Y. (2000). The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. *Solar Energy*, 69(3), 229–237. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00052-9)
- Ayto. Pozuelo de alarcón. (2015). CREAS. Retrieved April 5, 2017, from <http://www.construction21.org/espana/contest/es/green-building-solutions-awards-2015.html#tab-building--4>
- Badescu, V., Laaser, N., & Crutescu, R. (2010). Warm season cooling requirements for passive buildings in Southeastern Europe (Romania). *Energy*, 35(8), 3284–3300. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.013>
- Badescu, V., & Sicre, B. (2003a). Renewable energy for passive house heating: II. Model. *Energy and Buildings*, 35(11), 1085–1096. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.09.004>
- Badescu, V., & Sicre, B. (2003b). Renewable energy for passive house heating: Part I. Building description. *Energy and Buildings*, 35(11), 1077–1084. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.10.001>
- Bajc, T., Todorovic, M. N., & Svorcan, J. (2014). CFD analyses for passive house with Trombe wall and impact to energy demand. *Energy and Buildings*, 98, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.018>
- Baker, P. H., & van Dijk, H. A. L. (2008). PASLINK and dynamic outdoor testing of building components. *Building and Environment*, 43(2), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.009>
- Bakos, G. C. (2003). Electrical energy saving in a passive-solar-heated residence using a direct gain attached sunspace. *Energy and Buildings*, 35(2), 147–151. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00026-9)
- Bakos, G. C., & Tsagas, N. F. (2000). Technology, thermal analysis and economic evaluation of a sunspace located in northern Greece. *Energy and Buildings*, 31(3), 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00019-5)
- Barrio, E. P. Del. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2), 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00029-7)
- Base, K. (1993). United States Air Force. *FDTD Geometries of the Visible Human, I. Introdu*, 90. Retrieved from <https://kirtlandafb.tlisolutions.net/sitedocs/PDFS/25%5C2521.PDF>
- Bataineh, K. M., & Fayez, N. (2011). Analysis of thermal performance of building attached sunspace. *Energy and Buildings*, 43(8), 1863–1868. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.030>
- Benardos, A., Athanasiadis, I., & Katsoulakos, N. (2014). Modern earth sheltered constructions: A paradigm of green engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41(1), 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.008>
- Berry, S., Whaley, D., Davidson, K., & Saman, W. (2014). Near zero energy homes - What do users think? *Energy Policy*, 73, 127–137.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.011>

- Big Ladder Software. (2014). Elements. Denver: Big Ladder Software. Retrieved from <http://bigladdersoftware.com/projects/elements/>
- Brager, G., & Dear, R. J. de. (1998). Thermal adaptation in the built environment : a literature review. *Energy and Buildings*, 27, 83–96. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00053-4)
- Cardinale, N., & Ruggiero, F. (2000). Energetic aspects of bioclimatic buildings in the Mediterranean area: A comparison between two different computation methods. *Energy and Buildings*, 31(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00005-5)
- Carmody, J., & Sterling, R. (1984). Design considerations for underground buildings. *Underground Space*, 8, 352–362.
- Castilla, M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2010). Técnicas de Control del Confort en Edificios. *Revista Iberoamericana de Automática E Informática Industrial RIAI*, 7(3), 5–24. [https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(10\)70038-8](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(10)70038-8)
- Chen, B., Chen, H. J., Meng, S. R., Chen, X., Sun, P., & Ding, Y. H. (2006). The effect of Trombe wall on indoor humid climate in Dalian, China. *Renewable Energy*, 31(3), 333–343. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.04.013>
- Chowdhury, A. A., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2008). Thermal-comfort analysis and simulation for various low-energy cooling-technologies applied to an office building in a subtropical climate. *Applied Energy*, 85(6), 449–462. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.10.001>
- Comité Técnico AEN/CTN 100. UNE-EN 15251 Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido, Asociación Española de Normalización (AENOR) (2008). Spain.
- Comité Técnico AEN/CTN 100. UNE-EN 15603 Eficiencia energética de los edificios. Consumo global de energía y definición de las evaluaciones energéticas Energy, Asociación Española de Normalización (AENOR) (2008). Spain.
- Comité Técnico AEN/CTN 81. UNE-EN ISO 7726 Ergonomía de los ambientes térmicos Instrumentos de medida de las magnitudes físicas, Asociación Española de Normalización (AENOR) (2004). Spain.
- Comité Técnico AEN/CTN 81. UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local, Asociación Española de Normalización (AENOR) (2006). Spain.
- Comité Técnico AEN/CTN 92. UNE-EN 15217. Eficiencia energética de los edificios. Métodos para expresar la eficiencia energética y para la certificación energética de los edificios, Asociación Española de Normalización (AENOR) (2009). Spain.
- Commission, E. (1986). *European passive solar handbook Preliminary edition: Basic* 242

- principles and concepts for passive solar architecture*. (T. S. Publishing, Ed.) (Trafalgar). Brussels: Trafalgar Square Publishing. Retrieved from <http://bookshop.europa.eu/en/european-passive-solar-handbook-pbCDNA10683/>
- Commission, E. (2010). Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Boletín Oficial Del Estado*, *L135*, 13–35.
- Commission, E., & Directorate-General XII for Science, R. and D. (1990). *The PASSYS project*. Brussels: BBRI. Retrieved from bookshop.europa.eu/...passys-test-cells...test.../EUNA12882ENC_001.pdf
- Components, G. (2013). [greenroofs.com](http://www.greenroofs.com). Retrieved March 7, 2017, from <http://www.greenroofs.com/Greenroofs101/components.htm>
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., ... Glazer, J. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, *33*(4), 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Dabaieh, M., & Elbably, A. (2015). Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates. *Solar Energy*, *122*, 820–833. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.005>
- Daly, D., Cooper, P., & Ma, Z. (2014). Understanding the risks and uncertainties introduced by common assumptions in energy simulations for Australian commercial buildings. *Energy and Buildings*, *75*, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.028>
- De Carli, M., & Tonon, M. (2011). Effect of modelling solar radiation on the cooling performance of radiant floors. *Solar Energy*, *85*(5), 689–712. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.012>
- De La Torre, S., & Yousif, C. (2014). Evaluation of chimney stack effect in a new brewery using DesignBuilder-EnergyPlus software. *Energy Procedia*, *62*, 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.384>
- Dear, R. J. de, & Brager, G. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, *34*(6), 549–561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- Duan, S., Jing, C., & Zhao, Z. (2016). Energy and exergy analysis of different Trombe walls. *Energy and Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.052>
- Etheridge, D. W. (2000a). Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design—instantaneous flow rates. *Building and Environment*, *35*(4), 321–337. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00021-9)
- Etheridge, D. W. (2000b). Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design—mean flow rates. *Building and Environment*, *35*(2), 111–133. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00007-4)
- Etheridge, D. W., & Sandberg, M. (1996). *Building Ventilation: Theory and Measurement* (1st ed.). Wiley.

- Fanger, P. O. (1973). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. (McGraw-Hill Inc., Ed.). New York.
- Felices, R., Viñas, C., & Losada, J. C. (2017). Análisis de la simulación y monitoreo real de un invernadero en la implicación térmica de un edificio . Un caso práctico. *DYNA*, 92, 209–213. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/8202>
- Feng, H., & Hewage, K. (2014). Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy and Buildings*, 75, 281–289. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.10.039>
- Ferre, J. A. (2010). DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN Y CONTROL PARA EDIFICIOS BIOCLIMÁTICOS EN EL MARCO DEL PROYECTO ARFRISOL. In *I Congreso sobre arquitectura bioclimática y frío solar (PSE-ARFRISOL)*. Roquetas de Mar, Almería, España.
- Fisk, W. J. (2002). How IEQ affects health, productivity. *ASHRAE Journal*, 44(5), 56–58.
- Florides, G. A., Tassou, S. A., Kalogirou, S. A., & Wrobel, L. C. (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, 73, 299–328.
- Gómez-Muñoz, V. M., & Porta-Gándara, M. A. (2003). Simplified architectural method for the solar control optimization of awnings and external walls in houses in hot and dry climates. *Renewable Energy*, 28(1), 111–128. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00014-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00014-9)
- Gómez-Muñoz, V. M., & Porta-Gándara, M. A. (2004). General model to build awnings and external walls with optimum shading interaction. *Renewable Energy*, 29(4), 605–613. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.07.003>
- Guerra-Santin, O., & Itard, L. (2010). Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption. *Building Research & Information*, 38(3), 318–338. <https://doi.org/10.1080/09613211003661074>
- Guerra-Santin, O., & Tweed, C. (2015a). In-use monitoring of buildings: An overview and classification of evaluation methods. *Energy and Buildings*, 86, 176–189. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.005>
- Guerra-Santin, O., & Tweed, C. (2015b). In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods. *Energy and Buildings*, 93, 189–207. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.042>
- Guerra-Santin, O., Tweed, C., Jenkins, H., & Jiang, S. (2013). Monitoring the performance of low energy dwellings: Two UK case studies. *Energy and Buildings*, 64, 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.002>
- Guillén-lambea, S., Rodríguez-soria, B., & Marín, J. M. (2016). Review of European ventilation strategies to meet the cooling and heating demands of nearly zero energy buildings (nZEB)/ Passivhaus . Comparison with the USA. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 561–574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.021>

- He, W., Hu, Z., Luo, B., Hong, X., Sun, W., & Ji, J. (2015). The thermal behavior of Trombe wall system with venetian blind: An experimental and numerical study. *Energy and Buildings*, 104, 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.078>
- Henninger, R. H., Witte, M. J., & Crawley, D. B. (2004). Analytical and comparative testing of EnergyPlus using IEA HVAC BESTEST E100-E200 test suite. *Energy and Buildings*, 36(8), 855–863. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.025>
- Hong, T., Buhl, F., & Haves, P. (2008). *EnergyPlus Run Time Analysis*.
- Hu, Z., He, W., Hong, X., Ji, J., & Shen, Z. (2016). Numerical analysis on the cooling performance of a ventilated Trombe wall combined with venetian blinds in an office building. *Energy and Buildings*, 126, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.016>
- Ihm, P., Krarti, M., & Henze, G. P. (2004). Development of a thermal energy storage model for EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 36(8), 807–814. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.021>
- Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia (IDAE). (2010). *Guía técnica Condiciones climáticas exteriores de proyecto. Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia (IDAE)*. Madrid: IDAE. Retrieved from <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconoci dos/Reconocidos/CondicionesClimaticas.pdf>
- Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia (IDAE). (2011a). Análisis del consumo energético del sector residencial en España. *Instituto Para La Diversificacion Y Ahorro de La Energia (IDAE)*, 76.
- Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia (IDAE). (2011b). Plan de ahorro y eficiencia energética 2011-20 (Spanish National Renewable Energy Plan (NREP) 2011-2020). *Instituto Para La Diversificacion Y Ahorro de La Energia (IDAE)*, 268. Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11905_PAEE_2011_2020._A2011_A_a1e6383b.pdf
- Ip, K., & Miller, A. (2009). Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building - The Brighton Earthship. *Renewable Energy*, 34(9), 2037–2043. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.006>
- Jaber, S., & Ajib, S. (2011). Optimum design of Trombe wall system in mediterranean region. *Solar Energy*, 85(9), 1891–1898. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.025>
- Kolokotroni, M., Gowreesunker, B. L., & Giridharan, R. (2013). Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. *Energy and Buildings*, 67, 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.011>
- Krüger, E., Suzuki, E., & Matoski, A. (2013). Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location. *Energy and Buildings*, 66, 364–372. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.035>

- Lazzarin, R. M., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260–1267. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.02.001>
- Li, Y., & Rezgui, Y. (2017). A novel concept to measure envelope thermal transmittance and air infiltration using a combined simulation and experimental approach. *Energy and Buildings*, 140, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.036>
- Liang, X., Wang, Y., & Roskilly, T. (2015). Reduce Household Energy Consumption Using Passive Methods. *Energy Procedia*, 75, 1335–1340. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.203>
- Limbachiya, V., Vadodaria, K., Loveday, D., & Haines, V. (2012). Institutional Repository Identifying a suitable method for studying thermal comfort in people's homes This item was submitted to Loughborough's Institutional Repository (<https://dspace.lboro.ac.uk/>) by the author and is made available under the. *Proceedings of 7th Windsor Conference: The Changing Context of Comfort in an Unpredictable World*.
- Littlefair, P. (2001). Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment. *Solar Energy*, 70(3), 177–185. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00099-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00099-2)
- Ltd., B. G. (2009). BREEAM. Retrieved March 29, 2017, from <http://www.breeam.es/>
- Ltd, D. S. (2000). DesignBuilder. Stroud, Gloucs. Retrieved from <https://www.designbuilder.co.uk/>
- Marinosci, C., Strachan, P. A., Semprini, G., & Morini, G. L. (2011). Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building. *Energy and Buildings*, 43(4), 853–863. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.005>
- Martinaitis, V., Zavadskas, E. K., Motuzienė, V., & Vilotienė, T. (2015). Importance of occupancy information when simulating energy demand of energy efficient house: A case study. *Energy and Buildings*, 101, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.031>
- Martínez, G., Pacheco, R., & Ordó, J. (2012). Energy efficient design of building : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 3559–3573. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.045>
- Mihalakakou, G. (2002). On the use of sunspace for space heating/cooling in Europe. *Renewable Energy*, 26(3), 415–429. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00138-0)
- Ministerio de Fomento. Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, Boletín Oficial del Estado 67137–67209 (2013). España. <https://doi.org/CTE-DB-SE>
- Ministerio de Industria Energía y Transporte. (2016a). CE3 y CE3X. Madrid. Retrieved from

<http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/procedimientos-certificacion-proyecto-terminados.aspx>

Ministerio de Industria Energía y Transporte. (2016b). HULC. Madrid. Retrieved from <https://www.codigotecnico.org/index.php/herramienta-unificada-lider-calener/index.php/es/menu-recursos/menu-aplicaciones/282-herramienta-unificada-lider-calener>

Mlakar, J., & Štrancar, J. (2011). Overheating in residential passive house: Solution strategies revealed and confirmed through data analysis and simulations. *Energy and Buildings*, 43(6), 1443–1451. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.008>

Morrissey, J., Moore, T., & Horne, R. E. (2011). Affordable passive solar design in a temperate climate : An experiment in residential building orientation. *Renewable Energy*, 36(2), 568–577. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.08.013>

Mottard, J. M., & Fissore, A. (2007). Thermal simulation of an attached sunspace and its experimental validation. *Solar Energy*, 81(3), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.07.005>

National Laboratory of the U.S. Department of Energy. (2016). OpenStudio. USA. Retrieved from <https://www.openstudio.net/>

Neila González, F. J. (2004). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. (Munilla-Lería, Ed.). Madrid.

Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719–729. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00062-7)

Nomura, M., & Hiyama, K. (2017). A review: Natural ventilation performance of office buildings in Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74(January), 746–754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.083>

Oliveti, G., Arcuri, N., De Simone, M., & Bruno, R. (2012). Solar heat gains and operative temperature in attached sunspaces. *Renewable Energy*, 39(1), 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.010>

Oliveti, G., De Simone, M., & Ruffolo, S. (2008). Evaluation of the absorption coefficient for solar radiation in sunspaces and windowed rooms. *Solar Energy*, 82(3), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.07.009>

Omrani, S., Garcia-Hansen, V., Capra, B., & Drogemuller, R. (2017). Natural ventilation in multi-storey buildings: Design process and review of evaluation tools. *Building and Environment*, 116, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.012>

Passivhaus institut. (1991a). Passivhaus. Retrieved March 29, 2017, from <http://www.passiv.de/>

Passivhaus institut. (1991b). PHPP. Retrieved from http://passivehouse.com/04_phpp/04_phpp.htm

- Pfafferott, J., Herkel, S., & Wambsganß, M. (2004). Design, monitoring and evaluation of a low energy office building with passive cooling by night ventilation. *Energy and Buildings*, 36(5), 455–465. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.041>
- Picco, M., Lollini, R., & Marengo, M. (2014). Towards energy performance evaluation in early stage building design: A simplification methodology for commercial building models. *Energy and Buildings*, 76, 497–505. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.016>
- Pisello, A. L., Cotana, F., Nicolini, A., & Buratti, C. (2014). Effect of dynamic characteristics of building envelope on thermal-energy performance in winter conditions: In field experiment. *Energy and Buildings*, 80, 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.017>
- Polion, M. V. (1985). *Los diez libros de arquitectura*. (IBERIA, Ed.) (6^a Edicion).
- Rahman, M. M., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2010). Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. *Applied Energy*, 87(10), 2994–3004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.005>
- Rempel, A. R., Rempel, A. W., Cashman, K. V., Gates, K. N., Page, C. J., & Shaw, B. (2013). Interpretation of passive solar field data with EnergyPlus models: Unconventional wisdom from four sunspaces in Eugene, Oregon. *Building and Environment*, 60, 158–172. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.006>
- Ridley, I., Clarke, A., Bere, J., Altamirano, H., Lewis, S., Durdev, M., & Farr, A. (2013). The monitored performance of the first new London dwelling certified to the Passive House standard. *Energy and Buildings*, 63, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.052>
- Roache, P. J. (1997). QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS.
- Rong, L., Nielsen, P. V., Bjerg, B., & Zhang, G. (2016). Summary of best guidelines and validation of CFD modeling in livestock buildings to ensure prediction quality. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.005>
- Saadatian, O., Sopian, K., Lim, C. H., Asim, N., & Sulaiman, M. Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6340–6351. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.06.032>
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.001>
- Samani, P., Leal, V., Mendes, A., & Correia, N. (2016). Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building. *Energy and Buildings*, 120, 30–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.055>
- Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., Mihalakakou, G., Synnefa, A., Hatzibiros, A., & Patargias, P. (2007). Investigating and analysing the energy and environmental

- performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32(9), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.11.011>
- Schakib-Ekbatan, K., Çakici, F. Z., Schweiker, M., & Wagner, A. (2015). Does the occupant behavior match the energy concept of the building? - Analysis of a German naturally ventilated office building. *Building and Environment*, 84, 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.018>
- Sharmin, T., Gül, M., Li, X., Ganev, V., Nikolaidis, I., & Al-Hussein, M. (2014). Monitoring building energy consumption, thermal performance, and indoor air quality in a cold climate region. *Sustainable Cities and Society*, 13, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.04.009>
- Shaviv, E. (1981). The influence of the orientation of the main solar glazing on the total energy consumption of a building. *Solar Energy*, 26(5), 453–454. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90225-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90225-5)
- Silva, A. S., & Ghisi, E. (2014). Uncertainty analysis of the computer model in building performance simulation. *Energy and Buildings*, 76, 258–269. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.070>
- Silva, C. M., Gomes, M. G., & Silva, M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 116, 318–325. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.012>
- Soutullo, S., Enríquez, R., Jiménez, M. J., & Heras, M. R. (2014). Thermal comfort evaluation in a mechanically ventilated office building located in a continental climate. *Energy and Buildings*, 81, 424–429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.049>
- Spanish Government. Normas Básicas de la Edificación. NBE-CT-79, Boletín Oficial del Estado 24524–24550 (1979). Spain: energy. Retrieved from <https://boe.es/boe/dias/1979/10/22/pdfs/A24524-24550.pdf>
- Spanish Government. Documento Básico HS Salubridad, Código técnico de la Edificación 144 (2009). Spain. Retrieved from <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/salubridad/DBHS.pdf>
- Spanish Government. Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, Boletín Oficial del Estado 13 (2010). Retrieved from <https://www.boe.es/boe/dias/2013/04/13/pdfs/BOE-A-2013-3904.pdf>
- Spanish Government. Documento básico HE ahorro de energía, Código técnico de la Edificación 1–70 (2013). Spain. Retrieved from <http://www.codigotecnico.org/images/stories/pdf/ahorroEnergia/DBHE.pdf>
- Spanish Government. Reglamento de instalaciones térmicas de los edificios, Pub. L. No. Royal Decree 1027/2007 (2013). Spain: MINETUR. Retrieved from <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx>

- Sparrow, E. M., & Cess, R. D. (1978). *Radiation heat transfer, augmented edition*. CRC Press.
- Staniec, M., & Nowak, H. (2011). Analysis of the earth-sheltered buildings' heating and cooling energy demand depending on type of soil. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(1), 221–235. [https://doi.org/10.1016/S1644-9665\(12\)60185-X](https://doi.org/10.1016/S1644-9665(12)60185-X)
- Strachan, P. A., & Baker, P. H. (2008). Outdoor testing, analysis and modelling of building components. *Building and Environment*, 43(2), 127–128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.008>
- Strachan, P. A., & Vandaele, L. (2008). Case studies of outdoor testing and analysis of building components. *Building and Environment*, 43(2), 129–142. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.043>
- Suárez, M. J., Gutiérrez, A. J., Pistono, J., & Blanco, E. (2011). CFD analysis of heat collection in a glazed gallery. *Energy and Buildings*, 43(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.08.023>
- Technic Comitee AEN/CTN 92. UNE-EN ISO 13790:2011 Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios, AENOR (2011). Spain.
- Thermal Energy System Specialists, L. (2016). TRNSYS. Retrieved July 5, 2016, from <http://www.trnsys.com/>
- Thomas, W. D., & Duffy, J. J. (2013). Energy performance of net-zero and near net-zero energy homes in New England. *Energy and Buildings*, 67, 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.047>
- Tibério Cardoso, G., & Vecchia, F. (2013). Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. *Journal of Construction Engineering*, 2013(2), 1–7. <https://doi.org/10.1155/2013/940386>
- Trimble. (2016). SketchUp. Sunnyvale, California, USA. Retrieved from <http://www.sketchup.com/ES>
- Tronchin, L., & Fabbri, K. (2008). Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation. *Energy and Buildings*, 40(7), 1176–1187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.012>
- U. S. Green Building Council. (2016). LEED. Retrieved March 29, 2017, from <http://www.usgbc.org/leed>
- U.S. Department of Energy (DOE). (2015). *M & V Guidelines: Measurement and Verification for Contracts*.
- U.S. Department of Energy (DOE). (2016). EnergyPlus. Retrieved June 27, 2016, from <https://energyplus.net/>
- Wall, M. (1997). Distribution of solar radiation in glazed spaces and adjacent buildings. A comparison of simulation programs. *Energy and Buildings*, 26(2), 129–135. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01026-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01026-2)

- Wang, J., Wang, S., Zhang, T., & Battaglia, F. (2017). Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations. *Energy and Buildings*, 139, 762–779. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.070>
- Wen, J., & Smith, T. F. (2002). Absorption of solar energy in a room. *Solar Energy*, 72(4), 283–297. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00107-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00107-4)
- Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2), 261–270. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00066-5)
- Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4), 353–364. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00108-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00108-1)
- Zhang, Y., & Barrett, P. (2012a). Factors influencing occupants' blind-control behaviour in a naturally ventilated office building. *Building and Environment*, 54, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.016>
- Zhang, Y., & Barrett, P. (2012b). Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building. *Building and Environment*, 50, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.018>
- Zhou, G., & He, J. (2015). Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes. *Applied Energy*, 138, 648–660. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.058>

GLOSARIO DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

ASHRAE	Sociedad americana de Ingenieros de calefacción, refrigeración y aire acondicionado
A. C. S.	Agua caliente sanitaria
ACS	Sistema de confort adaptativo
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
BLAST	Programa informático para la simulación del comportamiento del aire, predecesor de EnergyPlus
BREEAM	Método de Evaluación Medioambiental para Construcción de Edificios
CE3	Herramienta informática para calcular la calificación energética de una vivienda en España
CE3X	Herramienta informática para calcular la calificación energética de una vivienda en España
CFD	Dinámica de fluidos computerizada
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
COP 21	Conferencia Internacional de la ONU sobre el Cambio Climático
CREAS	Centro de Recursos de Educación Ambiental para la Sostenibilidad
CV	Coeficiente de variación
CVRMSE	Coeficiente de variación de la raíz cuadrada del error medio cuadrático
DEROB-LTH	Herramienta informática para la simulación energética dinámica
DOE-2	Modelo de convección del Ministerio de Energía de Estados Unidos
EN	Norma Europea
FRES	Herramienta informática para la simulación de condiciones físicas
HULC	Herramienta informática unificada para calcular el consumo y la calificación energética de una vivienda en España
IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
IES UPM	Instituto de Energía Solar
ISO	Organización Internacional de Normalización
LEED	Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental. Procedimiento de calificación energética
NBE-CT	Norma Básica de Edificación realizada por un Comité Técnico
NMBE	Error medio normalizado del sesgo
ONU	Organización de Naciones Unidas
OPUS	Equipo de recogida de datos
PCM	Material de cambio de fase
PD	Porcentaje de insatisfacción
PHPP	Programa informático para la simulación de viviendas bajo el estándar alemán PassivHaus
PMV	Voto medio estimado
PPD	Porcentaje de personas insatisfecha

PSE-ARFRISOL	Proyecto Científico-Tecnológico Singular de carácter Estratégico, aceptado por el Plan Nacional de I+D+I 2008-2012
RIM	Método para relacionar radiosidad e irradiación
RITE	Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación
SUNREP	Herramienta informática para la simulación de condiciones físicas
TARP	Programa informático para la investigación del análisis térmico, predecesor de EnergyPlus
TRNSYS	Herramienta informática para la simulación transitoria
tsbi3	Herramienta informática para la simulación y el análisis de las condiciones interiores de un edificio
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UPM	Universidad Politécnica de Madrid

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Los diez libros de arquitectura (Vitruvio). Fuente: Alianza forma.....	14
Figura 2. Arquitectura vernácula en Escandinavia. Fuente: DelToro&Antunez.....	15
Figura 3. Arquitectura bioclimática moderna en Escandinavia. Fuente: blog.arquitecturadecasas.info	16
Figura 4. Arquitectura vernácula en África y Oriente Medio. Fuente: google.es, sin referencia explícita	16
Figura 5. Ciudad de Masdar, Abu Dabi. Fuente: Foster&partners.....	17
Figura 6. Arquitectura tradicional en climas templados (casa de campo en Inglaterra y patio cordobés). Fuente: google.es, sin referencia explícita.....	17
Figura 7. Arquitectura moderna en la Comunidad de Madrid. Fuente: 100x100 madera y Telefónica	18
Figura 8. Arquitectura tradicional y moderna en Indonesia. Fuente: google.es, sin referencia explícita	18
Figura 9. Recorrido solar en Madrid (solsticio de invierno). Fuente: Elaboración propia	19
Figura 10. Hemiciclo solar, orientación sureste a la izqda. y noroeste a la dcha. Fuente: RuizLarrea.com	20
Figura 11. Efecto de la radiación solar sobre muros y ventanas. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 12. Vivienda estudiada en Grecia. Fuente: Bakos y Tsagas	24
Figura 13. Primer Muro Trombe experimental. Fuente: google.es, sin referencia explícita	26
Figura 14. Principio de funcionamiento del Muro Trombe clásico. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 15. Diferentes sistemas constructivos que pueden formar el Muro Trombe. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 16. Identificación de los elementos del edificio que están sujetos a la radiación solar directa Fuente: De Carli y Tonon	31
Figura 17. Líneas isotermas en el suelo según los cuatro modelos, para la insolación a una hora determinada. Fuente: De Carli y Tonon	32
Figura 18. Distribución de presión interior y exterior por flotabilidad (a), para dos aberturas en vertical (b) y para una abertura (c). Fuente: Allocca	35
Figura 19. Casas enterradas en latitudes cálidas (izqda.) y frías (dcha.). Fuente: google.es, sin referencia explícita.....	37
Figura 20. Sección constructiva y temperatura del terreno en casa semienterrada en Brighton. Fuente: Elaboración propia	38
Figura 21. Patios de viviendas enterradas. Izqda: John Barnard. Fuente: ArtTattler.com. Dcha: B. Soo Cho Fuente: Dwell.com	39
Figura 22. Parlamento de India y solución habitacional de Marsella. Fuente: Le Corbusier. Wikipedia.org	41

Figura 23. Árboles de hoja caducifolia para la reducción de la radiación solar en Sevilla (izqda.) y futura torre en Suiza de Stefano Boeri (dcha.). Fuente: google.es, sin referencia explícita (izqda.) Stefano Boeri (Dcha.)	41
Figura 24. Cobertura sobre lucernarios en CC Vaguada (Madrid). Fuente: Elaboración propia	43
Figura 25. Diferentes tipos de cobertura vegetal para una cubierta. Fuente: google.es, sin referencia explícita	45
Figura 26. Distribución de la radiación solar: General (izqda.), sobre una superficie pulida (centro) y sobre una superficie rugosa (dcha.). Fuente: Elaboración propia.....	55
Figura 27. Mecanismos de transferencia de calor según las condiciones del sistema. Fuente: Elaboración propia.....	56
Figura 28. Esquema general de la transferencia de calor en un edificio. Fuente: Elaboración propia.....	57
Figura 29. Propuesta de banda de confort para el estándar adaptativo (ACS), aplicable a edificios con ventilación natural. Fuente: Elaboración propia	63
Figura 30. Tendencias del Consumo Energético (ktep) del Sector Residencial en España. Fuente: IDAE	66
Figura 31. Ubicación del Aula de Educación Ambiental de Pozuelo de Alarcón. Fuente: Google maps	87
Figura 32. Alzado frontal del edificio CREAS. Fuente: Elaboración propia.....	88
Figura 33. A la izqda., vista del espacio invernadero y del Muro Trombe. A la dcha., cara interior del Muro Trombe y sus aberturas (cerradas por una puerta de madera en la foto). Fuente: Elaboración propia.....	89
Figura 34. Vista del aula del edificio. Debido a la construcción de un alero en el frente exterior, el sol alcanza el suelo de forma directa sólo en invierno. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 35. Aperturas en el techo, en diferentes zonas del pasillo. Fuente: Elaboración propia.....	90
Figura 36. Vista del muro de tapial calicastro, con tongadas de 15-20 cm. Fuente: Elaboración propia.....	91
Figura 37. A la izqda., incidencia de la radiación solar en verano al exterior del aula. A la dcha., radiación solar directa impactando en las cortinas del aula. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 38. Cubierta vegetal del edificio, con especies autóctonas. Fuente: Elaboración propia.....	92
Figura 39. A la izqda., tomas de aire para la ventilación en verano. A la dcha., tomas de aire en el invernadero. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 40. Tubos de vacío solar en el exterior del edificio. Fuente: Elaboración propia.....	93
Figura 41. Proceso constructivo del forjado sanitario del edificio. Fuente: Elaboración propia.....	94
Figura 42. Estructura del edificio realizada con muros de ladrillo, pilares de madera y muro de tapial calicastro. Fuente: Elaboración propia	94

Figura 43. Tabiques interiores del edificio en ladrillo, BTC y paneles de madera. Fuente: Elaboración propia.....	95
Figura 44. Imágenes de la casa térmica donde se ensayaron los instrumentos de medida. Fuente: Elaboración propia.....	102
Figura 45. Ubicación de los termopares con los que se realizó esta fase del trabajo. Fuente: Elaboración propia.....	104
Figura 46. Desviación media absoluta de los resultados obtenidos aplicando diferentes periodos de monitorización	105
Figura 47. Valores de temperatura recogidos en las posiciones T6 y T8 durante la semana de estudio	107
Figura 48. En gris, módulo 1 del edificio, estudiado en esta campaña de monitorización	114
Figura 49. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m.)	114
Figura 50. A la izqda. efecto de sombreamiento producido por el alero en el edificio, a mediodía en el mes de Julio. A la dcha. imagen del aula del edificio, con sensores termopares ubicados en diferentes posiciones.....	115
Figura 51. Imagen de la oficina en estudio, con varios termopares colocados a una altura intermedia del recinto	115
Figura 52. Condiciones térmicas y de radiación durante la monitorización de julio de 2014	116
Figura 53. Condiciones térmicas del invernadero adyacente al aula y la oficina.....	117
Figura 54. Condiciones térmicas en los recintos estudiados del edificio	117
Figura 55. Evolución de la temperatura durante el horario de apertura, en días laborables	118
Figura 56. Evolución de la temperatura durante el mismo horario de apertura, en días festivos.....	118
Figura 57. Relación entre las temperaturas alcanzadas en el invernadero con el aula y la oficina, en días laborables	119
Figura 58. Valores de las temperaturas y coeficiente de variación en la oficina, para los días laborables	119
Figura 59. Plano y sección del edificio, con la ubicación de los sensores colocados para este análisis	121
Figura 60. Valores de temperatura en el invernadero y en la zona acristalada de los recintos aula y oficina.....	122
Figura 61. Ubicación de los sensores y valores de temperatura a una altura de 1,5m., para la semana en estudio	123
Figura 62. En el aula, valores de PMV y PPD durante las horas de ocupación del edificio.....	124
Figura 63. En la oficina, valores de PMV y PPD durante las horas de ocupación del edificio.....	125
Figura 64. Modelo adaptativo aplicado al aula del edificio, durante los días en estudio	126

Figura 65. Modelo adaptativo aplicado a la oficina del edificio, durante los días en estudio.....	126
Figura 66. En porcentaje, número de horas de apertura del edificio con resultados dentro de los límites establecidos para cada procedimiento	127
Figura 67. Colocación de aislamiento por la parte intermedia de las cortinas	128
Figura 68. Diferencias visibles entre cortinas con y sin aislamiento	128
Figura 69. Disposición de termopares k durante el periodo de estudio en: Izqda.) Oficina y Dcha.) Aula.....	129
Figura 70. Disposición de anemómetro de hilo caliente para medir velocidad de aire en sentido vertical, en el aula.	129
Figura 71. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m)	130
Figura 72. Monitorización del módulo estudiado en invierno, periodo con las cortinas del aula sin aislamiento.....	131
Figura 73. Monitorización del módulo estudiado en invierno, periodo con las cortinas del aula con aislamiento	132
Figura 74. En invierno, condiciones térmicas de los recintos estudiados, las cortinas del aula sin aislamiento	132
Figura 75. En invierno, condiciones térmicas de los recintos estudiados, las cortinas del aula con aislamiento	133
Figura 76. Situación de los sensores de temperatura para este análisis (altura de 1,5m)	133
Figura 77. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 23 de enero de 2015	134
Figura 78. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 24 de enero de 2015	134
Figura 79. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 5 de febrero de 2015	135
Figura 80. Evolución de la Temperatura en zona de ventanas el día 1 de febrero de 2015	135
Figura 81. Ubicación, en plano y en la realidad, del anemómetro de hilo caliente usado en el análisis	136
Figura 82. Velocidad vertical del aire, registradas los días: a) 23 de enero y b) 24 de enero. Periodo de estudio: Sin aislamiento.....	137
Figura 83. Velocidad vertical del aire, registradas los días: a) 1 de febrero y b) 5 de febrero. Periodo de estudio: Con aislamiento.....	137
Figura 84. Plano y sección del edificio, con la ubicación de los sensores colocados para este análisis (igual al de la campaña de verano).....	138
Figura 85. Valores de temperatura en el invernadero y en la zona acristalada de los recintos aula y oficina, cortina sin aislamiento.....	139
Figura 86. Disposición de los termopares para la elaboración del mapa de temperatura en los recintos	140

Figura 87. Valores de temperatura a una altura de 1,5 m, con cortinas abiertas por la mañana el día 23, y cerradas todo el día 24.....	141
Figura 88. Valores de temperatura a una altura de 1,5 m, con cortinas cerradas todo el día 1, y abiertas por la mañana el día 5	141
Figura 89. Vista exterior e interior del tragaluz abierto en la parte posterior del aula .	142
Figura 90. En el aula, valores de PMV y PPD durante las horas de jornada laboral, para los días en estudio.....	143
Figura 91. En la oficina, valores de PMV y PPD durante las horas de jornada laboral, para los días en estudio.....	143
Figura 92. Modelo adaptativo aplicado al aula del edificio, durante los días escogidos	144
Figura 93. Modelo adaptativo aplicado a la oficina del edificio, durante los días escogidos	144
Figura 94. En porcentaje, número de horas de apertura del edificio con resultados dentro de los límites, para los días estudiados	145
Figura 95. Cubiertas del edificio. A la izquierda, en primavera. A la derecha, en otoño	146
Figura 96. Remarcada en diagonal, cubierta monitorizada en el módulo 3 del edificio	147
Figura 97. Ubicación de los termopares en la cubierta.....	147
Figura 98. Proceso de colocación de los termopares en la cubierta, a dos alturas	148
Figura 99. Valores recogidos durante el periodo en estudio de la cubierta de tierra....	149
Figura 100. Durante el día 23 de mayo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas	150
Figura 101. Durante el día 26 de mayo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas	151
Figura 102. Ubicación de los termopares en la campaña de monitorización	152
Figura 103. Valores recogidos durante el periodo en estudio de la cubierta de tierra..	153
Figura 104. Durante el día 12 de marzo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas	154
Figura 105. Durante el día 19 de marzo, valores de temperatura en cada una de las capas estudiadas	155
Figura 106. Vista del muro Trombe desde el exterior del edificio.....	157
Figura 107. Plano esquemático de la situación de los sensores (cotas en metros).....	157
Figura 108. Prototipo del sistema empleado, probado en laboratorio previamente	158
Figura 109. Ubicación de los termohigrómetros en la cámara de aire del muro Trombe	158
Figura 110. Datos tomados durante la campaña de monitorización del muro Trombe, con la radiación solar global como variable física externa.....	159
Figura 111. Datos tomados durante la campaña de monitorización del muro Trombe, con la radiación solar directa como variable física externa.....	159
Figura 112. Temperatura media en la cámara de aire del muro Trombe, con la radiación solar directa y la temperatura ambiente como variables físicas externas	160

Figura 113. Temperatura medida en el cuarto técnico, la cámara de aire del muro Trombe y la radiación solar directa, durante los días estudiados	161
Figura 114. Temperatura medida en el cuarto técnico, la cámara de aire del muro Trombe y la oficina adyacente al muro Trombe, durante los días estudiados.....	162
Figura 115. Comportamiento térmico del muro Trombe a diferentes horas del día 15 de febrero de 2016.....	163
Figura 116. Ubicación de los sensores de temperatura empleados en la monitorización. Fuente: Elaboración propia.....	165
Figura 117. Ubicación de los termopares en las posiciones 1 (izqda.) y 2 (dcha.). Fuente: Elaboración propia.....	166
Figura 118. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1	168
Figura 119. Plano esquemático de la ventilación natural forzada del edificio y entrada de aire exterior. Fuente: Elaboración propia	169
Figura 120. Valores de temperatura recogidos durante la semana en que se puso en funcionamiento el sistema	169
Figura 121. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1	170
Figura 122. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1	170
Figura 123. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 1	171
Figura 124. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2.....	172
Figura 125. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2	172
Figura 126. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2	172
Figura 127. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 2	173
Figura 128. Valores de temperatura recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3	174
Figura 129. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3	174
Figura 130. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3	175
Figura 131. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de julio de 2015 en el módulo 3	175
Figura 132. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1	176

Figura 133. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1	176
Figura 134. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1	177
Figura 135. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 1	177
Figura 136. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2.....	178
Figura 137. Ubicación del sensor termopar de la biblioteca y radiación solar sobre la biblioteca durante el mes de octubre de 2015.....	179
Figura 138. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2	179
Figura 139. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2.....	179
Figura 140. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 2	180
Figura 141. Valores de temperatura recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3.....	180
Figura 142. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3	181
Figura 143. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3.....	181
Figura 144. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de octubre de 2015 en el módulo 3	181
Figura 145. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1	182
Figura 146. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1	183
Figura 147. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1	183
Figura 148. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 1	184
Figura 149. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2.....	184
Figura 150. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2	185
Figura 151. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2.....	185

Figura 152. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 2	186
Figura 153. Valores de temperatura recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3	186
Figura 154. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3	187
Figura 155. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3	187
Figura 156. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de enero de 2016 en el módulo 3	187
Figura 157. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1	188
Figura 158. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1	188
Figura 159. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1	189
Figura 160. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 1	189
Figura 161. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2	190
Figura 162. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2	190
Figura 163. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2	190
Figura 164. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 2	191
Figura 165. Valores de temperatura recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3	191
Figura 166. Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3	192
Figura 167. Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3	192
Figura 168. Porcentaje de horas en las que las condiciones del edificio se encuentran dentro de los límites establecidos por el RITE y la norma UNE-EN ISO 7730, recogidos durante el mes de abril de 2016 en el módulo 3	192
Figura 169. Imagen renderizada del edificio CREAS obtenida con el programa DesignBuilder. Fuente: Elaboración propia	194
Figura 170. Imagen renderizada del edificio, sin los aleros en los frentes de los invernaderos y en los tragaluces de los módulos 1 y 2	200

Figura 171. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	200
Figura 172. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	201
Figura 173. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	201
Figura 174. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	202
Figura 175. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado	202
Figura 176. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	203
Figura 177. Valores de temperatura en la oficina de apoyo para el mes de julio, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	203
Figura 178. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	203
Figura 179. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	204
Figura 180. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado.....	204
Figura 181. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al retirar los aleros en el modelo simulado	205
Figura 182. Imagen renderizada del edificio para la modificación propuesta, sin carpintería intermedia que separe los invernaderos del aula y la administración	206
Figura 183. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	207
Figura 184. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado.....	207
Figura 185. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	208
Figura 186. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	208
Figura 187. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	209
Figura 188. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado.....	209
Figura 189. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	210
Figura 190. Valores de temperatura en el recinto del administración para el mes de enero, al retirar la carpintería intermedia en el modelo simulado	210
Figura 191. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional.....	212

Figura 192. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional	212
Figura 193. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de enero, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional	213
Figura 194. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la cubierta vegetal por una tradicional	213
Figura 195. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio.....	215
Figura 196. Valores de temperatura en el recinto del aula para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio	215
Figura 197. Valores de temperatura en el recinto del invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio.....	215
Figura 198. Valores de temperatura en el recinto del recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio	216
Figura 199. Valores de temperatura en el recinto del cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la estanqueidad del edificio.....	216
Figura 200. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio	217
Figura 201. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio	217
Figura 202. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio	217
Figura 203. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio.....	218
Figura 204. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la estanqueidad del edificio	218
Figura 205. Imagen renderizada del edificio, con la orientación girada 15 grados hacia el oeste	219
Figura 206. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	220
Figura 207. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	220
Figura 208. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	221
Figura 209. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	221
Figura 210. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	221
Figura 211. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	222
Figura 212. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	222

Figura 213. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	223
Figura 214. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	223
Figura 215. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el oeste	223
Figura 216. Imagen renderizada del edificio, con la orientación girada 15 grados hacia el este	224
Figura 217. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	225
Figura 218. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	225
Figura 219. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	225
Figura 220. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	226
Figura 221. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de julio, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	226
Figura 222. Valores de temperatura en el invernadero 1 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	226
Figura 223. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	227
Figura 224. Valores de temperatura en el invernadero 2 para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	227
Figura 225. Valores de temperatura en el recinto de administración para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	228
Figura 226. Valores de temperatura en el cuarto técnico para el mes de enero, al cambiar la orientación del edificio 15 grados hacia el este	228
Figura 227. Imagen renderizada del edificio, sin la orografía exterior. Suelo a nivel de planta 0 del edificio	229
Figura 228. Valores de temperatura en el aula para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno	230
Figura 229. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno	230
Figura 230. Valores de temperatura en el pasillo para el mes de julio, al ubicar el edificio sobre el terreno	231
Figura 231. Valores de temperatura en el aula para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno	231
Figura 232. Valores de temperatura en la biblioteca para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno	232
Figura 233. Valores de temperatura en el pasillo para el mes de enero, al ubicar el edificio sobre el terreno	232

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Escala de sensación térmica de siete niveles	60
Tabla 2. Categorías de ambiente térmico	62
Tabla 3. Tolerancia de aceptación de la calibración.....	86
Tabla 4. Relación de equipamiento e instrumentación utilizada durante la monitorización.....	98
Tabla 5. Instrumentos de medición empleados en cada fase de trabajo	98
Tabla 6. Características del termopar k	99
Tabla 7. Características del anemómetro de hilo caliente	99
Tabla 8. Características del OPUS 20TCO	100
Tabla 9. Características del termohigrómetro DHT22	100
Tabla 10. Características del piranómetro Kyyp&Zonen CMP3	100
Tabla 11. Características del sensor de temperatura y humedad exterior Dwyer RHRS	101
Tabla 12. Valores promedios de Temperatura (°C), desviación estándar (°C) y coeficiente de correlación de Pearson en las posiciones estudiadas, por semana y para cada día en estudio.....	106
Tabla 13. Porcentaje de horas con un coeficiente de correlación de Pearson mayor que 0,95	107
Tabla 14. Caracterización de los periodos a lo largo del año	112
Tabla 15. Campañas de monitorización llevadas a cabo	113
Tabla 16. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 1	196
Tabla 17. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 2	197
Tabla 18. En %, valor mensual de los coeficientes NMBE y CVRMSE en los recintos del módulo 3	198

ANEXO A. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA Y CARACTERIZACIÓN CONSTRUCTIVA DEL EDIFICIO EN ESTUDIO

Architectural section drawing of a building. The section shows a sloped roof and internal structural elements. Dimensions are indicated: 4,15 (total height), 3,56 (height to the start of the slope), 3,15 (height of the vertical section), 2,52 (height of the lower section), 4,34 (height of the upper section), and 1,94 (height of the sloped section). Two human figures are shown for scale. To the right, a perspective view of the building is shown, labeled 'A'.

266

Figura A. 3. Sección B del edificio, vista de administración, pasillo y biblioteca

Figura A. 4. Sección C del edificio, vista de cuarto técnico, oficina de apoyo, pasillo y aseo

Memoria constructiva de las soluciones constructivas para cerramiento, particiones y ventanas.

Figura A. 5. Memoria constructiva de los cerramientos, particiones y ventanas

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
Mortero de cal	2	1,00	0,9
1 pie de ladrillo	24	0,35	0,9
Aislamiento de corcho	6	0,036	0,9
Cámara aire	5	0,025	0,025
Placa yeso	1,5	0,15	0,9

Tabla A. 1. Características constructivas del cerramiento exterior (M1)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
Filtro antirraíces	0,05	0,06	0,9
Aislamiento de corcho	6	0,036	0,9
Lámina impermeable	1	0,70	0,9
Tapial calicastro	40	0,52	0,9

Tabla A. 2. Características constructivas del cerramiento enterrado de tapial calicastro (M2)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
Mortero de cal	2	1,00	0,9
1 pie de ladrillo	24	0,35	0,9
Mortero de cal	2	1,00	0,9

Tabla A. 3. Características constructivas del cerramiento interior de ladrillo enfoscado (M3)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
1 pie de ladrillo BTC	24	0,35	0,9

Tabla A. 4. Características constructivas del cerramiento interior de ladrillo visto (M4)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Listones de madera y aire	5	0,025	0,025
Tablero OSB	2	0,13	0,9

Tabla A. 5. Características constructivas de las particiones de madera (M5)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
SGG STADIP CLEAR 44-1	0,8	1	0,84

Tabla A. 6. Características constructivas de los vidrios interiores y de los vidrios exteriores de los invernaderos (V1)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²K)	Emisividad
SGG PLANICLEAR 6mm	0,6	1	0,84
Argón	1,2	-	-
SGG COOL-LITE ST 408 4+4mm	0,8	1	0,14

Tabla A. 7. Características constructivas de los vidrios interiores de los invernaderos (V2)

Memoria constructiva de las cubiertas del edificio

Figura A. 6. Memoria constructiva de las cubiertas

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²k)	Emisividad
Tierra	10	0,52	0,9
Fieltro antirraíces	0,05	0,06	0,9
Espacio acumulador agua	5	0,025	0,025
Lámina impermeable	1	0,70	0,9
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Aislamiento de corcho	6	0,036	0,9
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Cámara aire	30	0,025	0,025
Aislamiento lana de roca	4	0,035	0,9
Placa yeso	1,5	0,15	0,9

Tabla A. 8. Características constructivas de la cubierta vegetal (C1)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²k)	Emisividad
Acabado metálico	0,5	273	0,9
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Aislamiento de corcho	6	0,036	0,9
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Cámara aire	30	0,025	0,025
Aislamiento lana de roca	4	0,035	0,9
Placa yeso	1,5	0,15	0,9

Tabla A. 9. Características constructivas de las cubiertas de los tragaluces (C2)

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m²k)	Emisividad
Mortero con fibras	2	1,00	0,9
Listones de madera y aire	5	0,025	0,025
Tablero OSB	2	0,13	0,9
Cámara aire	50	0,025	0,025
Mortero con fibras	2	1,00	0,9

Tabla A. 10. Características constructivas de las cubiertas de los aleros (C3)

Memoria constructiva para la solera del edificio y para el suelo de la planta de entrada

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m ^{°k})	Emisividad
Solera hormigón	20	2,5	0,9

Tabla A. 11. Características constructivas de la solera de hormigón del edificio

Material	Espesor (cm)	Conductividad (W/m ^{°k})	Emisividad
Baldosa barro cocido	10	0,40	0,9
Arena con suelo radiante	10	0,52	0,9
Aislamiento térmico	3	0,04	0,9
Losa hormigón	20	0,70	0,9

Tabla A. 12. Características constructivas del forjado sanitario

Figura A. 7. Sección constructiva A del edificio

Figura A. 8. Sección constructiva B del edificio

LEYENDA

ANEXO B. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA CAMPAÑA ANUAL DE MONITORIZACIÓN DEL EDIFICIO

I. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de junio de 2015

Figura B. 1 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 1

Figura B. 2 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 1

Figura B. 3 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 1

Figura B. 4 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 2

Figura B. 5 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 2

Figura B. 6 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 2

Figura B. 7 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 3

Figura B. 8 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 3

Figura B. 9 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2015 en el módulo 3

II. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de agosto de 2015

Figura B. 10 Valores de temperatura recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 1

Figura B. 11 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 1

Figura B. 12 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 1

Figura B. 13 Valores de temperatura recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 2

Figura B. 14 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 2

Figura B. 15 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 2

Figura B. 16 Valores de temperatura recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 3

Figura B. 17 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 3

Figura B. 18 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de agosto de 2015 en el módulo 3

III. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de septiembre de 2015

Figura B. 19 Valores de temperatura recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 20 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 21 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 22 Valores de temperatura recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 23 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 24 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 25 Valores de temperatura recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 26 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 27 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de septiembre de 2015 en el módulo 3

IV. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de noviembre de 2015

Figura B. 28 Valores de temperatura recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 29 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 30 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 31 Valores de temperatura recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 32 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 33 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 34 Valores de temperatura recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 35 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 36 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de noviembre de 2015 en el módulo 3

V. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de diciembre de 2015

Figura B. 37 Valores de temperatura recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 38 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 39 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 1

Figura B. 40 Valores de temperatura recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 41 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 42 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 2

Figura B. 43 Valores de temperatura recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 44 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 3

Figura B. 45 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de diciembre de 2015 en el módulo 3

VI. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de febrero de 2016

Figura B. 46 Valores de temperatura recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 1

Figura B. 47 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 1

Figura B. 48 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 1

Figura B. 49 Valores de temperatura recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 1

Figura B. 50 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 2

Figura B. 51 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 2

Figura B. 52 Valores de temperatura recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 3

Figura B. 53 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 3

Figura B. 54 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de febrero de 2016 en el módulo 3

VII. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de marzo de 2016

Figura B. 55 Valores de temperatura recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 56 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 57 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 58 Valores de temperatura recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 59 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 60 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 61 Valores de temperatura recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 3

Figura B. 62 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 3

Figura B. 63 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de marzo de 2016 en el módulo 3

VIII. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de mayo de 2016

Figura B. 64 Valores de temperatura recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 65 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 66 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 1

Figura B. 67 Valores de temperatura recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 68 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 69 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 2

Figura B. 70 Valores de temperatura recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 3

Figura B. 71 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 3

Figura B. 72 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de mayo de 2016 en el módulo 3

IX. Resultados del comportamiento térmico y del confort térmico durante el mes de junio de 2016

Figura B. 73 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 1

Figura B. 74 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 1

Figura B. 75 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 1

Figura B. 76 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 2

Figura B. 77 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 2

Figura B. 78 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 2

Figura B. 79 Valores de temperatura recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 3

Figura B. 80 Valores de sensación térmica media de los usuarios (PMV), recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 3

Figura B. 81 Valores del porcentaje de personas insatisfechas (PPD) en cada recinto, recogidos durante el mes de junio de 2016 en el módulo 3

ANEXO C. MODELIZACIÓN DEL EDIFICIO CON EL PROGRAMA DESIGNBUILDER

El programa DesignBuilder trabaja con tres tipos de bloques como herramientas de definición de la geometría que se desea dibujar: Bloque de contorno, bloque de componente y bloque de edificio. Todos los bloques se definen a partir de una forma genérica en planta, con referencias de la plantilla en dos dimensiones con el plano del edificio (AutoCad) o a partir de referencias en coordenadas cartesianas. La conversión del bloque a tres dimensiones se lleva a cabo con la inserción de una magnitud de altura que extruye el bloque hasta una altura determinada. El bloque de contorno sirve para diseñar una forma genérica, sin clasificación de uso o tipología, que permite la definición de formas complejas de edificio a través de herramientas de cortes por planos, sustracciones y adiciones de varios bloques. Una vez definida la forma del bloque que se desea crear, es posible conferirle la entidad de bloque de contorno o de bloque de edificio, en función del bloque generado. El bloque de componente se utiliza para definir los elementos del modelo que no se han de insertar como parte del edificio, asignando esta característica a elementos de sombreado, edificios adyacentes sin interés o el propio terreno del modelo simulado. Por último, el bloque de edificio es aquel al que posteriormente se le va a definir con multitud de parámetros para su correcta modelización: sistemas constructivos empleados, división interna en recintos, diseño de las carpinterías del edificio, tipo de uso de los recintos, cuantificación de los parámetros de uso el recinto, etc...

Para realizar una correcta modelización del edificio, se tomaron los planos del proyecto (Anexo A) como bases para la definición geométrica del edificio (Figura C. 1).

Figura C. 1. Modelo final del edificio. Fuente: Elaboración propia

Se comenzó por la creación de un bloque de contorno con las características volumétricas del terreno circundante al edificio. Al volumen resultante se le sustrajo, con la referencia de la plantilla de AutoCad, el volumen que ocupa la parte bajo rasante del edificio que se ha simulado (Figura C. 2).

Figura C. 2. Bloque de contorno del terreno. Fuente: Elaboración propia

Con ayuda de la misma plantilla, se dibujó el contorno del edificio. En primer lugar se definió la forma del espacio ocupado por el forjado sanitario y la solera del edificio (Figura C. 3). El recinto del cuarto técnico cuenta con doble altura y huecos registrables en el muro, para acceder a la zona bajo el forjado sanitario, por lo que se previó en el modelo cortando ese volumen del resto del bloque.

Figura C. 3. Bloque de contorno del volumen ocupado bajo rasante. Fuente: Elaboración propia

Por último, con la ayuda de la plantilla se definió el volumen útil del edificio (Figura C. 4). Para explicar su compleja geometría de forma abreviada, se comenzó por la definición de cada una de las plantas de los módulos por separado, a los que se cortó su parte superior mediante planos inclinados para coincidir con la inclinación de la cubierta en cada módulo. Se unieron entre sí junto con los tragaluces del edificio, realizados aparte desde la cota de suelo. Adyacentes al volumen del edificio, se dibujaron los aleros de los invernaderos y los tragaluces, ya que desde el inicio se planificó poder experimentar con la modificación en el comportamiento térmico al ser suprimidos.

Figura C. 4. Bloque de contorno del volumen de la planta ocupada del edificio. Fuente: Elaboración propia

El resultado del edificio es el mostrado en la Figura C. 5, donde los bloques de contorno ya han sido modificados por bloques de componente adiabático para los aleros y por bloque de componente de terreno para el suelo. El bloque del edificio no cuenta con ventanas ya que no ha sido definido todavía.

Figura C. 5. Bloques de contorno convertidos a bloques de componente y de edificio. Fuente: Elaboración propia

Una vez dibujada la forma exterior del edificio, se puede dividir interiormente por recintos. Sin necesidad de partir el edificio, se dibujan las particiones interiores con ayuda de la propia herramienta del programa. A los volúmenes resultantes el programa les propone nombres por defecto, que luego son cambiados de forma que concuerdan con los nombres reales, y con la numeración correspondiente al termopar que se ubicó para realizar la monitorización del edificio (del 1 al 10). En la figura anterior también se advierte que el edificio no cuenta con ventanas, que se dispondrán posteriormente ajustándose a la realidad.

Figura C. 6. Particiones interiores del edificio. Fuente: Elaboración propia

El árbol resultante del dibujo, distingue las entidades entre el nombre del edificio, los recintos interiores y los bloques de componente. También, para cada recinto, la función de adyacencia automática del programa determina cuál es el tipo de entidad de las superficies de la envolvente interior de cada recinto (Figura C. 7).

Figura C. 7. Árbol de recintos del programa

Una vez dibujada la forma interior de los recintos, se dibuja en cada superficie el espacio ocupado por huecos, puertas y ventanas (Figura C. 8).

Figura C. 8. Imagen del edificio. Fuente: Elaboración propia

Los parámetros son diferentes para cada recinto, en el modelo han de ser insertados todos los detalles en cuanto a actividad, cerramientos, control de las aberturas, iluminación y climatización. Se muestran los parámetros para el aula en la Figura C. 9 y la Figura C. 10.

Figura C. 9. Parámetros de actividad y cerramientos en el aula

Figura C. 10. Parámetros de las aberturas, iluminación y calefacción en el aula

En cuanto a la actividad del edificio, se han insertado en cada recinto los siguientes parámetros.

Tipo de zona	Estándar
Ocupación	0,2 personas/m ² si ocupado 0 personas si no ocupado
Consignas de temperatura para calefacción	21,5 °C para zonas calefaccionadas Desactivado para zonas no calefaccionadas
Consigna de temperatura para refrigeración	Desactivada en el edificio

Tabla C. 1. Parámetros de actividad en el edificio

Los cerramientos han sido definidos en función de su posición y adyacencia automática, de acuerdo a las propiedades de los materiales descritas en el Anexo B de esta tesis.

En el proceso de ajuste del comportamiento térmico a la realidad, la renovación de aire ha quedado establecida como 3 renovaciones de aire por hora en los invernaderos, 0,05 renov/h en el muro Trombe y el subsuelo, y 1 renovación de aire por hora en el resto de recintos.

Las aberturas han sido definidas en función de su posición, tal y como se describe en el Anexo A de esta tesis. La apertura de ellas ha sido insertada por defecto con un 0% de porcentaje de área abierta respecto del total. La única modificación ha sido introducida en el aula, por la apertura casi continuada de uno de los huecos oscilobatientes que la unen con el invernadero, el cual representa el 10% de la superficie acristalada.

Los tragaluces del módulo 3, situados sobre los baños y vestuarios, tienen en ambos extremos unas lamas de plástico orientables para su apertura. Sin embargo, en ningún momento fueron abiertas a lo largo del periodo de monitorización. Estos elementos provocaron problemas en cuanto a la creación del modelo con el programa, ya que la programación considera que las rejillas exteriores en un edificio tienen un coeficiente de descarga de 0,6. Tal y como se ha constatado en la literatura previa, este coeficiente corresponde con el de un hueco abierto, lo que en ningún caso se parece al efecto causado en el edificio. La solución más aproximada a la realidad pasó por considerar que esos huecos no existen, aunque se insertó una subsuperficie de plástico para simular la transferencia de calor a través de un material lo más parecido a la realidad. Ésta es la modificación más conflictiva realizada en el modelo respecto de la realidad del edificio, pero dado que el programa empleado tiene una parametrización limitada, era necesario ajustarlo a la realidad lo máximo posible.

En cuanto a la iluminación, ha sido introducido un valor de $9,9\text{W/m}^2$ de iluminación fluorescente suspendida en los recintos aula, administración, biblioteca y oficina de apoyo. El resto de recintos no necesita de aporte lumínico por su nula ocupación o por la luz natural que entra por los tragaluces. De acuerdo con la jornada laboral del edificio, esta iluminación sólo se ha considerado encendida durante las horas de apertura. Debido a las condiciones lumínicas naturales, el calendario de encendido de la iluminación se establece entre noviembre y marzo.

Por las mismas causas, la calefacción se ha considerado encendida durante las horas laborables entre el 27 de noviembre y el 15 de marzo, mientras que la caldera ha estado activa entre el 15 de octubre y el 31 de marzo. La energía térmica aportada por la caldera ha sido introducida como energía miscelánea en el cuarto técnico. La calefacción se ha introducido como suelo radiante en los recintos habitables del edificio.

La geolocalización del sitio donde se ubica el edificio, en Pozuelo de Alarcón, también ha sido insertada en el modelo. Así como la característica de encontrarse resguardado a la exposición del viento. En cuanto a las características del terreno, han sido modificadas de acuerdo a las referencias sobre la temperatura media del terreno en Madrid, las temperaturas superficial y profunda del archivo climático del programa, la recomendación expresada en la propia guía del programa, por la cual el terreno bajo un edificio se encuentra un dos grados por debajo de la temperatura ambiente del interior. Los valores, consignados entre 18°C y 21°C para cada mes del año, también concuerdan con la anomalía térmica que sufre el terreno al encontrarse bajo un edificio, tal y como se ha recogido en varias referencias consultadas en el capítulo del estado actual del conocimiento de esta tesis.