



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TESIS DOCTORAL

Análisis metodológico y experimental de
modelos térmicos de edificios existentes

Methodological and experimental
analysis of thermal models of existing
buildings

Anàlisi metodològic i experimental de
models tèrmics d'edificis existents

Autor:

Víctor Pérez Andreu

Directores de Tesis:

Carolina Aparicio Fernández

José Luis Vivancos Bono

Mayo 2023

Agradecimientos

A mi familia por su incondicional apoyo en el proceso de esta tesis.

A los amigos y compañeros que me han animado y ayudado.

A mis directores de tesis, Carola y José Luis, por su continuo consejo.

Resumen

El panorama de cambio climático y de escasez de recursos energéticos fósiles exige un cambio urgente de los modelos de habitar. Para la adaptación de los edificios a este cambio de paradigma es necesario reducir el impacto energético de su utilización. Alcanzar este objetivo necesita bases metodológicas contrastadas y herramientas útiles y eficaces.

La tesis de investigación desarrolla y analiza tres metodologías para la caracterización del comportamiento térmico de los edificios existentes. Estas metodologías consideran el empleo de técnicas de monitorización térmica y simulación energética, diferentes escenarios futuros de cambio climático y el empleo de tecnologías de escaneado térmico tridimensional, para la creación y el ensayo predictivo de modelos térmicos de edificios. Cada una de estas metodologías ha sido aplicada a un caso de estudio diferente. Los ensayos de simulación que se han realizado, junto a los análisis y las discusiones de los resultados que hemos obtenido, han permitido conocer el alcance de cada una de estas metodologías. Los dos primeros casos del estudio caracterizan el comportamiento térmico de edificios tradicionales en un clima mediterráneo, así como comportamientos futuros bajo diferentes escenarios de cambio climático. El tercer caso ensaya una metodología de monitorización que incluye la utilización de modelos termográficos tridimensionales que proporciona un mayor rendimiento operacional en los procesos de modelado energético y nuevas opciones de calibración de los modelos térmicos de edificios.

Abstract

Climate change and the scarcity of fossil energy resources require an urgent change in the way we live. In order to adapt buildings to this paradigm shift, it is necessary to reduce the energy impact of their use. Achieving this objective requires proven methodological bases and useful and effective tools.

The thesis research develops and analyzes three methodologies for characterizing the thermal behavior of existing buildings. These methodologies consider the use of thermal monitoring and energy simulation techniques, different future climate change scenarios and the use of three-dimensional thermal scanning technologies, for the creation and predictive testing of thermal models of buildings. Each of these methodologies has been applied to a different case study. The simulation tests that have been carried out, together with the analyzes and discussions of the results have allowed us to know the scope of each of these methodologies. The first two cases of the study characterize the thermal behavior of traditional buildings in a Mediterranean climate, as well as future behavior under different climate change scenarios. The third case tests a monitoring methodology that includes the use of three-dimensional thermographic models that provide greater operational performance in energy modeling processes and greater possibilities for calibrating the thermal models of buildings.

Resum

El canvi climàtic i d'escassetat de recursos energètics fòssils exigeixen un canvi urgent dels models d'habitar. Per a l'adaptació dels edificis a aquest canvi de paradigma és necessari reduir l'impacte energètic de la seua utilització. Aconseguir aquest objectiu necessita bases metodològiques contrastades i eines útils i eficaces.

La tesi d'investigació desenvolupa i analitza tres metodologies de caracterització del comportament tèrmic dels edificis existents. Aquestes metodologies consideren l'ús de tècniques de monitoratge tèrmic i simulació energètica, diferents escenaris futurs de canvi climàtic i l'ús de tecnologies d'escanejat tèrmic tridimensional, per a la creació i l'assaig predictiu models tèrmics d'edificis. Cadascuna d'aquestes metodologies ha sigut aplicada a un cas d'estudi diferent. Els assajos de simulació que s'han realitzat, al costat de les anàlisis i les discussions dels resultats que hem obtingut, han permés conèixer l'abast de cadascuna d'aquestes metodologies. Els dos primers casos de l'estudi caracteritzen el comportament tèrmic d'edificis tradicionals en un clima mediterrani, així com comportaments futurs baix diferents escenaris de canvi climàtic. El tercer cas assaja una metodologia de monitoratge que inclou la utilització de models termogràfics tridimensionals que proporciona un major rendiment operacional en els processos de modelatge energètic i majors possibilitats de calibratge dels models tèrmics d'edificis.

Índice

	Pag.
Resumen	5
Abstract	7
Resum	
Índice de tablas.	15
Índice de figuras.	17
1. INTRODUCCIÓN.	21
1.1. <i>Impacto energético de los edificios.</i>	21
1.2. <i>Control del consumo energético de los edificios.</i>	22
1.3. <i>Cambio climático y consumo energético de edificios.</i>	25
1.4. <i>Simulación de modelos energéticos de edificios.</i>	30
1.5. <i>Técnicas termográficas.</i>	37
2. OBJETIVO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.	39
2.1. <i>Metodología general de la investigación.</i>	40
2.1.1. Procedimiento estándar para el ensayo las demandas energéticas y de confort en las zonas térmicas de los edificios existentes.	40
2.1.2. Proyecciones climáticas regionales a largo plazo en la simulación energética de edificios.	41
2.1.3. Metodología T-BIM para la simulación energética de edificios.	42
3. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO Y SÍNTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.	43
4. COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS EN CLIMA MEDITERRÁNEO.	45
4.1. <i>Metodología del estudio.</i>	45
4.1.1. Creación de modelos térmicos.	46
4.1.2. Mediciones y monitorizaciones.	46
4.1.3. Software de simulación.	47
4.1.4. Análisis de resultados.	48
4.2. <i>Caso de estudio nº 1.</i>	50
4.2.1. Descripción del edificio.	50
4.2.2. Descripción del modelo as-is BEM.	51
4.3. <i>Resultados y discusión.</i>	57
4.3.1. Resultados de calibración.	57
4.3.2. Demanda energética.	58
4.3.3. Confort térmico.	60

4.3.4. Discusión.	65
4.4. Conclusiones.	67
5. DEMANDA ENERGÉTICA EN EL CAMBIO CLIMÁTICO MEDITERRÁNEO.	69
5.1. Metodología del estudio.	69
5.1.1. Generación de datos meteorológicos mediante la modelización de escenarios.	69
5.2. Caso de estudio nº 2.	74
5.2.1. Tipo de edificio.	76
5.2.2. Modelo energético del edificio.	79
5.3. Resultados y discusión.	83
5.3.1. Variación climática.	83
5.3.2. Efectos sobre la demanda de energía.	87
5.4. Conclusiones.	94
6. METODOLOGÍA AS-IS T-BIM PARA LA CARACTERIZACIÓN TÉRMICA.	99
6.1. Metodología del estudio.	99
6.1.1. Recogida de datos.	101
6.1.2. Creación de modelos térmicos.	105
6.1.3. Simulación y calibración de modelos.	107
6.1.4. Análisis de resultados.	109
6.2. Caso de estudio nº 3.	111
6.2.1. Descripción del edificio.	111
6.2.2. Modelado as-is STD.	116
6.2.3. Modelado as-is T-BIM.	117
6.3. Resultados y discusión.	122
6.3.1. Geometría de los modelos.	122
6.3.2. Calibración de modelos.	123
6.3.3. Ensayos predictivos.	128
6.4. Conclusiones.	143
7. CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.	147
7.1. Síntesis de resultados.	147
7.2. Futuras líneas de trabajo.	149
REFERENCIAS	151

Índice de tablas.

	Pag.
Tabla 1. Resumen de investigaciones sobre los impactos del cambio climático en la demanda de energías de calefacción y de refrigeración de edificios. Elaboración propia.	28
Tabla 2. Datos experimentales empleados en la calibración y validación del modelo as-is BEM del caso de estudio nº 1. Valores medios mensuales de temperatura y humedad.	57
Tabla 3. Datos calculados por simulación del as-is BEM calibrado y validado del caso de estudio nº1: valores medios mensuales de temperatura y humedad.	58
Tabla 4. Demanda energética y nº horas de climatización anual de los modelos A, B, C y D, del caso de estudio nº1.	60
Tabla 5. Valores promedio de PMV para diferentes zonas (cocina, habitaciones de uso diurno y nocturno) para cada uno de los modelos diseñados del caso de estudio nº 1.	62
Tabla 6. Descripción de Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs) consideradas en la investigación.	72
Tabla 7. Valor U de transmitancia térmica (W/m^2K) y nivel de infiltración (50 Pa cambios de aire (1/h)) para los modelos del edificio considerado en el caso de estudio nº 2.	78
Tabla 8. Áreas de paredes y ventanas de los diferentes modelos del caso de estudio nº 2.	82
Tabla 9. Diferencia promedio mensual para la temperatura del bulbo seco, en períodos 2048-2052 y 2096-2100 en escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y Vías de concentración Representativas RCP4.5 y RCP 8.5 en comparación con el "Escenario Base".	86
Tabla 10. Parámetros utilizados en los modelos analizados en el caso de estudio nº 2.	88
Tabla 11. Porcentaje de ahorro de energía en comparación con el escenario base (en los períodos 2048-2052 y 2096-2100) para escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y para Vías de Concentración Representativas RCP4.5 and RCP 8.5.	91
Tabla 12. Criterios estadísticos de calibración aplicados en la investigación.	108

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

Tabla 13. Características térmicas y constructivas de los elementos de envolvente y de distribución de las salas del edificio (zonas térmicas del modelo) del caso de estudio nº 3.	113
Tabla 14. Servicios de instalaciones disponibles en las zonas del edificio del caso de estudio nº 3.	115
Tabla 15. Valores geométricos de los modelos as-is STD y T-BIM, para cada una de las zonas. (1) Porcentaje de concordancia superficial de zonas entre los modelos del caso de estudio nº 3.	122
Tabla 16. Valores de entrada y resultados para el cálculo del valor U del recinto exterior (sala O1 del caso de estudio nº 3).	125
Tabla 17. Indicadores de comparación de simulaciones de temperaturas para los modelos calibrados as-is STD y as-is T-BIM con los datos de monitorización de la sala O1 del caso de estudio nº 3.	127
Tabla 18. Demandas anuales de simulación de modelos as-is STD y T-BIM para año TMY 2007-2021, caso de estudio nº 3.	131
Tabla 19. Flujos de aire de entrada y salida de elementos de contorno calculados mediante simulación CTF para las 17 h del 19 de noviembre, en la sala O1, y acoplados la simulación de prueba CFD, en el caso de estudio nº 3.	136

Índice de figuras.

	Pag.
Figura 1. Fases de la investigación y casos de estudio de la tesis.	39
Figura 2. Modelo as-is BEM del edificio construido con la utilidad Trnsys3D para SketchUpn en el caso de estudio nº 1. a) Fachadas sur y este b) Fachada norte y oeste	51
Figura 3. Zonificación del modelo base con tres áreas diferentes, cocina, zonas de uso diurno y nocturno en planta baja, y bajo cubierta en primera planta solo con un único espacio no climatizado, en el caso de estudio nº 1	55
Figura 4. Valores de PPD para diferentes zonas climatizadas en el edificio (cocina, y zonas de uso diurno y nocturno) en cada uno de los diferentes modelos predictivos calculados caso de estudio nº 1.	61
Figura 5. Valores de PPD y PMV para el Modelo A en diferentes zonas (cocina, uso diurno y nocturno) para caso de estudio nº 1.	63
Figura 6. Valores de PPD y PMV para el Modelo B en diferentes zonas caso de estudio nº 1.	63
Figura 7. Valores de PPD y PMV para el Modelo C en diferentes zonas caso de estudio nº 1.	64
Figura 8. Valores de PPD y PMV para el Modelo D en diferentes zonas caso de estudio nº 1.	64
Figura 9. Modelos de casas y secuencias utilizadas en el caso de estudio nº 1.	75
Figura 10. Plano esquemático de planta baja y primera del edificio del caso de estudio nº 2.	77
Figura 11. Temperatura media mensual del bulbo seco (DBT) para el escenario base, en dos períodos: 2048-2052 y 2096-2100 en los siguientes escenarios: a) CNRM-CM5 y RCP4.5; b) CNRM-CM5 y RCP8.5; c) MPI-ESM-LR y RCP4.5; d) escenario MPI-ESM-LR y RCP8.5.	85
Figura 12. Número de grados-hora de calefacción (rojo) y refrigeración (azul) en un año, Uso de temperaturas de consigna (20 oC y 26 oC) para los periodos a) 2048-2052 y b) 2096-2100, de acuerdo con los escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y las Vías de Concentración	87

- Figura 13. Demanda anual de energía para el Escenario Base y diferentes modelos en una ventana de 2048 a 2052 de acuerdo con los siguientes escenarios: CNRM-CM5 y RCP4.5; CNRM-CM5 y RCP8.5; MPI-ESM-LR y RCP4.5; and MPI-ESM-LR y RCP8.5 (caso de estudio nº 2). 90
- Figura 14. Demanda anual de energía para los diferentes modelos del caso de estudio nº 2, en el período 2096-2100, para el Escenario Base y para los siguientes escenarios: CNRM-CM5-RCP4.5; CNRM-CM5 - RCP8.5; MPI-ESM-LR - RCP4.5; y MPI-ESM-LR - RCP8.5. 93
- Figura 15. Esquema de los procedimientos y resultados de la investigación aplicada al caso de estudio nº 3. 100
- Figura 16. Nube de puntos térmica as-is 3D-T del caso de estudio nº 3: a) Perspectiva del bloque de las cinco zonas térmicas del ; b) Vista interior de una zona térmica. 103
- Figura 17. a) Escáner geométrico y térmico 3D; b) Perspectiva de una de las salas del caso de estudio nº 3; c) Detalle de los objetivos para la lectura de los parámetros Tref y ϵ . 104
- Figura 18. Modelos del caso de estudio nº 3: a) Modelo T-BIM, con temperaturas superficiales, en visor propio. b) Modelo GBXML incluye propiedades de elementos de la envolvente, presentado con el visor de DesignBuilder. 106
- Figura 19. Planos generales del bloque de cinco salas del caso de estudio nº 3: a) Distribución y b) Vista de sección. 112
- Figura 20. Vistas de modelos gbXML del caso de estudio nº 3 con la interfaz de visualización de DesignBuilder V.6. a) modelo as-is STD; y b) modelo as-is T-BIM. 117
- Figura 21. Serie de ortoimágenes horarias de la pared occidental Sala O1 del caso de estudio nº 3, correspondientes al día 19 de noviembre del año 2021: a) 9:00h, b) 10:00 h, c) 11:00 h, d) 12:00 h, e) 13:00 h y f) 14:00 h. 120
- Figura 22. Ortoimágenes termográficas obtenidas de la nube de puntos térmicos 3D, del caso de estudio nº 3, con temperaturas reales calculadas: a) Superficie interior de la pared oeste de la sala O1; b) Superficie interior de la pared sur de la sala O1. La paleta de colores cambia con la temperatura, con pasos de 0,4 °C. 121
- Figura 23. Resultados de simulación y temperaturas medias superficiales de monitorización del muro exterior y el

	suelo, de la Sala O1, del caso de estudio nº 3, el 19/11/21.	126
Figura 24.	Temperaturas ambientales de monitorización y simulaciones as-is STD y T-BIM de la sala O1 del caso de estudio nº 3, los días 18, 19 y 20/11/2021.	127
Figura 25.	Promedio de temperaturas diarias del aire interior de todas las zonas del caso de estudio nº 3, de acuerdo con los resultados de simulación de los modelos as-is STD y as-is T-BIM, y <i>temperatura exterior media diaria del año meteorológico típico TMY 2007-2021</i> utilizado en las simulaciones de ambos modelos.	129
Figura 26.	Ganancias energéticas medias mensuales obtenidas por BEPS de los dos modelos, as-is STD y as-is T-BIM del caso de estudio nº 3, para un año TMY 2007-2021.	131
Figura 27.	Demanda mensual de calefacción y refrigeración de los modelos, as-is STD y as-is T-BIM para el caso de estudio nº 3, para un TMY 2007-2021.	132
Figura 28.	Valores horarios de los parámetros de confort de Fanger para la sala O1 del caso de estudio nº 3, los días 18, 19 y 20 de noviembre de año TMY 2007-2021: a) PMV y b) PPD.	134
Figura 29.	Modelos de habitación O1 del caso de estudio nº 3, malla de dominio, ventilaciones de entrada y salida de aire (en color rojo, difusores de 4 y 2 vías, y filtraciones en marcos de ventanas): a) as-is STD, y b) as-is T-BIM.	136
Figura 30.	Valores de temperatura superficial de los elementos de contorno vinculados para la prueba de simulación CFD a las 17:00 h del 19 de noviembre, en la sala O1 del caso de estudio nº 3: a) as-is STD, y b) as-is T-BIM.	137
Figura 31.	Mapas de valor de temperatura en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Temperaturas con modelo as-is STD, b) Temperaturas con modelo as-is T-BIM, y c) Resolución punto a punto de las diferencias de temperatura entre los dos modelos.	139
Figura 32.	Mapas de valor PPD en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Mapa PPD con modelo as-is STD, b) Mapa PPD con modelo as-is T-BIM,	

y c) Resolución punto a punto de las diferencias entre mapas PPD de los dos modelos. 140

Figura 33. Mapas de valor PMV en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Mapa PMV con modelo as-is STD, b) Mapa PMV con modelo as-is T-BIM, y c) Resolución punto a punto de las diferencias entre mapas PMV de los dos modelos. 142

1. Introducción.

La reducción del impacto energético de los edificios es una cuestión de gran importancia estratégica, económica y medioambiental para la sociedad. Actualmente la regulación relacionada con la construcción es muy exigente, al establecer la creación de edificios de consumo energético casi nulo.

1.1. Impacto energético de los edificios.

La demanda de energía mundial tendrá un crecimiento aproximado del 37% hasta 2040 en relación con los niveles de la primera década del siglo XXI, siendo la eficiencia energética una herramienta fundamental para aliviar la presión del suministro de la energía que será necesaria [1]. La reducción del 20% del consumo total de energía primaria fue foco de una estrategia de la Unión Europea (UE) para el año 2020. Posteriormente la UE ha establecido el objetivo de reducir el consumo de energía primaria y final en un 32.5% para 2030. El impacto del consumo energético de los edificios de Europa se ha evaluado en aproximadamente un 40% del total de energía primaria consumida, lo que convierte al sector de la construcción en responsable del 36% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). La atención prestada a la eficiencia energética en los edificios es creciente en los últimos años, siendo la consecución de mayores objetivos de ahorro uno de los principales retos a los que nos enfrentamos. Los Estados miembros de la UE están obligados a adoptar acciones específicas para explotar el potencial de ahorro de energía derivado del sector de la construcción, siendo el objetivo final que todos los Estados miembros cuenten con un parque inmobiliario altamente eficiente desde el punto de vista energético y descarbonizado antes de 2050 [2-5].

El parque inmobiliario de España experimentó un crecimiento sin precedentes, especialmente entre los años 1960 y 2001. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [6] un alto porcentaje de los hogares

en España, el 70%, vive en bloques de viviendas, el 33% de estas fueron construidas antes de 1980 y, por lo tanto, no tuvieron ningún requisito específico de eficiencia y ahorro energético. Se sabe que las medidas de eficiencia energética de los edificios pueden producir ahorros significativos para los consumidores [7]. El número de edificios construidos antes de 1980 rehabilitados entre 2009 y 2013 representa solo el 0.62% del total de edificios en España. Desafortunadamente, estos edificios se diseñaron sin garantizar un nivel mínimo de calidad de construcción, en términos de comodidad y eficiencia energética, o basándose en regulaciones insuficientemente restrictivas [8]. De esta forma, en España, el impacto ambiental directo e indirecto de la edificación puede resumirse en las siguientes cifras: entre 33 y 42% del consumo de energía primaria (la mitad se destina a climatización); entre el 35 y el 50% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el 40% del consumo de recursos minerales; el 50% de la generación de los residuos sólidos y el 18% del consumo total de agua [9].

De forma más detallada, el uso final de la energía más importante en los edificios residenciales se destina a su climatización, representando un 68% de la energía primaria consumida por este sector. En algunos países como Malta, Chipre y Portugal, la cuota de calefacción de espacios está por debajo del 30% y justo por debajo del 50% en España o Eslovenia. La preparación del agua caliente sanitaria ocupa el segundo lugar con un 13% del consumo energético en los hogares. Los electrodomésticos están teniendo una mayor importancia y representan hoy el 12% a nivel de la UE. La cocina representa el 5% del total y la iluminación el 2% [5]. Finalmente, el consumo de energía por m² en todos los servicios de los edificios es heterogéneo, en la mayoría de los países se consume entre 200 y 300 kWh por m² [3].

1.2. Control del consumo energético de los edificios.

La regulación de la eficiencia energética de los edificios impone limitaciones cada vez más restrictivas con el objetivo

de reducir los elevados niveles de consumo energético. De forma progresiva se vienen imponiendo requisitos energéticos cada vez más exigentes y que actualmente, en el espacio de la Unión Europea, guían la construcción de edificios de consumo energético casi nulo [10]. En el caso de España, la primera normativa que buscaba mejorar el desempeño energético de los edificios se publicó en 1979 y surgió como resultado de la crisis del petróleo de 1973 (NBE-CT-79 - Condiciones Térmicas en los Edificios) [11]. Desafortunadamente, esta normativa simplemente estableció un conjunto de soluciones constructivas aceptables, sin definir un protocolo para controlar la calidad de la envolvente del edificio, por lo que no especificó un objetivo para reducir el consumo de energía. Posteriormente, se introdujo la transposición en España de la Directiva Europea 2002/91/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios mediante las normativas dispuestas en el Real Decreto (RD) 314/2006 - Código Técnico de la Edificación (CTE) [13], el RD 1027/2007- Instalaciones térmicas en los Edificios (RITE) [14] y el RD 47/2007 - Protocolo de Certificación de Eficiencia Energética (CPE) para nuevos edificios [15]. La misión de estas nuevas normas era regular todos los parámetros de la construcción y definir los límites energéticos y los pasos a seguir para la certificación energética de las nuevas construcciones [13,14]. Esta situación puso en el punto de mira al parque edificatorio existente, por su enorme consumo energético y sus emisiones de GEI [16]. Con el foco puesto en el continuo aumento de la demanda de nueva edificación residencial hasta el año 2001, ha sido más recientemente cuando ha existido una legislación española específica en materia de rehabilitación de edificios. Estos cambios en el marco regulatorio intentan dar respuesta a los requisitos de la Directiva Europea 2010/31/UE [17], que establece que todos los edificios de titularidad pública y privada deben contar con un certificado de eficiencia energética para ser vendidos o alquilados y ser Edificios de Consumo de Energía Casi Cero (*Nearly zero-emission*

Building, NZEB) a partir de los días 31 de diciembre de los años 2018 y 2019, respectivamente.

En base a un estudio del stock de edificios existente en España [16], la estrategia a largo plazo establecida por el Gobierno de España para la rehabilitación energética del sector de la edificación prioriza la actuación en edificios construidos antes de la entrada en vigor de la legislación sobre condiciones térmicas de los edificios en 1979 [11], donde la eficiencia energética es mucho menor a la que se requiere actualmente [18]. Por tanto, la ineficiencia energética residencial es atribuible en gran medida a que las envolventes de los edificios carecen del aislamiento térmico exigido por la normativa vigente, tal y como se observa en estudios realizados sobre muestras de edificios en varias ciudades españolas [19]. Como consecuencia, los estándares mínimos de confort sólo se pueden alcanzar con un consumo energético elevado. El parque edificatorio se encuentra, pues, en una urgente necesidad de rehabilitación energética, en la que deben priorizarse las mejoras pasivas, dado que son las que reducen la demanda de servicios. Las evaluaciones predictivas del modelo de simulación de los ahorros potenciales en el parque de edificios antiguos de España, basados en cálculos de la demanda de energía, han identificado focos de ineficiencia y oportunidades de ahorro [20,21,22]. Dado que los edificios tienden a tener una larga vida útil y actualmente hay una baja rotación en el sector, no se espera que los nuevos códigos de construcción tengan un impacto significativo en el parque inmobiliario en su conjunto a corto y medio plazo. Por lo tanto, para maximizar el potencial de ahorro de energía del sector de la construcción, debemos centrarnos en el parque inmobiliario existente. Para hacer esto de manera efectiva, primero debemos conocer la situación de la eficiencia energética de este stock [16].

La consecución de edificios de consumo energético casi nulo exige la combinación de estrategias de alta eficiencia energética de la arquitectura y de los sistemas de servicios,

junto a las de generación y almacenamiento de la energía. La reducción del impacto ambiental también requiere el control de la energía incorporada a partir del diseño de los procesos y elementos del edificio, así como de la adopción de estrategias de durabilidad y rehabilitación adecuadas [23]. Todas las actuaciones dirigidas al proyecto o la intervención controlada del impacto energético de los edificios deben realizarse desde un conocimiento profundo de los fenómenos físicos implicados y en la realización de estudios predictivos. Posteriormente, la monitorización en condiciones reales de uso suministrará datos necesarios para la validación y la optimización de las futuras actuaciones [24]. Por lo tanto, para el caso de la rehabilitación energética de los edificios existentes deberán definirse unas estrategias de reducción de consumo energético adecuadas después de la caracterización térmica de cada edificio en particular, y esto supone la definición de un modelo térmico ajustado con mediciones experimentales del comportamiento térmico del edificio. Es objeto de esta tesis la optimización de la metodología necesaria para llevar a cabo estudios de caracterización térmica de edificios mediante software de simulación de comportamiento energético (*building energy performance simulation*, BEPS).

1.3. Cambio climático y consumo energético de edificios.

En los últimos años la cantidad de CO₂ en la atmósfera ha presentado un considerable aumento, pasando de unas 280 ppm en la era preindustrial a unas 390 ppm en la primera década del siglo XXI [25]. Las proyecciones climáticas consideradas en relación con la evolución de GEl para el año 2100, muestran como escenario más desfavorable una concentración global media de CO₂ de 850 ppm. Estos modelos climáticos globales predicen un incremento relativamente uniforme de la temperatura en la Península Ibérica a lo largo del siglo XXI, con una tendencia

media de +0.4 °C/década en invierno y de +0.7 °C/década en verano [26].

El cambio climático y el calentamiento global son preocupaciones principales en la sociedad contemporánea. Uno de los grupos de trabajo internacionales más productivos en este campo es el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). El IPCC, en su quinto informe (AR5) bajo varios escenarios de emisiones de CO₂, predijo que las temperaturas superficiales globales promedio para fines del siglo XXI (2081-2100) estarían dentro de un rango de 1.1 y 4.8 K, en relación con 1986-2005 [25]. Estudios recientes apuntan a que el cambio climático tiene un gran impacto en la demanda de energía tanto para calefacción como para refrigeración en edificios, debido a los cambios en las condiciones ambientales exteriores [27,28]. De forma que no solo existe la necesidad de controlar el consumo energético y las emisiones de GEI de los edificios, para su adaptación a las nuevas condiciones climáticas, también se necesitan nuevas regulaciones y normativas que garanticen el confort de los usuarios [29].

En general, las consecuencias del cambio climático aún no se han considerado en los edificios. Los proyectos de construcción incorporan datos meteorológicos típicos del pasado reciente compilados a partir de datos climáticos históricos de cada lugar [25]. Las soluciones técnicas que determinan el rendimiento energético de un edificio no siempre se adaptarán a la intensidad de los cambios climáticos que ocurran durante la vida útil del edificio.

En consecuencia, en este trabajo se considera que el cambio climático y sus efectos sobre la demanda de energía de los edificios debe ser estudiada desde un punto de vista arquitectónico y constructivo. Esta visión corresponde con la de algunos gobiernos y grupos de investigación internacionales [30]. Esta preocupación se puede encontrar también en trabajos anteriores que ya analizaban el cambio climático y su influencia en la demanda de energía en los

edificios. Los estudios iniciales en este campo se remontan a la década de 1990 [28,29]. Uno de los métodos más empleados [31- 43] consiste en variar los datos climáticos anuales existentes en función del impacto de las previsiones de cambio climático atendiendo la variedad de regiones climáticas existentes (clasificación climática de Köppen-Geiger) [44]. La calidad de estos estudios depende de las predicciones de datos [25]. Estas predicciones se determinan mediante la combinación entre los modelos climáticos que se consideren más adecuados para cada caso, y diferentes escenarios de emisiones a nivel global. Así, existen estudios desde perspectivas global o regional [34,42]. Isaac & Van Vuuren, estudiaron la demanda residencial de calefacción y refrigeración en el contexto del cambio climático por primera vez a escala global. Encontraron una estabilización de la demanda global de energía de calefacción y un aumento considerable en la demanda mundial de energía para refrigeración hasta 2050. Todos los escenarios examinados por ellos apuntan a una disminución neta de la demanda de energía, pero a nivel regional este patrón difiere mucho [42]. En la mayoría de los estudios los datos se proyectan a escala regional, y los archivos climáticos se preparan en secuencias horarias para su uso con herramientas de simulación. Varios autores [35] también han analizado los problemas del cambio climático que afectan al funcionamiento de los edificios desde diferentes perspectivas, algunas de ellas han sido relevantes para el diseño de los ensayos en esta investigación. Finalmente, los resultados obtenidos son variables, dependiendo del tipo de proyección del cambio climático, de la región geográfica y de la tipología del edificio [32].

En general, el tipo de análisis preferido por los autores consiste en modificar los datos ambientales proyectando las predicciones del cambio climático y combinando diferentes variables en el estudio tales como, las áreas geográficas, las tipologías de los edificios y las medidas, tanto activas como pasivas, para mejorar la eficiencia energética.

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

Tabla 1. Resumen de investigaciones sobre los impactos del cambio climático en la demanda de energías de calefacción y de refrigeración de edificios. Elaboración propia.

Ref.	Objetivo	Año	Tipo de edificio	Localización	Clima Köppen	GCMs (Escenario)	Método de conversión	Software de conversión
[6]	Reducción de la demanda	2020 2050 2080	Oficinas	Ciudades (Chile)	BWk; Cfb Csb; ET	HadCM3 (A2a; A2b; A2c)	Morphing	MS Excel Visual basic
[7]	Consumo de energía	2080	Hotel Centro comercial Residencial Hospital	Ciudades (USA)	Am; BWk; Cfa; Csb; Dfa; Dfb; Dfc	HadCM3 (A1F1; A2; B1)	Morphing	Energy Plus
[8]	Estrategias pasivas	2036 a 2065 2066 a 2095	Unifamiliar Apartamentos Oficinas	Florenia (Italia)	Csa	COSMO CLM (RCP8.5)	Morphing	Design Builder
[9]	Uso energético a nivel estatal	2005 2020 2035 2050 2065 2080 2095	50 edificios tipo	USA	Bwh, BSh, BWk, BSk, Csa, Csb, Cfa, Cfb, Dfa, Dfb, Dfc, Dwa, Dwb, Dwc, Dsa, Dsb, ET	GCAM USGS CASCaDE A1, A2	Sistema GCAM	HDD-CDDs
[10]	Estrategias pasivas	2070	Residencial	Adelaide (Australia)	Csb	CSIRO (A1B(90p) B1(90p))	Morphing	AccuRate
[11]	Demanda energética	1961 a 2100	Residencial	Estocolomo (Sweden)	Dfb	ECHAM5; CCSM3; CNRM; HadCM3; IPSL (A1B; A2; B1)	Sin especificar	Simulink (Matlab) DesignBuilder
[12]	Demanda energética	2050 2100	Residencial	Ciudades (Australia)	Aw; BWk; Cfa; Cfb	CSIRO (A1B; A1F1; A1T)	Morphing	AccuRate
[13]	Clima futuro regional	2000 a 2089	Edificio terciario de gran altura Hotel Centro comercial	Shanghai (China)	Cfa	HadGEM2-CC (S1; S2; S3)	Morphing	Energy Plus
[14]	Demanda de energía primaria	2050 a 2090	Bloque de apartamentos	Växjö (Suecia)	Dbf	HadGEM2 (RCP4.5; RCP8.5)	Morphing	Software VIP+ SiruSoft
[15]	Demanda de energía y estrategias pasivas	2020, 2050, 2080	Vivienda social d de una planta	Ciudades (Brasil)	Csc Csb Af	HadCM3 A2	Morphing	Energy Plus
[16]	Demanda de energía y estrategias pasivas	2020, 2050, 2080	Apartamento en última planta	Taipei (Taiwan)	Csc	MICO3.2-MED A2, A1B, B1	Morphing	EnergyPlus
[17]	Demanda de calefacción y refrigeración	2000 a 2100	Sector residencial	Escala global	26 regiones	Modelo energético global TIMER	No aplicable	HDD-CDDs
[18]	Demanda de refrigeración y estrategias pasivas	2006	Casa adosada	De Bilt (Holanda)	Cfa	No aplicable	2006 Año cálido como clima futuro	EnergyPlus

La lista de la Tabla 1 muestra los impactos del cambio climático en el comportamiento energético de los edificios

durante la última década, sobre la base de una serie de publicaciones que no pretende ser exhaustiva.

El clima regional, la tipología y otros parámetros que constituyen los criterios de diseño de un edificio varía inevitablemente. Sin embargo, las conclusiones sobre los métodos empleados y los resultados son coincidentes, y son aplicables simultáneamente al problema general y al específico de las diferentes proyecciones, y de los tipos de clima y de edificios. Karimpour et al. [35] concluyeron que en Australia el cambio climático revertirá el predominio de la calefacción sobre la refrigeración en edificios residenciales en el Csb Koppen. Por otro lado, Wang & Chen [32] determinaron que en EE. UU. habría una disminución general de la demanda de calefacción y que la demanda de refrigeración en las diferentes localidades de su estudio podría mitigarse mediante medidas naturales en función del clima regional (climas Dfa, Dfb y Dfc Koppen), mientras que en otros climas (climas Am, BWh, Cfa y Csb Koppen) serían necesarias medidas activas para garantizar el confort. En su estudio de cuatro escenarios de cambio climático, Nik & Sasic Kalagasidis [36] concluyeron que en Estocolmo la demanda de calefacción descendería a valores más bajos que en 2011 al final del período de estudio, mientras que la demanda de refrigeración aumentaría en pequeñas cantidades y el sobrecalentamiento tendría que ser mitigado por medidas de ventilación natural. Wang et al. [37] también presentaron resultados con aumentos en la demanda de refrigeración en las ciudades australianas. Advirtieron que los resultados de las simulaciones estaban condicionados por las incertidumbres inherentes a los modelos climáticos y los escenarios de emisión de GEI y por las nuevas tendencias de comportamiento en la adaptación de los usuarios al cambio climático. Zhu et al. [38] también señalaron los principales impactos del cambio climático en el rendimiento energético de los edificios en Shanghai, debido a sus efectos directos y significativos sobre las cargas térmicas y los sistemas de ventilación, aire acondicionado y calefacción (*heating*,

ventilation, and air conditioning, HVAC). Dadoo & Gustavsson [39] estudiaron estrategias para reducir la demanda de refrigeración en Växjö, concluyendo que el sobrecalentamiento será cada vez más importante en escenarios futuros. Rubio-Bellido et al. [31] evaluaron el efecto del cambio climático en edificios del sector servicios, variando la forma y compacidad de los proyectos de construcción con el objetivo de optimizar la eficiencia energética en las ciudades chilenas. Llegaron a la conclusión de que la optimización de los factores de forma del edificio (FR) y de ventana-muros de cerramiento (WWR) serán insuficientes por sí mismos para disminuir la demanda de energía de los edificios analizados. Invidiata y Guisi [40] investigaron las condiciones de confort y de demanda energética de calefacción y de refrigeración en dos climas diferentes en Brasil, comprobando una significativa reducción del consumo de energía combinado de refrigeración y de calefacción. En el caso de simulación, de una vivienda adosada en Holanda, Hooff et al. [43] estiman que la energía de enfriamiento necesaria puede reducirse en un 70% utilizando protecciones solares y una ventilación natural adicional del edificio. Un estudio similar realizado por Huang y Hwang [41] en un edificio residencial típico en Taipei demuestra que el control de la energía de refrigeración, y la consiguiente reducción de los efectos del cambio climático, sería posible mediante una combinación de estrategias pasivas. Finalmente, se ha tenido en cuenta en el diseño de nuestra investigación que las estrategias pasivas pueden variar con el tiempo, a medio y largo plazo, tal y como muestran los resultados de los cálculos de Pierangioli et al. [33] para diferentes casos de edificios en el clima mediterráneo.

1.4. Simulación de modelos energéticos de edificios.

Para la justificación del cumplimiento de las exigencias normativas, en materia de eficiencia energética de edificios, se realizan procedimientos de simulación del

comportamiento energético de edificios (*buildin energy simulation, BES*). Estos procedimientos consisten normalmente en la creación de un modelo energético del edificio (*building energy model, BEM*) que se somete a una serie de cálculos que caracterizan el comportamiento termodinámico del mismo. Los parámetros que se calculan por exigencia de los reglamentos de eficiencia energética corresponden con los resultados de balances energéticos de las zonas térmicas de los edificios, para todos los intervalos horarios de un periodo climático característico de los edificios, para todos los intervalos horarios de un periodo anual. De esta forma se obtienen los ratios de demanda energética, consumo energético, y emisiones de CO₂, por unidad de superficie del edificio que caracterizan energéticamente a los edificios [45,46]. Por lo tanto, la generación de los BEM es fundamental en los procedimientos de simulación energética para la justificación del cumplimiento de las normas energéticas para el diseño, construcción y rehabilitación de edificios dentro de la Unión Europea.

La creación de los BEM es necesaria para el cálculo del comportamiento energético de los edificios. A pesar del uso generalizado de herramientas informáticas para la generación de BEM [47-49], los procesos de adquisición e implementación de datos que son necesarios son tediosos y requieren operadores especializados [50]. La gestión energética de los edificios es más eficaz con métodos y herramientas de modelado de información de construcción (*building energy modelling, BIM*) [51]. Por lo tanto, es importante lograr una mayor automatización de BEM y una mejor integración con el conjunto de métodos de gestión BIM desde las fases iniciales de los proyectos de construcción de edificios [52-54].

En la práctica los procedimientos de cálculo de los parámetros que definen la eficiencia energética de los edificios y que se calculan a través de modelos de simulación

BEM corresponden con los de demandas y consumos de energía [110]. Al mismo tiempo, los BEM también se utilizan para predecir el confort térmico de los usuarios calculando los parámetros ambientales necesarios, como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire, entre otros [55]. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que los resultados de las BES reflejarán cierto grado de incertidumbre, debido a las dificultades de definir modelos paramétricos suficientemente ajustados a las condiciones reales de servicio. Normalmente, estas incertidumbres están relacionadas con la realidad material de los elementos a modelizar y las condiciones de servicio que se han previsto para el edificio. En ocasiones, las incertidumbres pueden deberse al suministro de información meteorológica débil, a dificultades en la estimación de la infiltración de aire, de la resistencia térmica superficial y del comportamiento térmico de los materiales en régimen transitorio [56-58]. La reducción de la incertidumbre es un importante campo de investigación en relación con los métodos BES [59].

En relación con los estudios predictivos de confort térmico, es habitual que las herramientas de simulación energética implementen el modelo matemático de Fanger, entre los diversos modelos matemáticos, debido a su facilidad de uso y una presentación gráfica adecuada [49], facilitando las predicciones de la sensación térmica y el grado de satisfacción de los usuarios de los edificios. La eficacia de este método queda patente con su incorporación en la norma ISO 7730 [55]. De esta forma, los criterios para un ambiente térmico interior aceptable se especifican como requisitos para el confort térmico general a través de los índices de voto medio estimado (*predicted mean vote, PMV*) y porcentaje previsto de insatisfechos (*predicted percentage dissatisfied, PPD*) [60]. Como se verá en más adelante (Subsección 4.1.4), los parámetros PMV y PPD asociados a otras condiciones ambientales permiten la investigación analítica y la interpretación del confort térmico. La medición o el cálculo del confort térmico tiene en cuenta varios

parámetros objetivos (es decir, la condición física del entorno, incluida la temperatura, las actividades humanas y otros factores) y también parámetros subjetivos, como la fisiología, la actividad, la edad y la psicología, incluidos los procesos cognitivos [61]

En estas circunstancias, los programas de software de simulación de rendimiento energético de edificios (*building energy performance simulation*, BEPS) se han convertido en herramientas esenciales porque pueden proporcionar una evaluación del comportamiento de un edificio con un alto grado de precisión. Las herramientas BEPS, como Energy Plus, DOE-2, TRNSys o ESP-r, están siendo ampliamente utilizadas actualmente en investigaciones [62] y se han verificado para lograr resultados con una precisión alta [63-67].

Así, recientes investigaciones utilizan BEPS para la estimación de demandas energéticas y el estudio del confort térmico. Aparicio-Fernández et al. [64] utilizaron herramientas de modelización de rendimiento energético del edificio para obtener la demanda energética de una vivienda unifamiliar, que incluye la tasa de infiltración de aire y el efecto de la ventilación natural mediante la apertura de ventanas. Kerfah, et al. analizaron estrategias para reducir el malestar térmico y el consumo energético de calefacción en edificios residenciales, en clima mediterráneo, realizando mediciones experimentales que se utilizaron para calibrar modelos numéricos construidos con software [67]. Este estudio calculó el ahorro de energía y la mejora del confort térmico, y realizó un análisis paramétrico variando la ubicación, el espesor del aislamiento térmico, las ventanas y el sistema de calefacción. El cambio del sistema de calefacción en las viviendas estudiadas, desde la caldera central de gas hasta los radiadores de agua caliente conduce a una reducción de aproximadamente el 5% del consumo de combustible, independientemente del rendimiento de la envolvente, y disminuye el número de horas de incomodidad

de manera más significativa. También se observó que, entre los escenarios probados, cambiar la envolvente térmica reduce las necesidades de calefacción en más del 84% en comparación con la vivienda de referencia, y que el porcentaje de personas insatisfechas con el ambiente climático interior podría reducirse al mínimo.

Por otro lado, Sarbu y Pacurar [61], comprobaron que la ventilación interior no solo es significativa en términos de disminución del riesgo de problemas de salud dentro de los entornos de aprendizaje, sino también significativa en términos de eliminar cualquier efecto negativo sobre el aprendizaje y la productividad [69]. Estos mismos autores realizaron un estudio comparativo de la eficiencia energética de un sistema convencional de ventilación y aire acondicionado con tres configuraciones, utilizado para enfriar una sala experimental en un edificio de oficinas en escenarios controlados mediante la adopción de diferentes temperaturas del agua de un sistema con torres de refrigeración. En este estudio la evaluación del componente térmico en la oficina experimental se realiza, en base indicadores PMV y PPD, utilizando el programa de Confort Térmico ASHRAE. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de unidades de tratamiento de aire (UTA) y unidades ventilo-convector (FCU) asegura un mayor confort térmico. Finalmente, se desarrolla y se valida experimentalmente un BEM para la simulación de consumos energéticos dados los PMV-PPD a alcanzar por el sistema UTA y FCU [70].

En relación con los BEM de edificios existentes (as-is BEM), señalamos algunos aspectos importantes relacionados con nuestra investigación. Uno de ellos es la importancia de la calibración BEM para reducir la incertidumbre de los resultados BES. Otros aspectos están relacionados con la utilización de la termografía y la estimación de la transmitancia térmica (U) de los elementos de la envolvente de los edificios a modelar. Finalmente, otra de las cuestiones

que se ha tenido en cuenta en la investigación es la necesidad de aumentar el grado de automatización de las metodologías BEM para facilitar la implementación de los modelos as-is BEM.

Existen varios métodos de calibración. Entre ellos los más utilizados se basan en la observación de uno o varios parámetros estadísticos que relacionan los resultados de las simulaciones con mediciones reales. Estas mediciones deben ser tomadas bajo similares condiciones ambientales y de servicio a las de simulación. La calibración de un modelo se consigue mediante el ajuste de algunos parámetros del modelo hasta conseguir que los valores estadísticos de comparación se sitúen dentro de los umbrales de tolerancia que han sido aceptados para cada estudio [58]. La guía ASHRAE 14 (AG14) proporciona criterios y valores de las tolerancias admisibles para la calibración de modelos energéticos de edificios mediante procedimientos estadísticos aplicados a análisis comparativos de los resultados de simulación y los datos de monitorización con sensores [71,72]. Este método se ha utilizado con éxito para el cálculo de la demanda y el consumo de energía de los edificios en diferentes estudios predictivos de rehabilitación energética [71-76].

Otro aspecto relevante es la modelización del carácter térmico de los elementos de la envolvente a través de las características físicas de los materiales que la determinan. Para ello es necesario considerar los componentes resistivo y capacitivo de cada material. El primero queda caracterizado por el coeficiente de resistencia térmica (R) de cada material, y que proporciona el U_{value} del sistema de de cada envolvente aplicando la ley de Fourier, y que determina la cantidad de energía que es capaz de transmitir. El segundo es la capacidad calorífica de los materiales que proporciona la densidad y el calor específico de cada uno de ellos, es decir, la cantidad de energía térmica que es capaz de almacenar en forma de masa o inercia térmicas. En la investigación se

focaliza en la determinación del valor de transmitancia térmica (U_{value}) de la envolvente y sus zonas térmicas en los as-is BEM.

El valor U se define como la cantidad de calor que se transmite a través de un determinado material por unidad de área y tiempo [77]. Un valor U nominal (U_{nom}) de cualquier sistema constructivo puede calcularse a partir de valores obtenidos de tablas de propiedades físicas y materiales, y utilizando cálculos basados en los principios de las leyes de transmisión de calor en condiciones ambientales estacionarias [78]. Normalmente, los valores necesarios para estimar los caracteres resistivo y capacitivo de los materiales se pueden encontrar en normas locales [78] y normas internacionales [79]. El U_{value} de un sistema constructivo también se puede obtener mediante mediciones de flujo de calor [80], o mediante el uso simultáneo de termómetros de ambientes interior y exterior, al mismo tiempo que se monitorean temperaturas de superficie interior. En cualquiera de estos casos, también existirá un grado importante de incertidumbre en el U_{value} obtenida que influirá en los resultados de BES [81-83].

Los modelos para la simulación del comportamiento energético de los edificios deben ser dinámicos y adaptables a las variaciones de sus ciclos de vida. Esto exige la gestión de una ingente cantidad de información que necesita estar integrada tanto en los procesos del proyecto de construcción o rehabilitación de los edificios como en los de gestión de su utilización y mantenimiento. Durante la calibración, los parámetros del modelo de simulación se ajustan en una serie de operaciones hasta que los resultados de la simulación y los resultados de la monitorización convergen, dentro de un margen de error especificado. [84].

En el campo profesional, las herramientas de simulación utilizan bibliotecas de materiales y sistemas de construcción, patrones de ocupación, especificaciones de sistemas de climatización y datos meteorológicos que no siempre se

ajustan con precisión a los parámetros del entorno y a la realidad de los edificios. Estas circunstancias y los supuestos que se establecen en los modelos determinan la divergencia entre los resultados de simulación y los rendimientos o consumos reales de los edificios [84]. También hay que considerar que en los procesos de construcción de edificios existe una incertidumbre accidental intrínseca. Por lo tanto, es necesario trabajar con modelos que se ajusten a la realidad y, además, realizar las convenientes calibraciones, para así posibilitar la predicción de su comportamiento futuro o ensayar variaciones sobre los mismos. Poder contrastar con la realidad los datos simulados es fundamental para la calibración de la herramienta [85].

1.5. Técnicas termográficas.

En esta investigación también se considera la termografía 3D para el análisis cualitativo y cuantitativo de edificios existentes y su comportamiento térmico.

En general, la inspección termográfica requiere un conocimiento y control adecuados de los parámetros ambientales durante las pruebas de medición, debido a la naturaleza infrarroja de la mayoría de los fenómenos que intervienen [86]. Existen procedimientos estandarizados de análisis termográfico de edificios [87] basados en el análisis cualitativo de los mapas térmicos superficiales que proporcionan los sensores termográficos y, que cuando se analizan adecuadamente, pueden indicar la existencia de elementos ocultos inesperados o ciertas patologías a considerar en los as-is BEM.

Existen numerosos estudios en los que la tecnología infrarroja (*infrared themography*, IRT) también es utilizada con fines cuantitativos [88,90-91]. En estos casos es importante tener en cuenta que las temperaturas de las mediciones termográficas de la superficie interior presentan una mayor fiabilidad que las medidas en exteriores. Esto es debido a que la variabilidad del efecto de convección del aire

afecta menos a las lecturas IRT en los espacios interiores que en los exteriores [92]. De esta forma, los cálculos del U_{value} sobre la base de mediciones IRT en interiores de los edificios son de mayor fiabilidad [91].

En cualquier caso, la aplicación de las termografías en el ámbito de la construcción de edificios es cada vez más frecuente, incluyendo las más recientes tecnologías termográficas que proporcionan datos tridimensionales no estructurados en forma de nubes de puntos térmicos (3D-T) [93-95]. En investigaciones anteriores a esta tesis se han ensayado plataformas de escaneo térmico 3D compuestas por un escáner láser 3D, una cámara RGB y una cámara térmica que escanea datos térmicos de 360° [96-98]. Esta tecnología se ha aplicado con éxito para monitorear la temperatura interior de edificios, y permitiendo visualizar y cuantificar la distribución y variación de temperaturas en las superficies de los objetos a lo largo del tiempo [99].

2. Objetivo y metodología de la investigación.

La finalidad de la investigación es proporcionar y ensayar metodologías de modelado BEM para la realización de simulaciones predictivas del comportamiento energético de edificios existentes, a largo plazo, integrando nubes de puntos termográficas en el proceso.

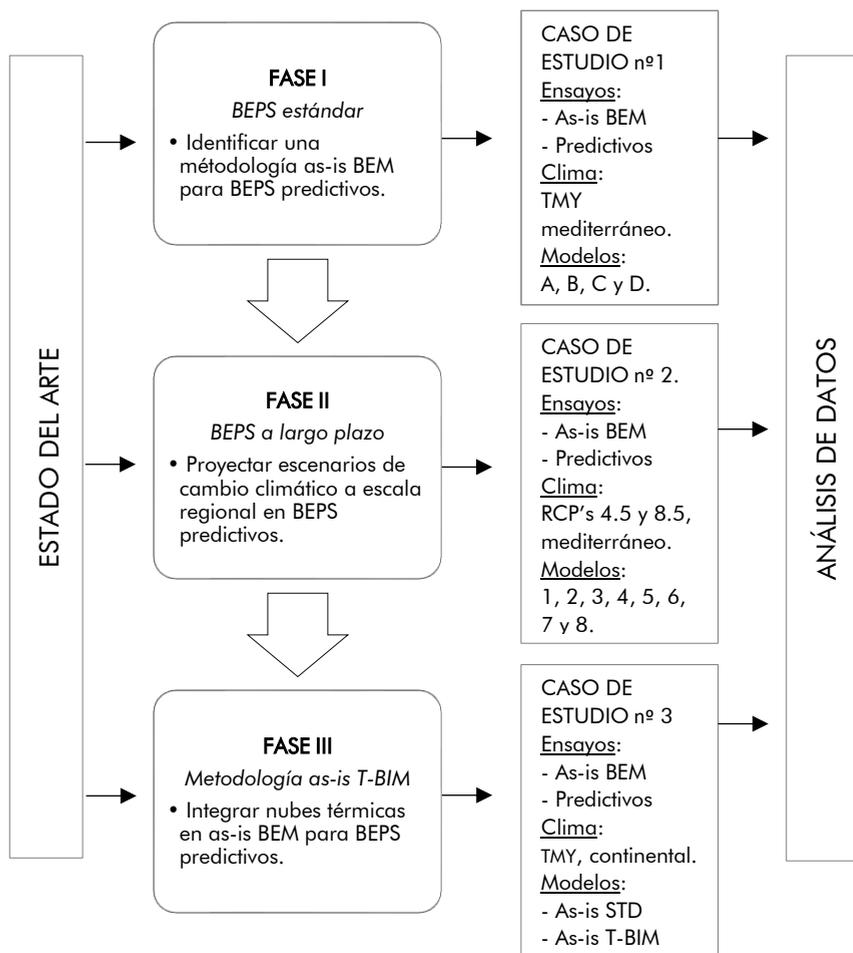


Figura 1. Fases de la investigación y casos de estudio de la tesis.

2.1. Metodología general de la investigación.

Para alcanzar el objetivo de la investigación se han desarrollado tres fases principales:

- I. Identificar una metodología de modelización energética de edificios existentes que denominaremos como “as-is Estándar” (as-is STD) que permitirá la creación de modelos BEM base de edificios existentes (as-is BEM) para la realización de ensayos predictivos (BEPS) sobre esos modelos.
- II. Investigación de una metodología que permita la creación de ficheros de climas futuros, basados en los diferentes escenarios de cambio climático, que puedan ser utilizados para BEPS predictivos a largo plazo de modelos as-is BEM.
- III. Ideación una nueva metodología as-is T-BEM que, a diferencia de las as-is STD, se base en la utilización de nubes térmicas 3D procedentes del escaneado termográfico de zonas térmicas de edificios existentes.

Finalmente, se han realizado ensayos BEPS predictivos aplicando las metodologías que han resultado de cada fase de la investigación sobre diferentes casos de estudio, y analizado los resultados (Figura 1).

2.1.1. Procedimiento estándar para el ensayo las demandas energéticas y de confort en las zonas térmicas de los edificios existentes.

Uno de los objetivos de esta investigación es analizar los procedimientos estándar de caracterización térmica de edificios y los resultados que se obtienen al simular el comportamiento energético y el confort interior de los edificios existentes. Estos procedimientos se basan en la utilización de modelos numéricos de edificios estructurados en zonas térmicas sobre las que se calculan

series de balances térmicos para cada una de ellas, constituyendo así las simulaciones energéticas. El análisis de los procedimientos predictivos de simulación se realiza mediante de tres diferentes casos de estudio. Todos los casos son edificios ya construidos, de forma que las calibraciones de los as-is BEM correspondientes se han basado en la utilización de datos experimentales tal y como se expone en la sección 4.1 Metodología del estudio, en el Capítulo 4.

2.1.2. Proyecciones climáticas regionales a largo plazo en la simulación energética de edificios.

También, se ha investigado la influencia del cambio climático en la demanda de energía de los edificios. Se han revisado estudios realizados con anterioridad con el fin de identificar una metodología aplicable a un caso de estudio, integrándola en la metodología BEPS.

Se han generado cuatro proyecciones de temperatura mediante la combinación de dos Modelos de Circulación Global (CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR), y dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5) regionalizados por la Agencia Estatal de Meteorología. Posteriormente se han secuenciado una serie de modelos energéticos de un mismo caso de estudio en el que se modelan un total de ocho medidas de mejora energética: seis pasivas (infiltración, espesor de aislamiento, acristalamiento y tipo de marco, área de ventana, dispositivos de sombreado y ventilación cruzada natural), y dos medidas activas de ventilación (ventilación mecánica sin y con recuperación de calor), que se incluyen como estrategia para alcanzar los estándares de edificios de consumo casi nulo (NZEB) en las proyecciones climáticas más extremas. De esta forma, se han realizado simulaciones energéticas en diferentes escenarios de cambio climático basados en los resultados de los Modelos de Circulación Global.

2.1.3. Metodología T-BIM para la simulación energética de edificios.

En la investigación se ha desarrollado una metodología de modelización térmica de edificios existentes, que facilita la creación de modelos as-is BEM para simulación energética, que se ha denominado metodología as-is T-BIM. Esta metodología se basa en el uso de datos del escaneo termográfico tridimensional de las superficies interiores de las zonas térmicas del edificio. Este sistema de diagnóstico genera automáticamente nubes de puntos termográficas 3D-T de edificios y as-is BEM con estándares IDF y gbXML para su utilización con software de simulación de energía compatible con estos formatos. La metodología as-is T-BIM se ha ensayado en la realización de estudios predictivos de comportamiento térmico de un conjunto de cinco zonas térmicas de un edificio de oficinas. Ese mismo caso de estudio también se ha ensayado con un método estándar (as-is STD, basado en las recomendaciones de AG14) y se simuló bajo las mismas condiciones predictivas. Finalmente, se han comparado los resultados de la aplicación de ambos métodos, as-is T-BIM y as-is STD, al mismo edificio.

3. Organización del documento y síntesis de la investigación.

En los capítulos anteriores se ha realizado una introducción acotada al ámbito de la investigación que corresponde con las metodologías de modelado energético de edificios existentes y de simulación del comportamiento de estos edificios. La finalidad de la aplicación de estas metodologías es caracterizar esos edificios y de conocer su comportamiento, a corto y largo plazo, en función de su configuración constructiva y variaciones climáticas. Adicionalmente, el ámbito de la investigación se amplía al campo de las nubes de puntos termográficas para su integración en estos procesos. También se ha expuesto la metodología general llevada a cabo para la investigación de la tesis (Figura 1). A continuación, en los tres siguientes capítulos se desarrollarán las tres metodologías que constituyen el corpus de la investigación llevada a cabo para la tesis.

En el Capítulo 4 se expone la metodología que denominamos estándar de monitorización y simulación del comportamiento energético de edificios en su estado actual, as-is STD, que se ensaya con una vivienda característica en clima mediterráneo como caso de estudio. En ese capítulo se describen los procesos de monitorización del ambiente interior del edificio, de modelización, calibración y validación del modelo térmico del edificio. Este modelo validado es utilizado como base de una serie de modelos variantes que son sometidos a procedimientos de simulación predictiva y que han proporcionado los resultados de eficiencia energética y confortabilidad de usuarios para el caso base y las variantes. Los resultados se presentan al final del capítulo junto a una discusión y unas conclusiones.

Posteriormente, en el Capítulo 5, se investiga la influencia del cambio climático en la demanda de energía en una casa residencial en un clima mediterráneo. Los Modelos de Circulación Global (CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR), bajo dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), a escala reducida y regionalizados por la Agencia Estatal de Meteorología, se utilizan para generar

cuatro proyecciones de temperatura. Sigue un proceso secuenciado en el que se modelan un total de ocho medidas de mejora energética: seis pasivas (infiltración, espesor de aislamiento, acristalamiento y tipo de marco, área de ventana, dispositivos de sombreado y ventilación cruzada natural) y dos medidas de ventilación activa (ventilación mecánica y un sistema de recuperación de calor), estas últimas como estrategia para alcanzar los estándares de edificios de consumo de energía casi nulo (NZEB) en las proyecciones climáticas más extremas. Basándonos en los resultados de los Modelos de Circulación Global del clima, se desarrollan las series de simulaciones energéticas correspondientes a las diferentes variaciones del modelo del caso de estudio, mediante la herramienta de simulación TRNSYS [100], para cada escenario de cambio climático. Seguidamente, los resultados se presentan al final del capítulo junto a una discusión y unas conclusiones.

A continuación, el Capítulo 6, detalla la propuesta metodológica de as-is T-BIM para la creación de modelos BEM de zonas térmicas de edificios existentes. También, se desarrolla una comparación de las características de los dos modelos de simulación energética as-is STD y as-is T-BIM. Además, se presentan los resultados de simulaciones predictivas de ambos modelos, junto a un análisis comparativo de los resultados, y las conclusiones de esta investigación.

4. Comportamiento energético de edificios en clima mediterráneo.

A continuación, se expone una metodología estándar de monitorización y simulación del comportamiento energético de edificios en su estado actual (as-is STD) y el ensayo de la metodología en el caso de una vivienda característica en clima mediterráneo. En la sección 4.1. se describen los procesos de medición y monitorización del clima interior del edificio de estudio. Los procedimientos de modelización, calibración y validación del modelo térmico se presentan en la sección 4.2. Los resultados de eficiencia energética y confortabilidad de usuarios para el caso base y también para una serie progresiva de mejoras pasivas, son presentados y discutidos en la sección 4.3. Finalmente se sintetizan conclusiones de la metodología y de los resultados en su aplicación a nuestro caso de estudio.

4.1. Metodología del estudio.

Para la realización de este estudio se ha seguido la metodología de modelización y calibración según las recomendaciones de la sección de calibración de modelos energéticos con datos interiores de la guía Ashrae Guideline 2014 AG14 (BCSA-AG14) [71] y la utilización de datos de temperatura interior de zonas térmicas de edificios existentes. Esta metodología será denominada en nuestro estudio como metodología as-is BEM estándar o as-is STD. BCSA-AG14, proporciona los criterios y los valores de las tolerancias estadísticas aplicables a análisis comparativos de los resultados de simulación con datos de monitorización ambiental con sensores, propios de los procedimientos de calibración. Este método se ha utilizado con éxito para la realización de los diferentes estudios predictivos de rehabilitación energética y confort ambiental de usuarios de edificios que hemos realizado con nuestras investigaciones.

4.1.1. Creación de modelos térmicos.

Los BEM se basan inicialmente en modelos geométricos 3D de zonas interiores de edificios, formados por elementos de superficie simplificados, de acuerdo con los requisitos del software de simulación energética. Posteriormente, los datos y las propiedades necesarias para el cálculo de los balances energéticos se asignan a los elementos de la geometría de los modelos BEM. En el caso de métodos as-is STD, lo habitual es utilizar los entornos gráficos de las herramientas estándar, como la utilidad TRNSys3D para SketchUp y DesignBuilder, y posteriormente, para el caso de simulaciones empleando algoritmos de transferencia de calor (Conduction Transfer Functions) (CTF), utilizar motores de cálculo para las simulaciones, tales como TRNSys y EnergyPlus. El software BIM estándar, como Revit y Archicad, también pueden ser utilizados para modelar y asignar propiedades relacionadas con materiales y zonas térmicas (infiltración de cargas internas, etc.) y posteriormente transferirlas a través de esquemas estándar de intercambio BEM (IDF y gbXML, entre otros menos habituales) al software de simulación. Esta alternativa puede presentar problemas de interoperabilidad y tiempos significativos de revisión de los modelos por parte de especialistas. En el caso que se desarrolla en este estudio se han utilizado los software TRNSys3D para SketchUp para la construcción del modelo BEM y TRNSys para los cálculos BEPS.

4.1.2. Mediciones y monitorizaciones.

En los casos as-is STD es frecuente realizar una calibración del modelo BEM con datos de temperatura interior obtenidos mediante monitorizaron con sensores ambientales. En el caso que se desarrolla en este capítulo se utilizan sensores de alta precisión tipo BTH01 que proporcionan un rangos de medición entre 0 a 100% y una precisión del $\pm 3\%$ para la humedad relativa; y un rango de medición entre 5 a 80 °C con una precisión de

± 0.3 °C, para la temperatura. Se monitorizaron 3 zonas diferentes del edificio, recogiendo datos durante 56 días, de enero a marzo de 2017, con intervalos de 10 min. La temperatura interior media obtenida se ha utilizado para la calibración y validación del modelo energético del edificio desarrollado en TRNSYS. Uno de los sensores se colocó dentro de la casa para medir las temperaturas y la humedad relativa en zona acondicionada. También se midieron los espacios no acondicionados del garaje en la planta baja y el área bajo la cubierta, en la primera planta. En la Figura 3 se indica la situación de cada uno de los sensores. Los datos de la climatología exterior (dirección del viento, la velocidad del viento, la temperatura ambiente y la humedad relativa) fueron también monitoreados, cada 10 minutos, por una estación meteorológica de AEMET instalada cerca del edificio estudiado.

4.1.3. Software de simulación.

En este estudio se ha utilizado el software CTF de simulación TRNSYS-18 para realizar los cálculos del comportamiento térmico del edificio según su configuración actual. Igualmente, para la realización de las simulaciones predictivas de hipotéticas intervenciones de renovación de este. Más en particular, la herramienta TRNFlow (TRaNsient Flow) ha sido utilizada para introducir los diferentes valores de ventilación e infiltración en los casos del modelo as-is BEM calibrado y en los ensayos propuestos en los que las estrategias de ventilación se han configurado en función de unas determinadas condiciones climatológicas externas, tal y como se explica en la sección 4.2.2. De esta forma, se han podido estimar los comportamientos térmicos y los consumos energéticos del edificio, tanto para las condiciones reales según su configuración actual, como las hipotéticas según los diferentes grados de intervención que se han diseñado en la investigación. Todos estos casos se han basado en un

modelo BEM calibrado con temperaturas de monitorización con frecuencia de 10 minutos durante cerca de dos meses de invierno mediterráneo.

4.1.4. Análisis de resultados.

Es habitual la realización de simulaciones energéticas de modelos de edificios existentes (as-is BEM). El objeto de estos ensayos es el de conocer el comportamiento energético de los mismos, es decir, caracterizar térmica y energéticamente el edificio objeto de estudio. Para alcanzar un grado aceptable en la precisión de los resultados de simulación es necesario analizar y calibrar los BEM correspondientes. De esta forma, los resultados de la simulación BEPS de un modelo convenientemente calibrado proporciona los parámetros que caracterizan su comportamiento energético. Los resultados que se obtienen corresponden con parámetros climáticos ambientales y superficiales, en forma de temperatura, humedad, velocidad, dirección y coeficientes, entre otros. También corresponden con parámetros energéticos que se expresan frecuentemente en términos de demanda de energía y consumo de energía. Los primeros serán base de estudios de confort y los segundos de impacto energético.

También es frecuente diseñar ensayos predictivos para as-is BEM ya calibrados de zonas térmicas de los edificios. Normalmente, este tipo de estudios están destinados a simular el comportamiento energético de un as-is BEM calibrado base sobre el que se modifican materiales, uso del edificio o condiciones climáticas, en relación con sus condiciones calibradas, con el objeto de ensayar estrategias de ahorro energético o para mejorar el confort de usuarios, tal y como se plantea en los capítulos 4 y 5, respectivamente. Las predicciones responderán con diferencias entre los balances térmicos de simulación CTF de las zonas del modelo as-is y las del modelo modificado. Estos resultados también se expresan

normalmente en términos de demanda de energía (kW/m^2 año) y consumo de energía (kWh/m^2 año).

También es frecuente diseñar ensayos de simulación para predecir los grados de comodidad del usuario. Estos estudios predictivos se basan normalmente en el análisis de parámetros ambientales interiores tales como la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), la humedad relativa (%) y la velocidad del aire (m/s), de habitaciones y zonas térmicas, y en la aplicación de metodologías para calcular índices relacionados con el confort. Entre los diversos modelos matemáticos utilizados para el estudio del confort térmico, es frecuente el empleo del modelo matemático de Fanger, debido a su facilidad de utilización y de presentación de resultados gráficos mediante el empleo de software acoplado a las herramientas BEPS estándar [49]. Este método ha sido incorporado en ISO 7730 [14]. En general se acepta que, si los resultados no superan los valores de referencia, entonces las condiciones estarán dentro del rango de confort para la mayoría de los usuarios. Los parámetros de referencia se conocen como el pronóstico de voto medio previsto (PMV) y el porcentaje previsto de insatisfechos (PPD). El rango de resultados está entre los valores $-2 < \text{PMV} < 2$, y $5\% < \text{PPD} < 100\%$. Los valores de confort admisible se sitúan entre $(-0,5, +0,5)$ para el PMV y $(5\%, 10\%)$ para el PPD; siendo el extremo de cada intervalo el máximo admisible.

En el caso de estudio que se expone en la siguiente sección se realizan estudios predictivos BEPS de tipo CTF de diferentes modelos basados en la implementación de estrategias de mejoras energéticas sobre un modelo as-is BEM calibrado. Los resultados se analizarán desde los puntos de vista energético del edificio y del confort de los usuarios.

4.2. Caso de estudio nº 1.

4.2.1. Descripción del edificio.

El edificio objeto de los ensayos de simulación ha sido una vivienda unifamiliar construida en 1950 y que actualmente se encuentra en una zona de huerta próxima a la ciudad de Valencia. Se han realizado ensayos predictivos para evaluar su comportamiento en los casos de su adecuación a la normativa vigente y de ciertos grados de mejora con medidas pasivas. Corresponde con un edificio de dos plantas con dimensiones interiores de 9.8 m x 9.5 m, por lo que la superficie de la planta baja es de 93.1 m², siendo esta un área normal para una casa unifamiliar. La altura en planta baja es de 3.5 m y el segundo piso no tiene altura constante, y este espacio se ha considerado como un área de almacenamiento sin climatizar. La entrada principal está orientada al este mirando al lado del mar. En esta fachada existen también ventanas y una gran puerta para acceder al garaje de la vivienda. Por otro lado, en la fachada oeste hay algunas ventanas pequeñas y ninguna en las fachadas norte y sur tal y como se puede ver en la Figura 2. La envolvente del edificio no dispone ningún tipo de aislamiento, así el edificio pertenece al stock de edificios ineficientes energéticamente [20] a los que se ha hecho referencia en la sección 1.2, correspondiendo con los tipos de edificios de especial atención para su acondicionamiento, dentro de la estrategia de reducción de consumos energéticos del parque inmobiliario existente. Los muros del edificio son de mampostería sólida con morteros de yeso en el interior y de cemento en el exterior (valor $U = 2.28 \text{ W/m}^2\text{K}$). La disposición de la cubierta del edificio es a dos aguas y el espacio que cubre directamente no es habitable, pero dispone de ventanas para ventilar este volumen. La cubierta se construye con un tablero cerámico sobre un entramado de madera en el interior y una cobertura de teja cerámica (valor $U = 2.65 \text{ W/m}^2\text{K}$) por el exterior. El

suelo de planta baja se resuelve con una solera de hormigón que ha sido colocada directamente sobre el terreno y sin ningún tipo de aislamiento, cubierta con un pavimento cerámico (valor $U = 1.07 \text{ W/m}^2\text{K}$). También, en el modelo as-is BEM se ha considerado el forjado horizontal que se para la zona habitable del almacén no acondicionado ($U = 1.74 \text{ W/m}^2\text{K}$). Además, los paramentos verticales interiores se presentan de fábrica de ladrillo hueco revestido con yeso ($U = 2.52 \text{ W/m}^2\text{K}$), y la ventanas son de acristalamiento sencillo ($U = 5.7 \text{ W/m}^2\text{K}$) alojado en carpinterías de madera ($U = 2.2 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Como ventilación natural estándar se ha considerado que los usuarios abren y cierran las puertas y ventanas regularmente todos los días. La entrada de luz solar en el interior se produce durante todas las horas, en función de la orientación de las ventanas, y solo es interrumpida por elementos de sombra en los días del verano.

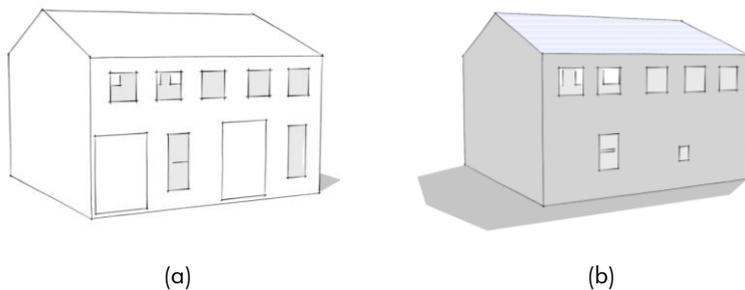


Figura 2. Modelo as-is BEM del edificio construido con la utilidad Trnsys3D para SketchUpn en el caso de estudio nº 1. a) Fachada sur y este b) Fachada norte y oeste.

4.2.2. Descripción del modelo as-is BEM.

El modelo geométrico 3D del edificio existente se creó utilizando la herramienta TRNSys3D para SketchUp, que permite generar un archivo de tipo IDF con áreas multizona e información geométrica. Este modelo 3D traducido al formato IDF se ha importado al Type-56 del

programa TRNSYS donde se introduce toda la información paramétrica del edificio (envolvente, ocupación, sistema de calefacción o refrigeración, etc.). Posteriormente, hemos utilizado el Type-56 TRNFlow, para calcular las tasas de ventilación e infiltración en función de las condiciones externas (temperatura y humedad, velocidad y dirección del viento, radiación solar). Las tasas de infiltración se han considerado por mapas de grietas y huecos estimados según corresponde a la vida útil de este tipo de edificios, tal y como se explica en trabajos anteriores [65]. En este caso no se ha realizado ningún ensayo de infiltraciones tipo Blower Door, pero consideramos que se obtendrían tasas de infiltración similares a la de los casos referenciados, por este motivo hemos considerado una superficie efectiva de fugas térmicas por infiltración para la planta baja de 0.06 m^2 distribuida en 6 aberturas de $0.1 \times 0.1 \text{ m}$ cada una.

El primer paso para validar el modelo as-is BEM obtenido consiste en introducir los datos meteorológicos recopilados para el período de análisis, en nuestro caso utilizando la utilidad Type-99 del programa. Este Type permite introducir datos meteorológicos recogidos para obtener la demanda de calor y temperatura, y que permitirán validar el as-is BEM como modelo base para la creación de los modelos de simulación que posteriormente se utilizarán para estudios predictivos. El modelo se ha completado con la configuración de un sistema de radiadores eléctricos como sistema de calefacción que cubre las demandas de calefacción, durante el día y la noche.

El segundo paso ha sido el de desarrollar el escenario climático para el modelo base validado considerando un año climático característico para el lugar del edificio, obtenido de forma estadística. En nuestro caso los datos han sido provistos por Meteonorm, que proporciona los datos en formato TM2 aptos para ser

utilizados por el Type-15 del programa, con pasos temporales de 1 hora. De esta forma, se ha creado el modelo base de nuestro estudio (Modelo A) determinado en las condiciones de un modelo as-is BEM del edificio y un año meteorológico tipo para el lugar en el que se encuentra. El Modelo A es la base de los ensayos de mejora de las condiciones de confort de la zona habitable de la vivienda y de reducción de las demandas de energía en forma de calor y frío de climatización.

En el Modelo A la planta baja se ha considerado con condiciones de confort de climatización, dividiéndose en tres áreas diferentes como se muestra en la Figura 3. De esta forma, el uso diurno considera el salón (el garaje en la casa actual); el uso nocturno considera los dormitorios-habitación y el área de trabajo (la sala de estar en la casa actual); y una cocina con diferentes electrodomésticos (siendo también la cocina en la casa actual).

Teniendo en cuenta un uso normal de los diferentes espacios del modelo, se han determinado las programaciones de ganancias de calor internas de los modelos, lo que implica 24 horas de ocupación de la casa con diferentes grados de cargas térmicas. Las cargas normales se han considerado de 2.25 W/m^2 cuando la radiación solar es inferior a 120 W/m^2 en el plano horizontal. Asimismo, se ha tenido en cuenta el funcionamiento de varios electrodomésticos como frigorífico con 120 W y un conjunto de electrodomésticos de cocina que consumen 329 W de energía eléctrica durante 3 horas al día. Se definen dos áreas diferentes para la ocupación. Una ocupación normal de 4 personas en la zona de vivienda de 93 m^2 . Las habitaciones también se ocupan durante 7 horas del día y la ocupación de la sala de estar varía los fines de semana; la máxima ocupación, de lunes a viernes, se define entre las 8 p.m. y las 7 a.m., mientras que la ocupación del 50% se

establece durante el resto del día. Por el contrario, se ha considerado que la ocupación máxima en fin de semana era de 7 a 9 horas con una ocupación del 25% durante el resto del día. Se han tenido en cuenta durante todo el año las ganancias de calor externo durante todo el año a través de las superficies acristaladas de las ventanas, así como unas infiltraciones de 0.60 renovaciones por hora.

Un aspecto importante del trabajo realizado es el análisis del confort térmico interior de la vivienda utilizando la norma internacional ISO 7730 [55], que define el cálculo de los parámetros PMV y PPD. El PMV es un indicador que representa un valor promedio de la evaluación climática de un gran grupo de personas. El índice PPD proporciona una predicción cuantitativa del número de personas que estarán insatisfechas con una determinada condición ambiental interior. Siempre que el valor de PMV se situé por encima de 0.5 o por debajo de -0.5, se considerará el ambiente interior como incómodo. El valor de PMV se ha evaluado con un aislamiento de ropa de 1 clo y 0.5 clo respectivamente durante la temporada de calefacción o refrigeración, y un valor de 1.2 met para la actividad de las personas.

En los estudios realizados, la temperatura operativa se ha establecido en valores igual o superior a 21 ° C e igual o inferior a 25 ° C, respectivamente para la demanda de refrigeración y de calefacción de todo el año, tal y como establece la regulación RITE en España, como criterios para el confort dentro de edificios residenciales [52].

Alterando sucesivamente el BEM base, se han configurado varios escenarios con el fin de analizar y minimizar la energía necesaria para calentar o enfriar la planta baja del edificio:

- Modelo A. Modelo base que corresponde con un modelo BEM que se define en el estado

constructivo actual y considerando tres áreas diferentes para planta baja como se muestra en la Figura 3. En este caso no se considera ninguna mejora para obtener los resultados de demanda energética y de confort, durante el año climático típico utilizado en los ensayos predictivos.

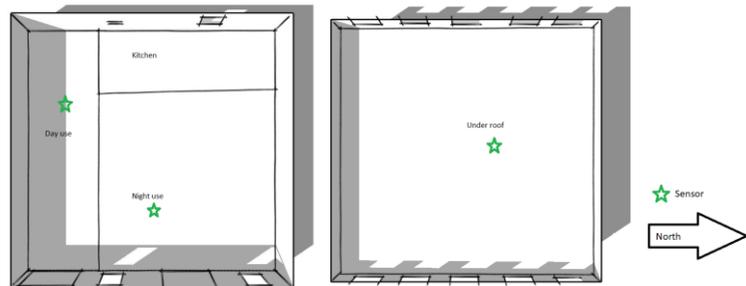


Figura 3. Zonificación del modelo base con tres áreas diferentes, cocina, zonas de uso diurno y nocturno en planta baja, y bajo cubierta en primera planta solo con un único espacio no climatizado, en el caso de estudio nº 1.

- Modelo B. En este BEM las propiedades de los elementos constructivos corresponden con las exigencias del Código Técnico de Edificación español para esta tipología de edificios [110]. El modelo inicial se caracteriza por un aislamiento muy pequeño en su envolvente, esto es, un valor U muy elevado, por tanto, en cumplimiento del CTE, el valor del coeficiente de transferencia para la envolvente externa se redujo agregando un aislamiento teórico. Para la normativa española vigente en Valencia se deben cumplir los siguientes valores: $0.56 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la fachada y el suelo, un valor U de $0.75 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el techo en contacto con una zona no acondicionada y $2.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ para ventanas (marco más cristal). Las propiedades resistencia térmica (R) de los materiales de la envolvente de la casa y las paredes internas se tomaron del Catálogo de

Elementos constructivos del Código Técnico de Edificación [78]. La infiltración a través de grietas también está limitada en la regulación, cuando la compacidad (volumen de velocidad / área de envolvente) es inferior a 2 los resultados de un ensayo Blow Door a 50 Pa deben ser inferiores a 6 h^{-1} . En nuestro caso, consideramos un mapa de seis grietas cuya sección cuadrada es de $0.1 \times 0.1 \text{ m}$ que actuarán de forma dinámica con las condiciones del clima exterior, de la misma forma que en modelo calibrado.

- Modelo C. Para reducir aún más la demanda de energía durante el invierno se han utilizado más estrategias y se ha modificado el BEM considerando varias mejoras: se establece un área de ventanas de 3 m^2 con orientación sur para tener ganancias solares en invierno, y también, para controlar las ganancias solares durante el verano, se ha configurado un dispositivo de sombreado en esta ventana y se ha reforzado el aislamiento considerando un grosor adicional de 5 cm en la envolvente (paredes, techo y piso). El tipo de aislamiento empleado es un poliestireno extruido (XPS) con una conductividad térmica de 0.034 W/mK . Este aumento de espesor del aislamiento global en el edificio tiene un alto efecto en la demanda global de calefacción.
- Modelo D. Para reducir más la demanda de energía de refrigeración, hemos tenido en cuenta el efecto de una ventilación natural mediante la apertura de ventanas en las siguientes condiciones: cuando la temperatura interior es superior a $25 \text{ }^\circ \text{C}$ y la temperatura exterior es más baja, las ventanas están abiertas. La ventilación se simula con la herramienta TRNFlow, por lo que la

efectividad de esa ventilación está sometida a la velocidad y la dirección del viento.

4.3. Resultados y discusión.

La precisión del as-is BEM base de la serie de modelos diseñados para la investigación del alcance de la metodología as-is STD, es consecuente al proceso de calibración que se presenta en la siguiente subsección 4.3.1. En las subsecciones siguientes se presentan y discuten los resultados de demanda energética de climatización (kWh/m² año) y confort térmico (PPD y PMV).

4.3.1. Resultados de calibración.

Se ha calculado la temperatura media mensual y la humedad relativa con datos de monitorización de los meses de invierno. En la Tabla 2 podemos comprobar que las temperaturas de la sala de estar son menores a las de confort. Durante el período de monitoreo, algunos datos se perdieron por descarga de la batería de forma que existe un periodo descartado en los análisis del garaje. Se ha comprobado que, en la sala de estar, la temperatura está por debajo de los parámetros de confort, no obstante, los datos fueron útiles para validar el modelo. Los valores de PPD para el período considerado fueron superiores al 60% y los valores de PMV inferiores a -1.

Tabla 2. Datos experimentales empleados en la calibración y validación del modelo as-is BEM del caso de estudio nº 1. Valores medios mensuales de temperatura y humedad.

	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
	Enero	Febrero	Marzo	Enero	Febrero	Marzo
Sala de estar	13.67	16.13	16.71	67.72	69.20	70.64
Garaje	12.58	14.69	--	71.52	69.66	--
Bajo cubierta	10.89	13.60	14.93	78.34	75.46	75.76
Exterior	11.48	13.24	14.50	72.64	70.18	69.74

Tabla 3. Datos calculados por simulación del as-is BEM calibrado y validado del caso de estudio nº 1: valores medios mensuales de temperatura y humedad.

	Temperatura (°C)			Humedad Relativa (%)		
	Enero	Febrero	Marzo	Enero	Febrero	Marzo
Sala de estar	13.69	16.11	16.35	69.89	66.61	69.18

El modelo ha sido ajustado con la temperatura y la humedad relativa, y se ha calculado en función de la ventilación considerada por TRNFlow. Esto nos ha permitido estimar la infiltración en diferentes áreas de la vivienda estudiadas durante este período. Este proceso se ha utilizado en la sala de estar, siendo esta la zona de la vivienda que actualmente se usa para vivir y está climatizada. La Tabla 3 muestra la temperatura y la humedad promedio mensual calculadas para el modelo validado as-is BEM, es decir, el modelo de la construcción real con la situación climática de la vivienda en el período de monitorización.

4.3.2. Demanda energética.

Se han analizado los rendimientos energéticos del modelo de la vivienda, as-is BEM, utilizando software de simulación transitoria, y considerando la velocidad y dirección del viento. Esto ha permitido obtener estimaciones de la demanda de energía para calefacción y refrigeración del caso real, así como, las previsiones de temperatura y humedad necesarias para obtener condiciones de confort para los cuatro modelos predictivos que se han diseñado en la investigación. Este resultado nos permite saber qué comportamiento tiene cada modelo en relación con la demanda energética y el cumplimiento de la normativa vigente.

Los resultados obtenidos para acondicionar la planta baja de la vivienda se resumen en la Tabla 4,

donde se muestra la demanda de energía y el número de horas que se requiere energía para cada uno de los modelos experimentados.

El Modelo A que no cumple con la regulación española exige una gran cantidad de energía para calentar y enfriar en el acondicionamiento de los espacios. Puede comprobarse también que el número de horas es bastante grande, casi durante todo el año la casa está demandando energía para el acondicionamiento térmico de los espacios interiores de la planta baja.

El Modelo B está diseñado de acuerdo con la normativa española donde, a pesar de reducir considerablemente demanda energética, el número de horas también es considerable.

Para el Modelo C y el Modelo D, se han considerado algunas mejoras adicionales para reducir la demanda de energía. En concreto, el Modelo C, introduce dos acciones con el fin de reducir la demanda de calefacción. Una de ellas ha consistido en aumentar hasta un área global de 3 m² la ventana con orientación sur. También, se ha estimado un sistema de sombra para controlar el sobrecalentamiento producido por el aislamiento. También, un aislamiento adicional en la envolvente reduciendo el valor de su U_{value} . Estas dos acciones tienen un efecto directo sobre la demanda energética y el número de horas en las que se demanda energía, por lo tanto, se han obtenido más horas con condiciones de confort dentro de la vivienda, de forma pasiva, sin la actuación de sistemas de calefacción o de refrigeración. El Modelo D, considera una ventilación natural a través de las ventanas durante el verano, la primavera y el otoño, con el fin de reducir la demanda de refrigeración. Esta medida puede ser ejecutada por los usuarios de la casa, en otro caso, se requeriría un sistema motorizado y automatizado con la consecuente inversión económica y mantenimiento. En cualquier caso, las

medidas adoptadas han determinado una reducción anual de la demanda energética de climatización.

Tabla 4. Demanda energética y nº horas de climatización durante un año de los modelos A, B, C y D, del caso de estudio nº 1.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Q calefacción (kWh/m ² año)	135.19	38.14	14.86	19.56
N.º horas de calefacción	4848	4031	2762	2960
Q refrigeración (kWh/m ² año)	46.49	29.91	25.45	13.00
N.º horas de refrigeración	2428	3159	2905	975
Q total (kWh/m ² año)	181.68	68.05	40.31	32.56
N.º horas de demanda de climatización	7276	7190	5667	3935

4.3.3. Confort térmico.

En nuestra investigación, la influencia del confort térmico se determina aplicando la metodología de la norma internacional ISO 7730 [55] que combina todos los parámetros ambientales medidos o calculados para la estimación indirecta de los valores PMV y PPD. El índice PPD proporciona una predicción cuantitativa del número de personas que estarán insatisfechas con unas determinadas condiciones ambientales. La Figura 4 representa valores PPD para diferentes áreas (la cocina, las habitaciones de uso diurno y nocturno) en cada uno de diferentes modelos experimentados, representados en un diagrama de cajas.

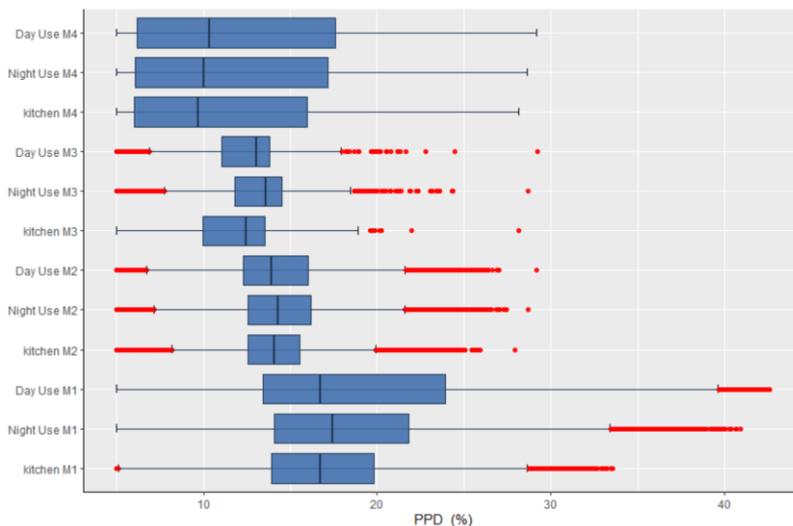


Figura 4. Valores de PPD para diferentes zonas climatizadas en el edificio (cocina, y zonas de uso diurno y nocturno) en cada uno de los diferentes modelos predictivos calculados caso de estudio nº 1.

En el método gráfico Boxplot, el conjunto de datos de entrada se divide en cuartiles. En el diagrama cada caja tiene un valor mínimo, cuartil inferior, mediana, cuartil superior, valor máximo. En el diagrama Boxplot, cada una de las cajas va del cuartil inferior al cuartil superior. La diferencia entre el cuartil superior y el cuartil inferior es la longitud de la caja. En el diagrama, dentro del cuadro de cada caja, se dibuja una línea vertical que corresponde con la mediana del conjunto de datos. La mediana de las muestras inferiores se llama "cuartil inferior" y la mediana de las muestras superiores se llama "cuartil superior" [101]. En el exterior de cada una de las cajas del diagrama, se dibujan dos líneas verticales más, las verticales cercanas a los cuartiles superiores se llaman bigotes superiores y las otras, líneas cercanas a los cuartiles inferiores se llaman bigotes inferiores.

En el Modelo A, los valores de PPD estaban en el rango deseable únicamente en la cocina, la mayoría de las veces. Los modelos 2 y 4, mostraron que los valores

de PPD fueron inferiores al 18% en la mayoría de las ocasiones. En el Modelo C estos valores mostraron aproximadamente un intervalo de confianza del 95% para la diferencia en dos medianas, con valores de PPD inferiores al 19%.

El PMV es un índice que predice el valor promedio de la evaluación climática de un gran grupo de personas. Siempre que el valor de PMV se situó por encima de 0.5 o por debajo de -0.5, se considerará un ambiente interior incómodo. El valor de PMV se ha calculado con aislamiento de ropa de 1 clo y 0.5 clo, respectivamente, durante la temporada de calefacción o refrigeración, y 1.2 met para la actividad de los usuarios. En la Tabla 5 se resumen los valores medios de PMV obtenidos para las diferentes habitaciones (cocina, áreas de uso diurno y nocturno), de cada uno de los diferentes modelos diseñados para el estudio. En el Modelo A, en todas las áreas se detectó un ambiente interior incómodo. En los Modelos B y D, los valores de PMV mostraron que en la mayoría de las ocasiones el ambiente era confortable. El Modelo C, parece ser el más confortable según los valores promedio de PMV, en todas las áreas.

Tabla 5. Valores promedio de PMV para diferentes zonas (cocina, habitaciones de uso diurno y nocturno) para cada uno de los modelos diseñados del caso de estudio nº 1.

	Modelo A	Modelo B	Modelo C	Modelo D
Uso diurno	-0.65	-0.47	0.01	-0.45
Uso nocturno	-0.65	-0.44	0.07	-0.44
Cocina	-0.69	-0.49	-0.02	-0.47

En el Modelo A, los valores de PPD son inferiores al 20% para el período de clima templado (mayo a octubre) y los valores de PMV muestran un ambiente interior confortable (Figura 5).

En el Modelo B, los valores de PPD son inferiores al 20% y los valores de PMV muestran un ambiente interior confortable, excepto para el período de invierno (enero, febrero y diciembre) (Figura 6).

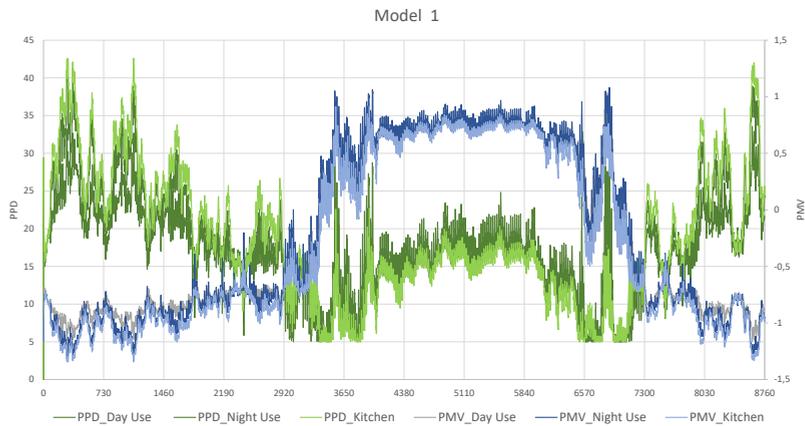


Figura 5. Valores de PPD y PMV para el Modelo A en diferentes zonas (cocina, uso diurno y nocturno) para caso de estudio nº 1.



Figura 6. Valores de PPD y PMV para el Modelo B en diferentes zonas (cocina, uso diurno y nocturno) caso de estudio nº 1.

En el Modelo C, los valores de PPD son inferiores al 20% durante todo el año, excepto durante dos cortos períodos (mayo y octubre) y los valores de PMV muestran

un ambiente interior confortable, excepto durante cuatro cortos períodos (abril y mayo, febrero y noviembre) (Figura 7).



Figura 7. Valores de PPD y PMV para el Modelo C en diferentes zonas (cocina, uso diurno y nocturno) caso de estudio nº 1.

En el Modelo D, los valores de PPD son inferiores al 20% y los valores de PMV muestran un ambiente confortable en el interior durante todo el año, excepto para el período de invierno (enero, febrero y diciembre) (Figura 8).

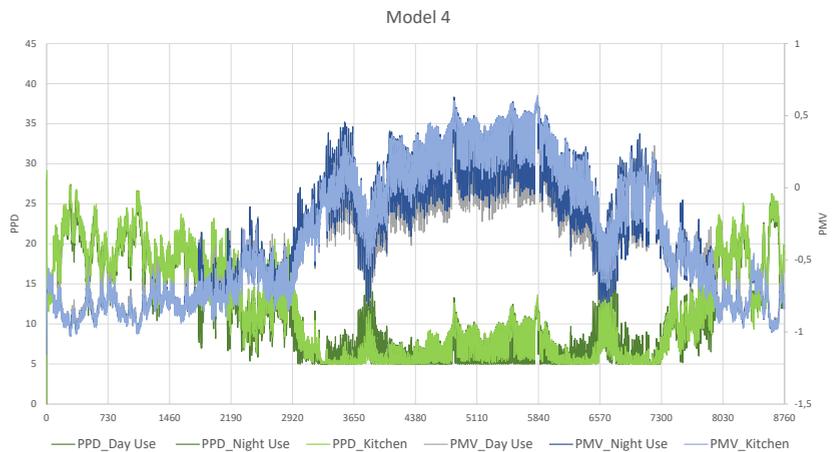


Figura 8. Valores de PPD y PMV para el Modelo D en diferentes zonas (cocina, uso diurno y nocturno) caso de estudio nº 1.

4.3.4. Discusión.

El Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (DB-HE) [45] determina que es necesario considerar el consumo conjunto de refrigeración y de calefacción para el control del consumo global de un edificio residencial. En nuestro caso, una vivienda unifamiliar se ha considerado que los servicios de refrigeración y de calefacción funcionan por suministro eléctrico. Un sistema *split* de aire acondicionado como único sistema de calefacción y refrigeración es normal en este tipo de viviendas, en estos casos es posible encontrar sistemas con perfil de bajo consumo energético y alto rendimiento. Con el fin de obtener el consumo global de energía no renovable se ha considerado un sistema estándar A+ de climatización con eficiencias SEER = 5.6 y SCOP = 4. El DB-HE dispone un consumo global de climatización máximo de 28 kW/m² año para los edificios de uso residencial situados en Valencia, por lo tanto, los Modelos B, C y D cumplen con esta condición. Esto significa que un sistema de climatización de alta eficiencia junto al acondicionamiento mínimo de la envolvente permite cumplir con la regulación, mientras que todas las estrategias adicionales que hemos introducido en los modelos tienen la finalidad de mejorar aún más las condiciones de confort y de reducción del consumo energético.

El confort térmico no está influenciado únicamente por la temperatura, también es necesario considerar otros factores como son la humedad, la temperatura operativa y la velocidad del aire. El análisis de los factores de confort PPD y PMV dan información adicional para la toma de decisiones sobre las soluciones que deban considerarse. En nuestro caso la reducción del consumo de energía ha podido alcanzarse fácilmente mediante un equipo de alto rendimiento y un buen aislamiento para la envolvente del edificio tiene un buen aislamiento. El método de cálculo

del confort térmico empleado atiende también la actividad de las personas, la ropa y una tasa de metabolismo, contabilizando un porcentaje de confianza que se refleja en los valores de PPD. Así, los estudios de confort térmico de los diferentes modelos resultan con rendimientos diferentes.

El Modelo B se ha desarrollado cumpliendo las normas españolas de eficiencia energética en cuanto a los requisitos mínimos de aislamiento térmico de los elementos de la envolvente, y también en la consideración dinámica de las infiltraciones. Los resultados mostraron valores de PPD para el período de invierno (enero, febrero y diciembre) que indicaban condiciones ambientales interiores fuera de los parámetros de confort.

El Modelo C se ha desarrollado con el fin de reducir la demanda de energía durante el invierno, incluyendo varias mejoras aplicadas sobre un modelo anterior (Modelo B). Las medidas que se han aplicado han sido el aumento del área de ventanas en orientación sur y la instalación de un dispositivo de sombreado en esas mismas ventanas, además de un incremento del aislamiento de la envolvente (10 cm. espesor total en paredes, techo y suelo). La simulación de este modelo ha proporcionado valores de PPD fuera de confort durante cortos periodos (en mayo y en octubre).

El Modelo D se ha desarrollado con el fin de reducir la demanda energética de refrigeración considerando una ventilación natural aplicada sobre las condiciones del modelo anterior (modelo desarrollado para reducir la demanda de energía durante el invierno) para ver el efecto cuando las ventanas están abiertas en ciertas condiciones favorables a la refrigeración, mostrando valores PPD fuera de confort de un gran número de usuarios para el período de invierno (enero, febrero y diciembre).

4.4. Conclusiones.

En un contexto de renovación energética del parque inmobiliario, y de optimización de estrategias pasivas, se ha caracterizado térmicamente y se han realizado de ensayos predictivos para la mejora de la eficiencia energética de un edificio característico en clima mediterráneo, alcanzando unos niveles aceptables de confort para sus usuarios. Para ello se ha analizado la eficiencia energética y el confort térmico de los usuarios de un caso real de estudio realizando simulaciones en régimen transitorio. El trabajo se ha basado en la monitorización térmica del edificio y en la creación de un modelo numérico validado desarrollado en TRNSYS que ha permitido calcular las demandas energéticas de diferentes modelos predictivos que consideran diferentes medidas constructivas pasivas, teniendo en cuenta las condiciones reales de viento del emplazamiento y el comportamiento de los usuarios en la ventilación natural.

Aunque el método de estimación de confort térmico de Fanger es un método estacionario, su aplicación de forma dinámica como se presenta en diferentes etapas del trabajo ha aportado información útil, aunque puede presentar algunas limitaciones dadas la naturaleza estacionaria del método Fanger y el régimen dinámico de los ensayos de simulación que se han realizado. No obstante, la metodología empleada en la investigación ha proporcionado fácilmente información para contrastar el diseño de soluciones con la demanda energética. Además, esta metodología ha permitido comprobar que los valores de confort térmico obtenidos los diferentes modelos térmicos no se relacionan directamente con la demanda energética y permiten tomar decisiones para tomar medidas de mejora. En futuros estudios, será necesaria la realización de estudios detallados de confort en situaciones de ambiente interior,

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

estacionarios y representativas, para validar el alcance de la metodología empleada en situaciones reales.

5. Demanda energética de edificios en el cambio climático mediterráneo.

En este capítulo se desarrolla una metodología para realizar ensayos predictivos del comportamiento térmico de edificios en el futuro, teniendo en cuenta las previsiones del cambio climático a lo largo de su ciclo de vida. Además, esta metodología se aplica a una serie de variaciones del caso de una vivienda unifamiliar convencional en clima mediterráneo. En primer lugar, en la sección 5.1, se expone el método propuesto para la creación de ficheros climáticos regionalizados que consideran diferentes tendencias del calentamiento global, a partir de un clima regional característico denominado "Escenario Base". En la sección 5.2 se presentan los casos de estudio, describiendo el edificio que constituirá el denominado Modelo 1, a partir de un modelo as-is BEM calibrado, y sobre el que se desarrolla progresivamente una serie de variaciones en la envolvente, las infiltraciones, los elementos translucidos y en la ventilación, que constituyen una serie de modelos BEM que serán ensayados bajo diferentes proyecciones de cambio climático específicas para el edificio. En las secciones 5.3 y 5.4 se presentan los resultados de los ensayos de simulación y las conclusiones del estudio.

5.1. Metodología del estudio.

5.1.1. Generación de datos meteorológicos mediante la modelización de escenarios.

El clima en Valencia según la clasificación de Köppen-Geiger es Csa (Clima templado cálido con veranos secos y calurosos), conocido como Clima Mediterráneo [44]. Para la ubicación referenciada, se han obtenido archivos de datos meteorológicos de la base de datos Meteonorm exportados al formato TM2. Este archivo se utilizó para modelar el llamado "Escenario Base", un archivo de datos que contiene lecturas climáticas horarias promedio durante el período 1961-1990; de la cual se extrajeron datos sobre Radiación Solar Horizontal Global (GHR, Wh/m²), Humedad Relativa

(HR%), Temperatura de Bulbo Seco (DBT, °C), velocidad del viento (m/s), y dirección del viento.

Para la creación de los datos de proyección climática que se emplean en la investigación se han utilizado dos Modelos de Circulación Global (GCM), bajo dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP8.5), que propone en el Fifth IPCC Assessment Report (AR5) [25]. Estos modelos fueron regionalizados reduciendo la escala de los modelos por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), obteniendo cuatro proyecciones de temperatura. Las series de temperatura fueron suministradas por los modelos CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR. Las particularidades de los modelos climáticos y escenarios de emisión utilizados, y el procedimiento empleado se exponen a continuación.

La existencia de datos climáticos históricos para la ubicación del edificio del caso de estudio ha permitido utilizar técnicas estadísticas analógicas para la reducción de la escala (SDMs) de modelos climáticos. Estas técnicas se basan en relacionar datos a gran escala de modelos climáticos mundiales con registros climáticos a escala local o regional. Este método ha permitido simplificar los cálculos necesarios para la utilización de procedimientos de proyección de regionalización dinámica [102].

Los modelos climáticos a escala continental se basan en principios físicos y se proyectan espacialmente para predecir las tendencias climáticas futuras [37] bajo diferentes hipótesis o escenarios de emisión. Seleccionar un modelo GCM no es tarea fácil, dada variedad disponible. Además, el IPCC aún no ha establecido un modelo único al considerar las fortalezas y debilidades de varios GCM. Finalmente, en nuestra investigación se han considerado dos de los múltiples modelos de GCM existentes:

- CNRM-CM5: Este modelo se utilizó para realizar experimentos en el marco de la Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), Centre National de Recherches Météorologiques [36, 37].
- MPI-ESM-LR, Max-Planck-Institute Earth System Model desarrollado en el Max-Planck Institute for Meteorology en Hamburgo, Alemania, con diferentes resoluciones de MPIOM (MPI-ESM-LR, -MR); la baja resolución (LR) versión de MPI-ESM (MPI-ESM-LR) se utilizó en una amplia gama de CMIP5 simulaciones para permitir inferencias en todo el diseño experimental de CMIP5 [103].

Hemos considerado estudios de simulación que calculan las tendencias de los modelos CIMP5, de forma individual y conjunta en nuestra selección de los modelos climáticos globales [104,105]. Estos estudios verifican diferentes valores y tendencias en la estimación del calentamiento global. De forma conjunta se establece un calentamiento de 0.64 °C/siglo, muy cerca del valor 0.61 °C/siglo calculado con datos de observación de GISTEMP y HadCRUT4 para el período 1901-2000 [104].

Análisis de estos estudios verifican que los modelos CNMR-CM5 y MPI-ESM-LR son válidos para su uso en climas mediterráneos y presentan tendencias contrarias en la predicción de valores de temperatura para el calentamiento global. Así, el primer modelo tiende a suavizar los efectos de calentamiento y el segundo lo sobreestima. Juntos, representan una tendencia promedio de 0.68 °C/siglo, muy cerca de 0.64 °C/siglo, lo que significa la tendencia media de los 24 modelos que se han comparado en estos estudios. El procesamiento de los modelos climáticos globales CNMR-CM5 y MPI-ESM-LR, en lugar de los 24 modelos cubiertos por CIMP5 en el proceso del AR5, ha reducido considerablemente el número de escenarios y simulaciones a realizar en nuestro estudio.

De forma que la selección de modelos climáticos globales para la realización de nuestro estudio se ha centrado en los modelos del sistema terrestre CNMR-CM5 y MPI-ESM-LR, entre los modelos que han sido objeto de CIMP5 en el proceso AR5.

El IPCC ha desarrollado una nueva serie de escenarios climáticos - Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs) para la preparación del AR5 [106]. El número después de la "RCP" se refiere a la intensidad del forzamiento radiativo (medida acumulada de las emisiones humanas de GHGs de todas las fuentes expresadas en vatios por metro cuadrado en la tropopausa debida a la actividad humana en 2100, registrado en la literatura disponible), es decir, desde 2.6 a 8.5 W/ m² [107], cómo se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Descripción de Trayectorias de Concentración Representativas (Representative Concentration Pathways, RCPs) consideradas en la investigación.

Nombre	Forzamiento radiativo	Tendencia
RCP8.5	>8.5 W/m ² in 2100	Aumento
RCP4.5	~ 4.5 W/ m ² en la estabilización después de 2100	Estabilización sin superación

Los cuatro RCPs seleccionados se consideraron representativos de la literatura e incluyeron un escenario de mitigación que condujo a un nivel de forzamiento radiativo muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización media (RCP4.5/RCP6) y un escenario de emisiones muy alto (RCP8.5) [108]. RCP4.5 es considerado como el escenario más probable entre los investigadores [38]. El forzamiento radiativo se estabiliza en 4.5 W/m² sin rebasarse después de 2100 a medida

que se implementan estrategias para reducir los gases de efecto invernadero [39].

Una vez seleccionados dos escenarios de emisión se han utilizado las proyecciones de los modelos climáticos en esos escenarios para estimar los requerimientos energéticos de una vivienda unifamiliar convencional en clima mediterráneo. Se han utilizado archivos meteorológicos típicos (TMY) que han sido creados por métodos estadísticos a partir de datos meteorológicos experimentales registrados desde 1961 hasta 1990, para la zona donde se ubica el edificio. Se ha utilizado la técnica de transformación de datos denominada '*morphing*' para obtener futuros archivos de datos meteorológicos (temperatura ambiente local media mensual, humedad relativa y radiación solar). A continuación, se describen en las ecuaciones (1) y (2) los cambios proyectados en los datos meteorológicos de 1990 a 2100, en relación con dos GCM. La técnica de "*morphing*" implica tres operaciones genéricas: ajuste (desplazamiento); estiramiento lineal (escalado); y la combinación de un ajuste y escalado. Se puede usar una combinación de ajuste y escalado para que la temperatura ambiente refleje los cambios tanto en la media diaria, como en las temperaturas diarias máximas y mínimas [37].

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad (1)$$

$$x = \langle x_0 \rangle_m + \Delta x_m + (1 + \alpha_m) \times (x_0 - \langle x_0 \rangle_m) \quad (2)$$

Dónde Δx_m es el cambio absoluto en el valor medio mensual de la variable para el mes m , y α_m es el cambio fraccionario en el valor medio mensual para el mes m [108].

La técnica '*morphing*' se basa en los estudios de Belcher et al. [108] para construir los archivos TM2 de

escenarios base. De esta forma hemos transformado nuestro escenario base con los modelos CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y dos RCPs (RCP4.5 and RCP 8.5) para obtener los conjuntos de dos períodos: 2048-2052 y 2096-2100, con el mismo lapso. Por lo tanto, se produjeron ocho escenarios climáticos futuros y en total, en nuestra investigación, se han manejado bases datos para nueve escenarios climáticos.

5.2. Caso de estudio nº 2.

Nuestro caso de estudio se basa en la utilización del modelo base calibrado de un edificio unifamiliar tradicional para la estimación de la demanda energética de climatización del edificio en cada uno de los diferentes escenarios. El modelo inicial (Modelo 1) se ha desarrollado cumpliendo con las normas constructivas españolas vigentes para este tipo de edificios [29].

Se han definido varias estrategias y modelos en el proceso de reducción de la demanda de energía. Todas las medidas energéticas se han diseñado para la optimización de la eficiencia energética del escenario base. Para optimizar las ganancias y pérdidas de energía se han utilizado los datos climáticos históricos de la zona. Además, todos los modelos se han desarrollado en un proceso secuencial, introduciendo gradualmente medidas de eficiencia energética en cada uno de ellos, tal y como se muestra en la Figura 9.

Las medidas de eficiencia energética objeto de estudio se clasificaron en ocho modelos diferentes (Figura 9): seis medidas pasivas, tales como, infiltración (Modelo 2), espesor de aislamiento (Modelo 3), acristalamiento y tipo de marco (Modelo 4), área de ventanas (Modelo 5), dispositivos de sombra (Modelo 6) y ventilación cruzada natural (Modelo 7), y medidas activas, como ventilación mecánica adicional y sistemas de recuperación de calor (Modelo 8).

En un primer lugar, la estrategia de optimización ha consistido en reducir la demanda de calefacción lo máximo posible utilizando las siguientes medidas: reducción de infiltraciones, aumento del aislamiento de la envolvente, mejorando la transmitancia del conjunto de acristalamientos y carpinterías de las ventanas, aumentando el área de las ventanas, e instalando un sistema de recuperación de calor.

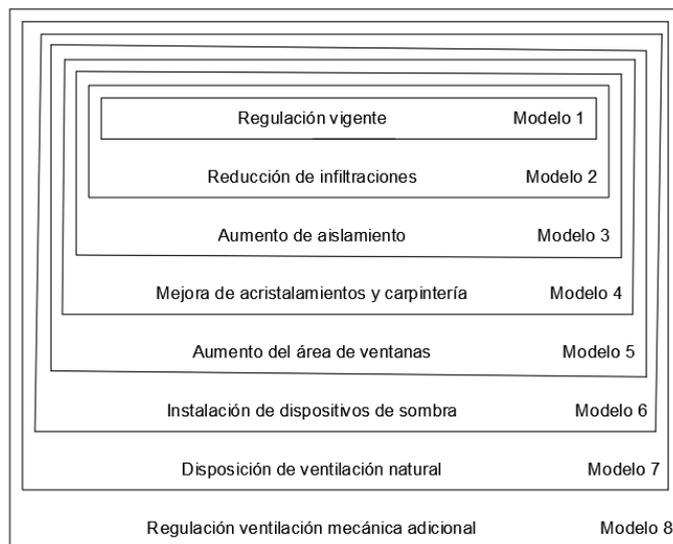


Figura 9. Modelos de casas y secuencias utilizadas en el caso de estudio nº 1.

Una vez que se logró la reducción de la demanda de calefacción, se siguió el mismo proceso para una reducción de la demanda de refrigeración, estudiar la aplicación de las siguientes medidas: instalación de dispositivos de sombreado, disposición de ventilación cruzada natural y de una ventilación mecánica controlada adicional. Por lo tanto, las decisiones en esta fase se determinaron para conseguir la máxima reducción de demanda de refrigeración sin aumentos considerables en la demanda de calefacción.

5.2.1. Tipo de edificio.

La demanda energética de una vivienda unifamiliar convencional suele ser mayor que la de un bloque de apartamentos. En consecuencia, la demanda total de una vivienda unifamiliar puede duplicar la demanda de un edificio de viviendas y su consumo de calefacción puede ser hasta cuatro veces mayor. De forma que estos edificios, que representan solo el 33% del total de viviendas en España, determinan el 46% del consumo en el sector, mientras que los bloques de apartamentos determinan el 53% [109]. Actualmente este tipo de casas tienen una gran demanda entre las personas que desean vivir en zonas periféricas de la ciudad. Estas razones han determinado que la tipología de vivienda unifamiliar convencional se haya considerado para este estudio.

5.2.1.1. *Ubicación y clima*

El edificio está ubicado en la ciudad de Valencia (latitud 39.29 N, longitud -0.23 W) en la costa mediterránea de España. Su clima mediterráneo local se caracteriza por veranos secos y calurosos e inviernos cálidos y húmedos. La demanda media de energía de las viviendas en esta región suele ser inferior a la media nacional [109]. Se han simulado los efectos del cambio climático en dos períodos con el mismo lapso: 2048-2052 y 2096-2100, del clima cálido mediterráneo (clasificación Csa Köppen-Geiger) mediante el uso de diferentes previsiones climáticas y modelos constructivos para la misma vivienda unifamiliar.

5.2.1.2. *Geometría*

La casa tiene una planta cuadrada en la planta baja y una planta rectangular en el primer piso, y su alineación es norte-sur (Figura 10). Su superficie total asciende a 101.79 m²: la planta baja con el espacio común (sala de estar y cocina) y una

habitación, midiendo 58.79 m^2 ; y el primer piso con dos habitaciones (dormitorios) que ocupan 43 m^2 . El área global de las diferentes fachadas es de 37.93 m^2 al norte, 30.23 m^2 al sur, 30.84 m^2 al este, y 30.84 m^2 al oeste. El modelo inicial tiene un área total de ventana de 0.75 m^2 al norte, 2.46 m^2 al sur, 3.1 m^2 al este y 0.7 m^2 al oeste. Se ha considerado el área de la ventana con el fin de reducir la demanda de energía. La casa tiene un techo plano de 16.6 m^2 , un techo inclinado de 43 m^2 y un espacio bajo el techo del piso de 58.79 m^2 . No se ha cambiado la geometría ni la orientación del modelo.

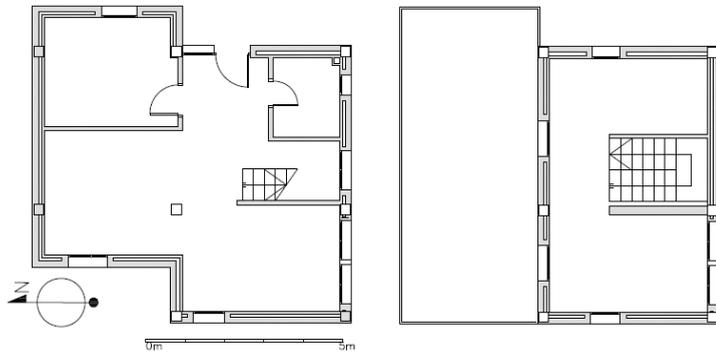


Figura 10. Plano esquemático de planta baja y primera del edificio del caso de estudio nº 2.

5.2.1.3. Sistema constructivo

El modelo inicial de la residencia (Modelo 1) y el diseño de su envolvente cumple con los estándares constructivos españoles [110] y se ha utilizado para evaluar y optimizar el edificio. Este modelo fue optimizado hasta una demanda de energía casi nula constituyendo en el escenario base. La Tabla 7 muestra los diferentes valores de U y de infiltraciones.

Se ha modificado una característica del edificio en cada modelo, para analizar un rango completo de reducciones en la demanda de energía.

En primer lugar, se han modificado los parámetros del edificio para el análisis del aislamiento del cerramiento y, por lo tanto, sus valores U.

Tabla 7. Valor U de transmitancia térmica (W/m^2K) y nivel de infiltración (50 Pa cambios de aire (1/h)) para los modelos del edificio considerado en el caso de estudio nº 2.

Modelos analizados					
Envolvente		Model 1	Model 2	Model 3	Models 4 to 8
U (W/m^2K)	Fachada	1.000	1.000	0.230	0.232
	Suelo	0.650	0.650	0.185	0.185
	Cubierta	0.650	0.650	0.185	0.185
	Carpintería	5.70	5.700	5.700	2.200
	Acristalamiento	3.440	3.440	3.440	2.480
Infiltration (h^{-1})		7.75	0.60	0.60	0.60

Se han considerado las infiltraciones en forma de aberturas o grietas superficiales hacia el exterior, así como una protección solar. El flujo del aire se ha calculado con TRNFlow y se han definido varias aberturas de mayor tamaño en muros. Para considerar una estanqueidad de la envolvente en el modelo afectado de forma dinámica por las condiciones climáticas (viento y temperatura), ha sido necesario definir mapas de grietas en los muros de cerramiento. En el modelo se ha calculado una superficie de grietas equivalente [111]. Para la simulación de las pérdidas y ganancias de aire en función de los cambios de la velocidad y dirección del viento, se ha utilizado la utilidad TRNFlow que proporciona el software TRNSys. El modelo del edificio parametriza una construcción pesada de ladrillo cerámico y hormigón, siendo estos los materiales más utilizados en esta zona. Además, también se han realizado análisis de sistemas de refrigeración pasiva, como la ventilación natural y de recuperación de calor del aire de ventilación.

5.2.1.4. *Cargas internas y externas.*

Se han considerado varias ganancias de calor interno en los modelos de acuerdo con el uso del edificio. Se han utilizado los mismo parámetros en todos los modelos, lo que implica 24 horas de actividad en casa con diferentes cargas. La carga lumínica ha sido de 2.25 W/m^2 para radiaciones solares inferiores a 120 W/m^2 en un plano horizontal. Un refrigerador de 12 W y un conjunto de electrodomésticos de cocina que consumen 329 W se utilizan durante toda la semana durante 3 horas al día. Los dormitorios han tenido ocupación de 7 horas al día y variando la ocupación de la sala de estar durante los fines de semana. Se ha considerado una ocupación máxima desde las 8 p.m. a las 7 a.m. de lunes a viernes, con un 50% de ocupación el resto del día. La ocupación máxima en el fin de semana se ha establecido de 11 p.m. a 9 a.m., con una ocupación del 25% durante el resto del día. Se han tenido en cuenta las ganancias de calor externo, durante todo el año, dependiendo del área de la ventana, y también 0.6 renovaciones por hora de infiltraciones de aire.

5.2.2. Modelo energético del edificio.

En primer lugar, el BEM de vivienda se ha obtenido utilizando el software de simulación TRNSYS 17 [100], a través de la opción multizona para modelos estándar (conocido como Type 56), para calcular la demanda de energía. De forma que los materiales de la envolvente, suelos, muros, techos, carpinterías, acristalamientos, etc., se han definido con el Type 56. Se ha procedido igualmente con el resto de las características necesarias de la vivienda para realizar el análisis de comportamiento térmico; consignas de las temperaturas de confort y de ganancias internas (personas, equipamiento o iluminación) en zonas térmicas, y los porcentajes de

sombra de las ventanas. La temperatura interior de la casa se estableció en valores igual o superior a 20 °C, e igual o inferior a 26 °C durante todo el año para los sistemas de calefacción y refrigeración, respectivamente.

La herramienta TRNFlow de TRNSYS se implementó en el modelo Type 56, para definir la ventilación mecánica y la ventilación cruzada natural. Las fugas de aire también se han considerado en el modelo Tipo 56 como grandes aberturas. No existen estándares constructivos que se refieran a fugas de aire por infiltración para el modelo de vivienda de este estudio, por lo que la cifra de 7.75 renovaciones por hora, como en [111], es una estimación lógica de su valor. Este procedimiento se detalla en trabajos anteriores [112,113]. El Type 34 nos ha permitido controlar las condiciones de los dispositivos de sombra que hemos definido. Para introducir los datos meteorológicos se utilizó el Type 99, que permitiendo la modificación de conjuntos de datos en formato texto ASCII.

La utilización de los parámetros mencionados anteriormente en cada uno de los modelos de este estudio se describe a continuación:

- Modelo 2. Las fugas de aire se reducen a 0.6 renovaciones por hora. Estos valores son medidas de infiltraciones a 50 Pa de diferencia de presión entre el exterior y el interior. Para la mejora del comportamiento del edificio, se ha considerado el valor de las infiltraciones requeridas por el estándar Passivhaus, que limita la certificación del edificio a un ensayo Blower Door con un resultado de 0.6 renovaciones/hora a 50 Pa máximo de infiltración.
- Modelo 3. El valor U de la envolvente se reduce al aumentar el espesor del

aislamiento. El material aislante especificado es lana mineral con una conductividad térmica de 0.04 W/(mK) , con espesores de 0.16 m para los muros, 0.20 m para suelos y cubierta, como aislamiento óptimo en nuestra localización geográfica. La Tabla 7 muestra los valores U resultantes para cada solución constructiva.

- Modelo 4. Se actúa sobre el tipo de ventana; vidrio y marco. El modelo inicial tiene vidrio transparente 4/6/4 con un valor U de $3.44 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ que se cambia a baja emisividad 4/8/4 vidrio con un valor U de $2.48 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. De la misma manera, marcos de ventanas de aluminio con un valor U de $5.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ se cambian por Cloruro de Polivinilo, PVC, perfiles con 5 cámaras de aire con un valor U de $2.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.
- Modelo 5. En este modelo, el área de ventana en la fachada sur se aumenta a 6 m^2 , Las otras fachadas tienen la misma área de ventana. Las áreas se resumen en la Tabla 8.
- Modelo 6. Se han considerado varios dispositivos externos de sombreado en las fachadas este, sur, y oeste. El factor de sombreado se utiliza en diferentes períodos durante el año. En verano, del 1 de junio al 31 de agosto, el control de los dispositivos de sombreado se implementa de 8 a.m. a 8 p.m. cuando la temperatura exterior es superior a $22 \text{ }^\circ\text{C}$. En primavera y otoño, del 1 de marzo al 31 de mayo y del 1 de septiembre al 31 de noviembre, el control de los dispositivos de sombreado se implementa de 8 a.m. a 8 p.m. cuando la temperatura exterior es superior a

22 °C y la temperatura interior superior a 23 °C.

Tabla 8. Áreas de paredes y ventanas que han sido consideradas en cada uno de los diferentes modelos del caso de estudio nº 2.

	Modelo 1 to 5			Modelo 6 to 8	
	A_{tot} (m ²)	A_{muro} (m ²)	$A_{ventana}$ (m ²)	A_{muro} (m ²)	$A_{ventana}$ (m ²)
Este	30.84	27.74	3.1	27.74	3.1
Sur	30.23	27.83	2.4	24.23	6.0
Oeste	30.84	30.14	0.7	30.14	0.7
Norte	37.92	37.17	0.75	37.17	0.75

- Modelo 7. En este modelo, se considera un sistema de ventilación de recuperación de calor de alta eficiencia con una eficiencia del 75%. El sistema de recuperación funciona en verano e invierno. En verano, cuando la refrigeración está conectada y cuando la temperatura interior es superior a 26 °C, tanto las puertas como las ventanas están cerradas, y la temperatura interior es más baja que la temperatura exterior. En invierno, donde la demanda de calefacción está conectada y cuando la temperatura interior es inferior a 21 °C, las puertas y ventanas estarán cerradas, y la temperatura interior es más alta que la temperatura exterior. La ventilación cruzada natural también se considera en este modelo. En este caso, ventanas y puertas se abren cuando las temperaturas exteriores están entre 21 °C y 25 °C. Este modelo solo funciona en primavera, verano y otoño. Además, las aberturas de puertas y ventanas se cambian según los requisitos de HVAC.

- Modelo 8. En este modelo se considera ventilación mecánica adicional. Se activa en verano, primavera, y otoño cuando las puertas y ventanas están cerradas, y en verano, del 1 de junio al 31 de agosto, si la temperatura exterior es inferior a 25 °C. En este caso, el flujo de aire de ventilación (0.8 renovaciones/h) aumenta hasta que el valor se duplica. En primavera y otoño, del 1 de marzo al 31 de mayo, y del 1 de septiembre al 31 de noviembre, el control se activa si la temperatura exterior es inferior a 21 °C, pero cuando existen requisitos de refrigeración, el flujo de aire de ventilación (0.8 renovaciones/h) se incrementa en 1.6 veces su valor original.

5.3.Resultados y discusión.

5.3.1. Variación climática.

Se han obtenido datos meteorológicos en los escenarios CNRM-CM5 and MPI-ESM-LR para la ubicación después de aplicar el procedimiento de “*morphing*”, considerando dos escenarios de emisión (RCP4.5 y RCP 8.5). Los cambios proyectados en los datos meteorológicos de 1990 se transformaron para representar las condiciones climáticas promedio pronosticadas en dos períodos: 2048-2052 y 2096-2100, con el mismo lapso.

Por lo tanto, ocho escenarios futuros (dos GCM x dos RCPS x dos periodos) se compararon con el escenario base. Para mayor claridad, estas predicciones se han agrupado por año (Tabla 9) y por mes (Figura 11), pudiendo describir las siguientes tendencias en relación con estos cambios. El promedio de temperatura del bulbo seco (DBT) aumenta en todos los escenarios. Sin embargo, los mayores aumentos resultan para RCP8.5 en el periodo

2096-2100: 3.60 °C en el escenario CNRM-CM y 5.33 °C en el escenario MPI-ESM-LR, mientras que para RCP4.5 las temperaturas aumentarían en 1.56 °C en el escenario CNRM-CM y en 2.62 °C en el escenario MPI-ESM-LR.

La Figura 11 muestra las temperaturas medias mensuales para diferentes escenarios en comparación con el escenario base. En todos los casos, excepto para el escenario MPI-ESM RCP 8.5 en el que la temperatura media mensual aumenta en cada mes, las temperaturas suben o bajan aleatoriamente durante los primeros seis meses, aunque la temperatura siempre sube durante los últimos seis.

La Tabla 9 muestra la diferencia mensual promedio para la temperatura del bulbo seco en dos períodos: 2048-2052 y 2096-2100, con el mismo intervalo de tiempo en los escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y para RCP4.5 y RCP8.5 en comparación con el escenario base.

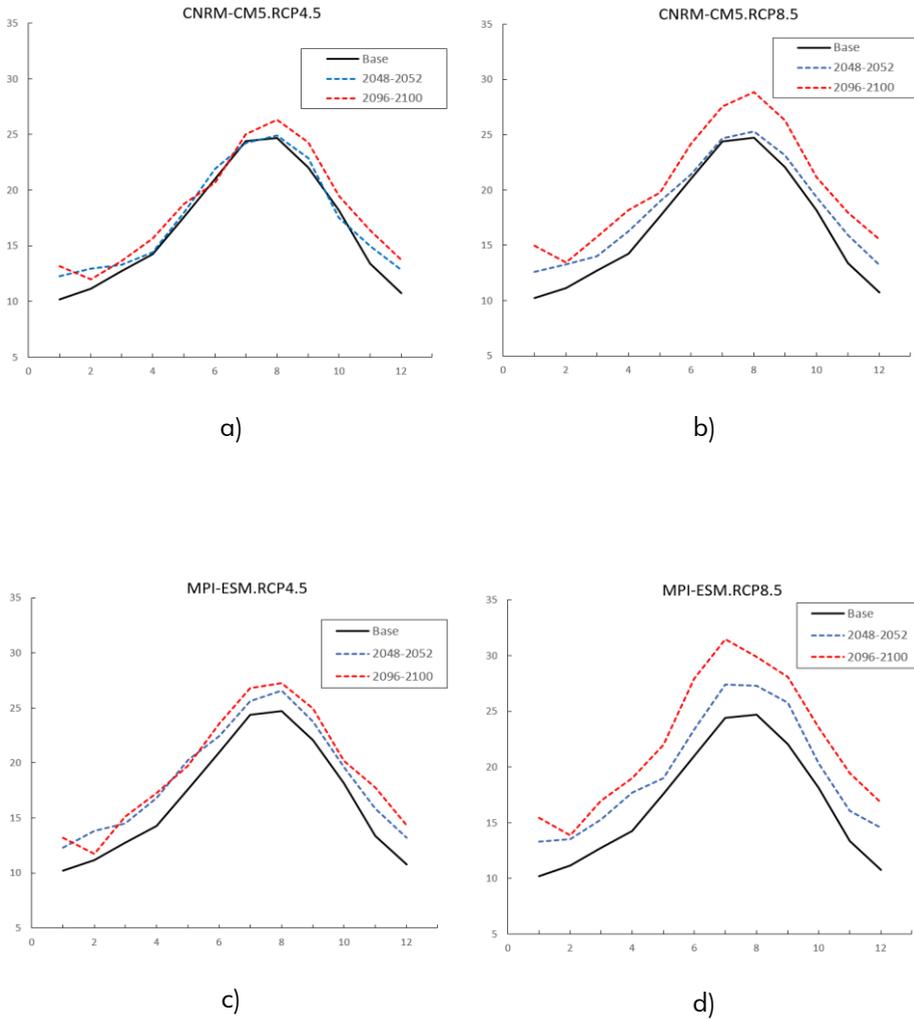


Figura 11. Temperatura media mensual del bulbo seco (DBT) para el escenario base, en dos periodos: 2048-2052 y 2096-2100 en los siguientes escenarios: a) CNRM-CM5 y RCP4.5; b) CNRM-CM5 y RCP8.5; c) MPI-ESM-LR y RCP4.5; d) escenario MPI-ESM-LR y RCP8.5.

Tabla 9. Diferencia promedio mensual para la temperatura del bulbo seco, en períodos 2048-2052 y 2096-2100 en escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y Vías de concentración Representativas RCP4.5 y RCP 8.5 en comparación con el “Escenario Base”.

	2048-2052				2096-2100			
	CNRM-CM5		MPI-ESM-LR		CNRM-CM5		MPI-ESM-LR	
Mes	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
1	2.04	2.37	2.09	3.10	2.99	4.74	2.98	5.22
2	1.80	2.14	2.65	2.37	0.83	2.32	0.57	2.70
3	0.59	1.27	1.78	2.53	0.89	3.06	2.37	4.25
4	0.19	2.03	2.57	3.44	1.41	3.91	2.99	4.74
5	0.37	1.41	2.67	1.41	1.15	2.16	2.17	4.38
6	0.91	0.41	1.45	2.36	-0.33	3.15	2.56	6.90
7	-0.15	0.28	1.23	3.03	0.61	3.14	2.41	7.05
8	0.18	0.58	1.89	2.56	1.64	4.14	2.53	5.17
9	0.80	1.10	1.69	3.69	2.24	4.23	2.86	6.02
10	-0.67	1.20	1.45	2.16	1.34	2.98	2.03	5.41
11	1.58	2.55	2.49	2.67	3.01	4.59	4.39	6.06
12	2.10	2.48	2.42	3.79	3.00	4.78	3.60	6.03

El cambio climático se ha analizado en función del valor grados-hora a lo largo de un año. La Figura 12 muestra el número grados-hora de calefacción y refrigeración durante un año (incluso la suma de ambos), usando las temperaturas de consigna (20 °C y 26 °C) como parámetros de confort. El número grados-hora de calefacción representa que la calefacción se activa dentro de la vivienda cuando la temperatura exterior es inferior a 20 °C. En este caso, el número grados-hora de

calefacción disminuye a lo largo del año. El número grados-hora de refrigeración representa una demanda de refrigeración cuando las temperaturas exteriores son superiores a 26 °C. Es interesante señalar que el número total grados-hora (calefacción y refrigeración) es bastante similar debido al aumento en grados-hora de refrigeración que se compensa con una disminución en grado-hora de calefacción.

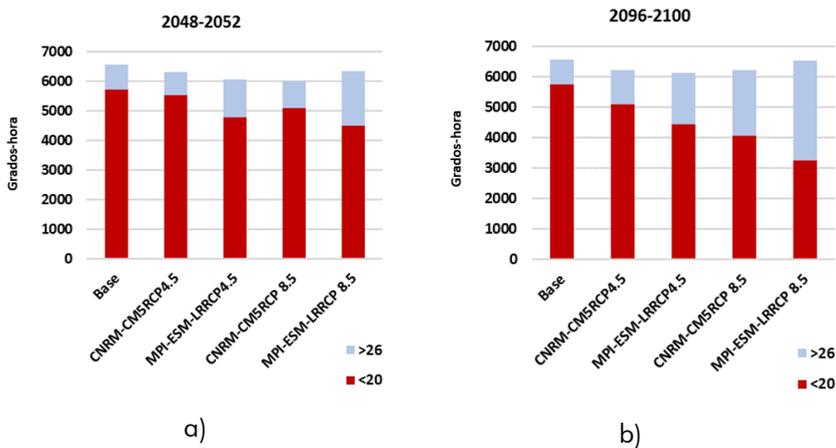


Figura 12. Número de grados-hora de calefacción (rojo) y refrigeración (azul) en un año, Uso de temperaturas de consigna (20 °C y 26 °C) para los periodos a) 2048-2052 y b) 2096-2100, de acuerdo con los escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y las Vías de Concentración

5.3.2. Efectos sobre la demanda de energía.

La Figura 13 muestra la demanda anual de energía de acuerdo con el escenario base para los modelos considerados. La demanda energética para el escenario base y el Modelo 1 corresponde con el modelo de edificio acorde con la normativa española [110]. Este modelo tiene una demanda total anual de energía de 111,31 kWh/m² año, donde el 85% de la demanda es demanda de calefacción; esto es característico de los inviernos suaves y veranos húmedos del clima mediterráneo. El escenario base aplicado al Modelo 8

5.3.2.2. *Medidas pasivas.*

El cambio climático en el período 2048-2052 disminuye la demanda de energía para el Modelo 1 (Figura 13), siendo constante el número total de grados-hora de calefacción y de refrigeración (Figura 12). Además, se puede ver que la demanda de refrigeración aumenta y la demanda de calefacción disminuye, lo cual está directamente relacionado con el aumento de los grados-hora de refrigeración y la reducción de los grados-hora de calefacción.

En el Modelo 2 (Figura 13), se estableció un nivel de infiltración de 0.6 ren/h a 50 Pa utilizando el estándar PassiveHaus (PH), un estándar de construcción que tiene como objetivo reducir el consumo de energía en un 90% dentro de las viviendas. En comparación con el modelo anterior (Tabla 11), el Modelo 2 reduce la demanda de energía en un 44% en el escenario base (Figura 13), en al menos un 32% en el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 en el período 2096-2100, y en un 42% en el escenario CNRM-CM5 RCP4.5 en el período 2048-2052.

En el Modelo 3 se cambió el espesor del aislamiento. En comparación con el modelo anterior (Modelo 2), este modelo redujo la demanda de energía en un 45 % en el escenario base, en al menos un 28 % en el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 en el período 2096-2100, y alrededor de un 43 % en el escenario CNRM-CM5 RCP4.5 en el período 2048-2052 (Tabla 11).

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

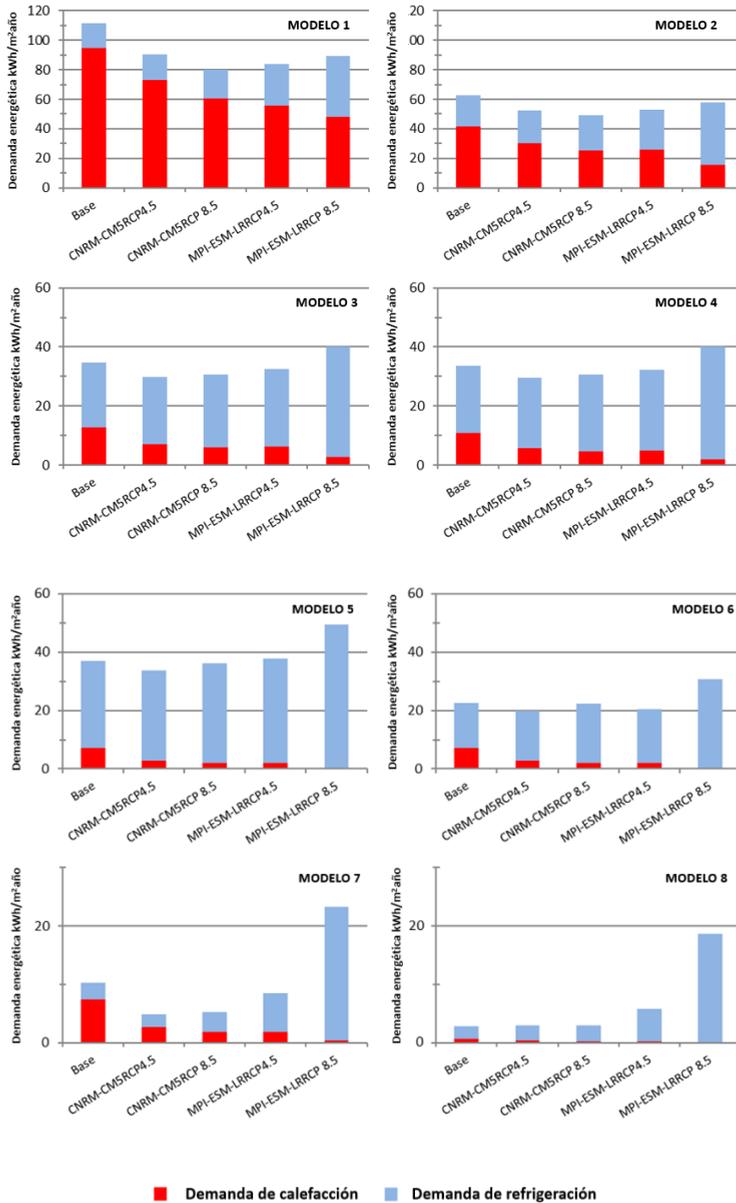


Figura 13. Demanda anual de energía para el Escenario Base y diferentes modelos en una ventana de 2048 a 2052 de acuerdo con los siguientes escenarios: CNRM-CM5 y RCP4.5; CNRM-CM5 y RCP8.5; MPI-ESM-LR y RCP4.5; and MPI-ESM-LR y RCP8.5 (caso de estudio nº 2).

Tabla 11. Porcentaje de ahorro de energía en comparación con el escenario base (en los períodos 2048-2052 y 2096-2100) para escenarios CNRM-CM5 y MPI-ESM-LR y para Vías de Concentración Representativas RCP4.5 and RCP 8.5.

Modelo	Base	2048-2052				2096-2100			
		CNRM-CM5		MPI-ESM-LR		CNRM-CM5		MPI-ESM-LR	
		RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
2	44 %	53 %	56 %	52 %	48 %	52 %	48 %	48 %	33 %
3	69 %	73 %	73 %	71 %	64 %	69 %	66 %	66 %	52 %
4	70 %	74 %	73 %	71 %	64 %	69 %	66 %	66 %	52 %
5	67 %	70 %	67 %	66 %	56 %	63 %	59 %	59 %	41 %
6	80 %	82 %	80 %	82 %	72 %	78 %	75 %	75 %	61 %
7	91 %	96 %	95 %	92 %	79 %	91 %	83 %	86 %	56 %
8	97 %	97 %	97 %	95 %	83 %	94 %	86 %	89 %	65 %

Además, en el Modelo 4 (Figura 13), la demanda de refrigeración se reduce, la demanda de calefacción aumenta y no hay una reducción significativa en la demanda anual de energía. Resultados similares se obtienen en el Modelo 5, donde se reduce la demanda de refrigeración, pero la demanda de calefacción aumenta y la demanda de energía aumenta en un 10 % en comparación con el Modelo 4 en el escenario base (Tabla 11). En cuanto al Modelo 5, la demanda de calefacción (80 %) es mucho mayor que la demanda de refrigeración (Figura 13).

El Modelo 6 en comparación con el modelo anterior (Modelo 5), reduce la demanda de energía en un 39 % en el escenario base, y hay una reducción de la demanda de energía en al menos un 34 % de

acuerdo con el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 en el período 2096-2100, y una reducción del 46 % de acuerdo con el escenario CNRM-CM5 RCP 8.5 en 2048-2052. (Tabla 11). La demanda de calefacción es bastante similar a la del modelo anterior y la demanda de refrigeración se reduce considerablemente (50 %) (Figura 13).

5.3.2.3. *Medidas activas.*

También se proponen medidas activas. En comparación con el Modelo 6, el Modelo 7 reduce la demanda de energía en el Escenario Base en un 55 %, sin embargo, no se reduce significativamente en el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 en el período 2096-2100, y se reduce en un 59 % en el escenario CNRM-CM5 RCP 4.5 en el período 2096-2100 (Tabla 11). En este modelo, la demanda de calefacción es bastante similar a la del modelo anterior y la demanda de refrigeración se reduce drásticamente.

El Modelo 8 utiliza ventilación mecánica adicional con un sistema de recuperación de calor. En comparación con el modelo anterior (Modelo 7), el Modelo 8 reduce la demanda de energía en el escenario base en un 72 %, y hay al menos una reducción del 19 % en el escenario MPI-ESM-LR RCP 8.5 en el período 2096-2100, y una reducción del 30 % en el escenario CNRM-CM5 RCP 4.5 en el período 2096-2100. En este modelo, se reduce la demanda de calefacción y refrigeración, siendo muy drástica la reducción de la demanda de calefacción (90 %).

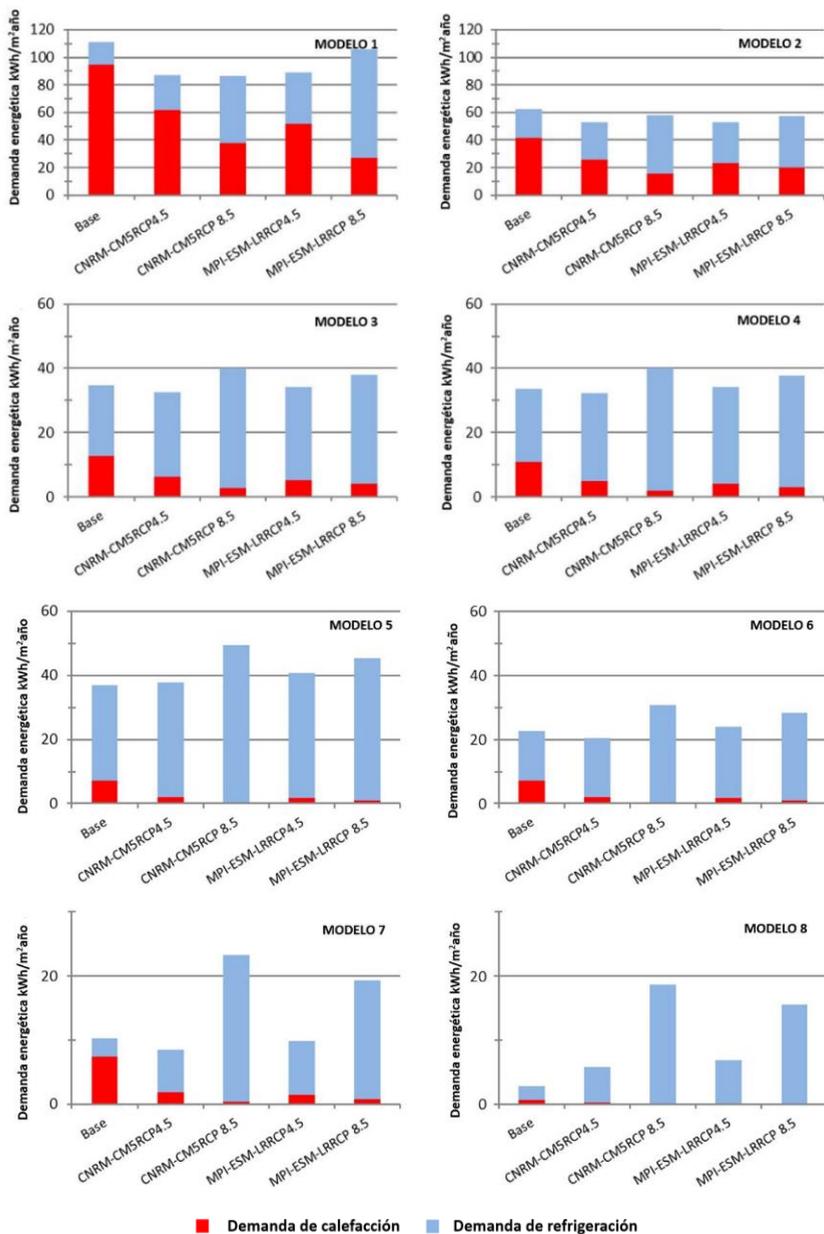


Figura 14. Demanda anual de energía para los diferentes modelos del caso de estudio nº 2, en el período 2096-2100, para el Escenario Base y para los siguientes escenarios: CNRM-CM5-RCP4.5; CNRM-CM5 - RCP8.5; MPI-ESM-LR - RCP4.5; y MPI-ESM-LR - RCP8.5.

5.3.2.4. *Resumen para todos los modelos.*

En esta sección, se muestran los ahorros de energía de cada modelo debidos a una reducción de la demanda de energía en comparación con el Modelo 1. La Figura 13 muestra el ahorro de energía para el período 2048-2052 en cuatro escenarios (CNRM-CM5 RCP4.5, CNRM-CM5 RCP8.5, MPI-ESM-LR RCP4.5, y MPI-ESM-LR RCP8.5). En el Modelo 8 se implementan todas las medidas y se obtiene un ahorro energético de al menos el 80 %, independientemente del escenario climático para el periodo 2048-2052, e incluso un ahorro energético del 95 % en los siguientes escenarios: CNRM-CM5 y RCP4.5, CNRM-CM5 y RCP8.5, y MPI-ESM-LR, y RCP4.5.

La Figura 14 muestra el ahorro de energía para el período 2096-2100 en cuatro escenarios (CNRM-CM5 RCP4.5, CNRM-CM5 RCP8.5, MPI-ESM-LR RCP4.5, and MPI-ESM-LR RCP8.5). En el Modelo 8, se implementan todas las medidas y se obtienen ahorros energéticos de al menos el 65 % independientemente del escenario climático en el período 2096-2100, con reducciones de la demanda de energía del 89 % en el escenario CNRM-CM5.

5.4. Conclusiones.

Considerando el cambio climático, se han obtenido diferentes escenarios climáticos, según diferentes tendencias, y las variaciones de los modelos climáticos y las previsiones. Más en particular, las tendencias previstas en los períodos 2048-2052 y 2096-2100 han pronosticado un aumento de las temperaturas en previsiones del clima regionalizadas en Valencia. De esta forma, ocho escenarios futuros (dos GCM x dos RCPS x dos períodos) se han comparado con el escenario base. El promedio de temperatura del bulbo seco (DBT) aumenta en todos los escenarios. En general, las

temperaturas aumentan aleatoriamente durante el año en todos los casos, excepto para algunos meses en el escenario CNRM-CM5-RCP4.5 en los que descienden las temperaturas medias mensuales. Se puede concluir que la temperatura modelada para el futuro presenta fluctuaciones a lo largo del año sin resultar un incremento constante para el mismo.

En este estudio, se ha analizado el comportamiento térmico de una vivienda con diferentes soluciones arquitectónicas y constructivas bajo diferentes escenarios de cambio climático. El modelo inicial (Modelo 1) se ha explorado con un escenario base obtenido de datos climáticos TMY2. Con estos valores se ha optimizado la vivienda para obtener la demanda energética mínima durante un año, para lograr un edificio de demanda de energía casi nula. La simulación energética de diferentes modelos optimizados de la misma vivienda nos ha permitido comparar sus rendimientos de acuerdo con los diversos escenarios climáticos de la investigación. El Modelo 1 de la vivienda se ha desarrollado con normas constructivas vigentes en España [110], posteriormente ese modelo ha sido optimizado progresivamente logrando una vivienda de muy baja demanda de energía de climatización en el escenario base. Se han seguido diferentes pasos en este proceso de optimización: primero, alcanzando reducciones en la demanda de calefacción para posteriormente diseñar reducciones en la demanda de refrigeración. Todas las medidas analizadas fueron pasivas, excepto una ventilación mecánica adicional.

Se han simulado y analizado ocho modelos diferentes de mejora para una vivienda en diferentes escenarios climáticos. Se ha desarrollado un análisis comparativo de las diferentes estrategias pasivas y activas aplicadas a un mismo edificio en distintos escenarios de previsión climática. Este análisis exhaustivo ha caracterizado el cambio climático y su influencia en el rendimiento térmico de diferentes estrategias de intervención de edificios en un clima mediterráneo. Esto,

ha contribuido al conocimiento existente sobre estrategias pasivas para el rendimiento de un edificio unifamiliar. Nuestro análisis ha mostrado cambios significativos en el rendimiento térmico del caso de estudio en escenarios climáticos futuros y de condiciones climáticas recientes. Los resultados han demostrado que el comportamiento térmico del edificio difiere en cada escenario. En todos los modelos ensayados, cuando la temperatura externa aumenta, la demanda de calefacción disminuye significativamente, mientras que la demanda de refrigeración y los riesgos de sobrecalentamiento aumentan considerablemente en los escenarios climáticos futuros. Sin embargo, los cambios en las condiciones climáticas modificaron la forma de la demanda global de energía para todos los modelos.

El comportamiento previsto del edificio se ha mostrado diferente para las demandas de calefacción y de refrigeración. La demanda de refrigeración aumentó en el escenario futuro, mientras que disminuyó completamente en el período 2096-2100 para el Modelo 8 en el caso de un edificio de demanda de energía casi nula. La demanda de calefacción del Modelo 5 es cero en los escenarios MPI-ESM-LR y RCP 8.5, cuando se aumenta el área de la ventana respecto del Modelo 1. En estos escenarios, la ventilación natural del Modelo 8 no funciona adecuadamente, debido a las altas temperaturas exteriores.

Por lo tanto, se ha demostrado que el cambio climático tiene un efecto directo en la demanda de energía en los hogares. Las proyecciones climáticas predicen claramente que la ventilación natural y forzada son las más sensibles a los efectos del cambio climático en estos escenarios futuros. Los análisis de los modelos 7 y 8, muestran que los mayores aumentos y disminuciones de demandas de climatización se producen debido a la influencia del clima en la ventilación. En el futuro, las estrategias relacionadas con la ventilación natural tendrán un influencia más baja, en los edificios de clima mediterráneo. En particular, las medidas basadas en

una ventilación mecánica adicional (Modelo 8) no tendrán un efecto considerable en los edificios de consumo energético casi nulo.

Aunque cada uno de los modelos de vivienda que hemos analizado ofrece diferentes respuestas en cada escenario climático, las estrategias que tienen un mayor efecto en términos globales de energía son las relacionadas con la utilización de persianas, el aumento del aislamiento térmico y la reducción de la infiltración. Por lo tanto, los diseños de viviendas de consumo casi nulo para el futuro más próximo deberían garantizar una construcción estanca que reduzca las infiltraciones. También se puede afirmar que un buen aislamiento es garantía de confort y de menor consumo energético. En este sentido, otro aspecto esencial para analizar la reducción en la demanda global de energía es la influencia de la luz y la energía solar. Ha quedado patente con el Modelo 4 que las actuaciones sobre los marcos y el acristalamiento de las ventanas han sido las de menor efecto sobre la demanda energética global del edificio.

Otro aspecto de la investigación se refiere al consumo de energía en los edificios en las últimas décadas [17]; siendo este un interés a nivel global reflejado en las regulaciones europeas que aspiran a un parque inmobiliario de bajo nulo consumo energético [102]. Desde esta perspectiva, se han analizado los efectos del cambio climático en una vivienda que cumple con la normativa de edificación vigente en el contexto de su rehabilitación a un edificio de bajo consumo energético. Esta serie de mejoras se han propuesto para analizar su alcance en las variaciones de la demanda energética y para poder evaluar su efectividad a lo largo de los años.

6. Metodología as-is T-BIM para la caracterización térmica.

Este capítulo documenta la última fase de la investigación de la tesis, donde se desarrolla una metodología de modelización térmica de edificios existentes para simulación energética, que hemos denominado metodología as-is T-BIM. Esta metodología se basa en el uso de datos del escaneo termográfico tridimensional de las superficies interiores de las zonas térmicas del edificio. Este sistema de diagnóstico genera automáticamente nubes de puntos termográficas 3D-T de edificios y as-is BEM con estándares IDF y gbXML para su utilización con software de simulación de energía compatible con estos formatos. La metodología as-is T-BIM se ha ensayado en la realización de estudios predictivos de comportamiento térmico de un bloque de cinco zonas térmicas de un edificio de oficinas. Ese mismo caso de estudio también se ha ensayado con un método estándar (STD, basado en las recomendaciones de AG14) y se ha simulado bajo las mismas condiciones predictivas. Finalmente, se han comparado los resultados de la aplicación de ambos métodos, as-is T-BIM y STD, al mismo edificio.

6.1. Metodología del estudio.

En esta sección, se explica un método de creación de modelos energéticos que hemos denominado as-is T-BIM. La explicación del método se realiza de forma comparada con el estándar de modelado energético as-is STD que hemos desarrollado y aplicado con un caso de estudio, en el Capítulo 4, y que corresponde al enfoque común a las especificaciones BCSA-AG14 para la creación y calibración de as-is BEM con datos experimentales. Como se muestra en la Figura 15, ambos métodos, as-is STD y as-is T-BIM, proporcionan modelos BEM semánticos con esquemas estándar (gbXML y IDF), exportables para su utilización por software estándar compatible de simulación energética para realizar cálculos predictivos, así como de caracterización térmica y energética de edificios.

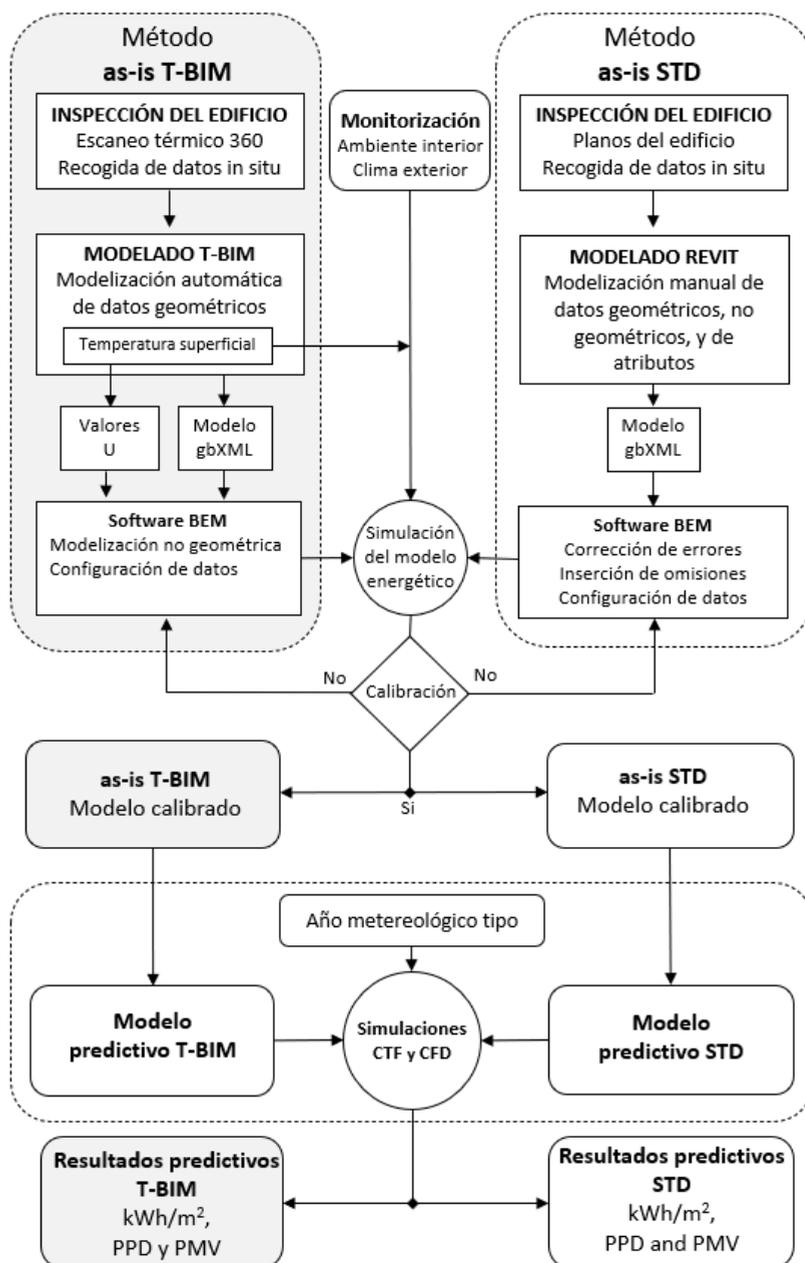


Figura 15. Esquema de los procedimientos y resultados de la investigación aplicada al caso de estudio nº 3.

El esquema de la Figura 15 representa las fases de recopilación de datos, modelado, simulación, resultados y análisis, de las metodologías as-is T-STD y as-is T-BIM. Existen diferentes procedimientos durante las fases de recopilación de datos y de modelización. También en los procedimientos de las fases de calibración, para las simulaciones con cálculos basados en algoritmos de transferencia de calor (*Conduction Transfer Functions, CTF*), y de parametrización de contorno, en las simulaciones basadas en cálculos computacionales de dinámica de fluidos (*Computational Fluid Dynamics, CFD*). Las diferencias surgen principalmente en las técnicas de recolección de datos 360°, también en el grado de automatización del modelado, y en algunos procedimientos BEPS. En particular, el método as-is STD se basa en procedimientos manuales de modelado de recopilación de datos.

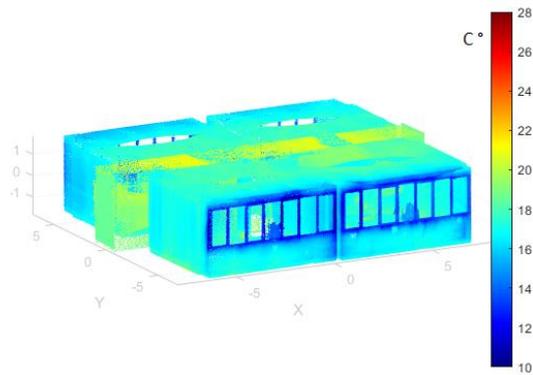
Por el contrario, el método as-is T-BIM genera automáticamente series horarias de nubes de puntos y utiliza procedimientos también automáticos para modelar la geometría de los elementos y asignarles series temporales con valores medios de temperatura superficial. Esta información, sobre temperaturas superficiales, facilitará la calibración de los modelos que se utilizarán en simulaciones CTF.

6.1.1. Recogida de datos.

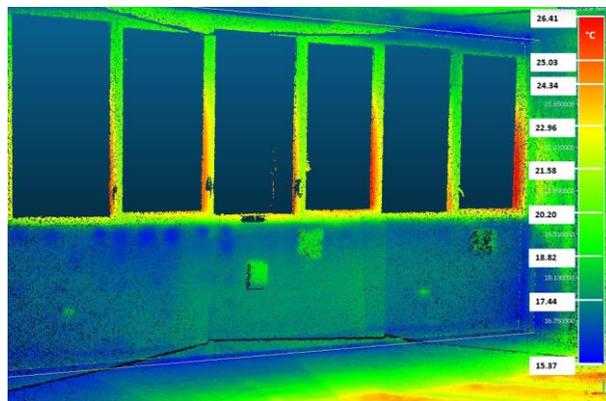
La generación de modelos as-is STD comienza con la recopilación de datos del estado actual de las zonas térmicas de un edificio. La recogida de datos consiste en la identificación de aquellas zonas térmicas y la medición de los elementos constructivos que las constituyen. También incluye la recopilación de datos relacionados con los modos de uso y los sistemas de servicio disponibles. En la mejor de las situaciones, La información geométrica y constructiva del edificio se puede encontrar en la documentación existente,

aunque siempre tendrá que ser verificada in situ. También será necesaria la instalación de sistemas de monitorización dentro de las zonas térmicas interiores de los edificios, así como la disponibilidad de datos climáticos exteriores correspondientes al periodo de monitorización interior.

El método as-is T-BIM proporciona un sistema de medición automatizado basado en el uso de un escáner láser y una cámara termográfica 360°, que proporciona la geometría de las zonas y la información térmica de la superficie, en forma de nubes de puntos de cada zona del edificio. La información térmica superficial de cada zona térmica y sus contornos se complementan con información de los sistemas de monitorización de temperatura ambiental (T_{amb}) y humedad relativa (HR_{amb}). El sistema de sensores utilizado para la recopilación de datos as-is T-BIM se compone de un escáner 3D de rango de escaneo medio, una cámara en color de alta definición (HD) y una cámara termográfica. Este sistema se aplica sucesivamente a las diferentes zonas de un edificio, almacenando las coordenadas XYZ de cada zona generada por el sensor, un conjunto de imágenes RGB y otro conjunto de imágenes IRT. El procesamiento de toda esta información genera un conjunto de nubes de puntos para cada zona, es decir, un conjunto de coordenadas 3D referidos a un sistema compartido donde cada punto tiene un color Rojo, Verde Azul (RGB) y una temperatura asociada aparente. En nuestro caso, la frecuencia de medición es de intervalos de 1 hora, completando 1 escaneo y 5 instantáneas termográficas de 360° por zona. Las 5 instantáneas se sintetizan en una única nube de puntos térmicos promedio de mayor precisión. Los valores de temperatura superficial aparente son del orden de 2 puntos/cm² (Figura 16).



(a)



(b)

Figura 16. Nube de puntos térmica as-is 3D-T del caso de estudio nº 3: a) Perspectiva del bloque de las cinco zonas térmicas del ; b) Vista interior de una zona térmica.

Las temperaturas superficiales aparentes ($T_{ap,sup}$) de cada punto que genera inicialmente el sistema térmico se corrigen con los parámetros de emisividad (ϵ) de cada material y la temperatura reflejada (T_{ref}) registrada en cada pared. Una cinta aislante convencional y un papel de aluminio arrugado se adhieren sobre los elementos básicos de la envolvente en cada zona térmica, a modo de cuerpo negro y una estufa Lambert, respectivamente (Figura 17). Las temperaturas aparentes de estos objetivos servirán para el cálculo

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

automático de la temperatura superficial interior y la temperatura real de cada punto.

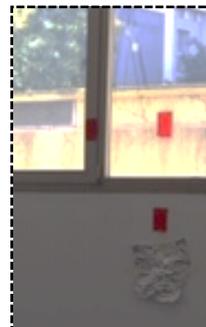
Los valores de las temperaturas de nubes de puntos se utilizarán para el cálculo de las temperaturas medias superficiales corregidas en función de la emisividad de los materiales y sus temperaturas reflejadas. ($T_{surf.int}$). Estos valores de temperatura promedio formarán la base para el cálculo del valor U de elementos de la envolvente. También, $T_{surf.int}$ podrá utilizarse para la calibración del modelo BEM para la simulación CTF de las habitaciones. Además, la temperatura media calculada para cada elemento de las zonas térmicas podrá utilizarse como temperatura de contorno en el caso de tener que realizar simulaciones CFD para el estudio del confort térmico de las habitaciones.



(a)



(b)



(c)

Figura 17. a) Escáner geométrico y térmico 3D; b) Perspectiva de una de las salas del caso de estudio nº 3; c) Detalle de los objetivos para la lectura de los parámetros T_{ref} y ϵ .

6.1.2. Creación de modelos térmicos.

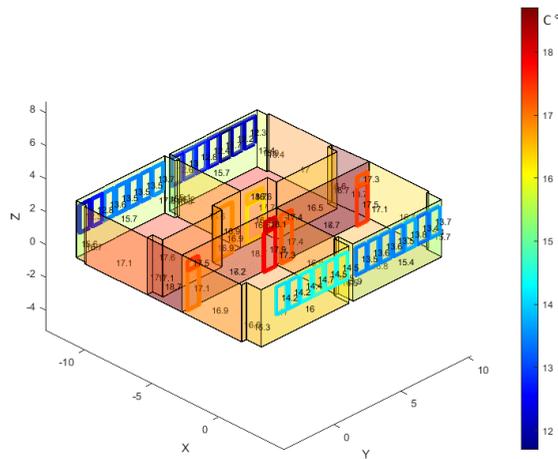
La característica principal de la metodología as-is T-BIM es el almacenamiento de series temporales de nubes de puntos geométricas (3D-T) con información densa sobre la temperatura de la superficie. Esta información densa puede sincronizarse con datos de las temperaturas y humedades relativas ambientales de las zonas térmicas interiores y exteriores. Las nubes de puntos 3D-T son en sí mismas compatibles con la visualización convencional o el software de procesamiento de nubes de puntos, como Recap y CloudCompare. Estos programas facilitan a los usuarios la visualización de las zonas térmicas y sus elementos, así como el establecimiento de escalas de color para las temperaturas, la consulta de temperaturas específicas y promedios regionales de nubes de puntos, y el etiquetado de regiones, entre otras opciones. Además, as-is T-BIM incluye segmentación, reconocimiento y clasificación de regiones de nubes de puntos 3D-T. A través del procesamiento de datos, se genera un modelo semántico 3D donde se definen las geometrías de las clases de objetos fundamentales del edificio (paredes, pisos, techos, espacios, puertas y ventanas), tal como existen al capturar las imágenes con el escáner térmico (ver [114] para más información). Estos modelos se suministran con la serie temporal de los valores medios de temperatura superficial ($T_{\text{surf.int}}$) de cada elemento. El cálculo de $T_{\text{surf.int}}$ se realiza después de medir cada una de las imágenes ortotérmicas correspondientes a cada objeto fundamental.

Adicionalmente, cuando se dispone de unas condiciones climáticas adecuadas en las sesiones de recogida los datos, el modelo as-is T-BIM puede complementarse con el valor U correspondiente a los elementos opacos de la envolvente. En este caso, se utilizará el método propuesto por Blanca Tejedor [92] para calcular los valores de transmitancia, utilizando la ecuación (3).

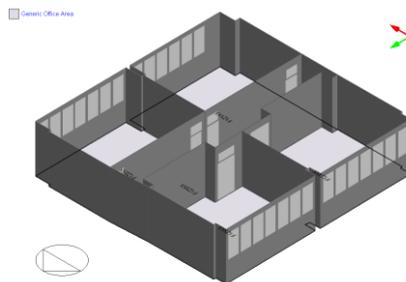
Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

$$U[W/m^2K] = \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{ref}^4 - T_{surf.int}^4) + (h_c \cdot (T_{ind} - T_{surf.int}))}{T_{ind} - T_{out}} \quad (3)$$

Dónde, U [$W/m^2 K$] es la transmitancia térmica o valor U ; T_{ref} es la temperatura reflejada; $T_{surf.int}$ es la temperatura superficial interior; T_{ind} es la temperatura ambiental interior; T_{out} es la temperatura ambiental exterior; h_c es el coeficiente de convección; ε corresponde a la emisividad del material; y σ es la constante de Stefan-Boltzmann.



(a)



(b)

Figura 18. Modelos del caso de estudio nº 3: a) Modelo T-BIM, con temperaturas superficiales, en visor propio. b) Modelo GBXML incluye propiedades de elementos de la envolvente, presentado con el visor de DesignBuilder.

Finalmente, los datos recopilados con el método as-is T-BIM se transfieren al software de simulación energética, mediante la conversión a un esquema estándar BEM como IDF y gbXML (Figura 18). Los modelos que se generan contienen elementos geométricos y semánticos que cumplen con los estándares BEM, temperaturas superficiales medias y valores U de transmitancia térmica. Además, se agregan las propiedades de adyacencia a los elementos de contorno y envolvente propios de cada zona, constituyendo modelos BEM como conjunto de diferentes zonas térmicas con elementos que disponen de información física básica.

6.1.3. Simulación y calibración de modelos.

Las pruebas de simulación de la demanda y el consumo de energía de los edificios se realizan con diferentes software de cálculo numérico comercial y de código abierto tipo CTF. Existen diferentes esquemas IDF y gbXML que mejoran la interoperatividad de los modelos obtenidos con los métodos as-is STD y as-is T-BIM y el software de simulación. Se ha testado la compatibilidad de los modelos as-is T-BIM con TRNSys y EnergyPlus, por su popularidad a la hora de realizar pruebas con fines científicos, académicos y profesionales. Por lo tanto, la fase de simulación es similar en cualquiera de los métodos, STD o T-BIM, ya que la entrada siempre será un as-is BEM estándar. Sí se establecen diferencias en los procedimientos de calibración, dado que as-is T-BIM proporcionará más datos experimentales, térmica densa en forma de $T_{surf.int}$, y valores U de elementos de envolvente.

Para la calibración de los as-is BEM, será necesario el análisis comparativo entre los resultados de la simulación con mediciones realizadas en la fase de monitorización del edificio. Como se menciona en el Capítulo 1, este tipo de estudio consiste en el ajuste del modelo para alcanzar valores estadísticos admitidos para

las desviaciones entre los resultados de simulación y las mediciones de, al menos, un parámetro característico. Los valores de temperatura ambiental interior de las zonas térmicas se utilizan con frecuencia para estas calibraciones. También se pueden utilizarse otros, tal y como se recomienda en AG14-BCSA al proporcionar los parámetros estadísticos y criterios para admitir los resultados de simulación que se utilizan en los procedimientos de calibración (Tabla 12).

Tabla 12. Criterios estadísticos de calibración aplicados en la investigación.

Índice	Criterio para series mensuales	Criterio para series horarias
NMBE ¹	± 5	± 10
CV (RMSE) ²	15	30
R ² ³	> 75	> 75

Dónde: ¹ Error de sesgo medio normalizado, ² Coeficiente de raíz cuadrada del error medio estándar, y ³ Coeficiente de determinación.

En los procedimientos de calibración, los ajustes de los parámetros BEM se pueden realizar a través de uno o varios parámetros, simultáneamente. Normalmente, los parámetros sujetos a estos ajustes serán aquellos que sean difíciles de establecer, como el coeficiente de albedo, las temperaturas del suelo, las tasas de infiltración, los coeficientes de transmitancia de los elementos de la envolvente y las cargas internas, entre otros.

La existencia de nubes de puntos termográficas sincronizadas con la información ambiental (interior y exterior), abren posibilidades para el análisis de los datos en los procedimientos de calibración, dado que permiten realizar un análisis térmico cualitativo y cuantitativo de elementos de contorno y del conjunto de zonas, en el tiempo. En particular, las series temporales de

temperaturas superficiales pueden utilizarse en tareas de calibración BEM mediante el ajuste de las transmitancias de los elementos de la envolvente, como se explica en la subsección 6.3.2 Calibración de modelos.

Por otro lado, para el caso de simulaciones tipo CFD típicas de estudios detallados del confort térmico en el interior de edificios, mediante el cálculo de la distribución espacial de los parámetros de confort (temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, etc.), será necesario conocer los parámetros de contorno de la zona objeto del estudio. Normalmente, los métodos as-is STD establecen los parámetros de contorno del dominio de simulación de dos formas: midiendo los valores directamente in situ o acoplando los resultados de simulación del modelo as-is STD calibrado. Esos parámetros de contorno son la T_{amb} del dominio de simulación, el $T_{surf.int}$ de las superficies límite del dominio de simulación (es decir, las paredes, techos, puertas y ventanas en el caso de zonas térmicas), las rejillas y aberturas de entrada y salida de ventilación e infiltración de la zona térmica que se va a simular. En casos as-is T-BIM, se dispone automáticamente del modelo geométrico y de valores de contorno de temperatura superficial medidos en el dominio de simulación. Esta información puede ser empleada directamente, sin simulación CTF previa, cuando la información del resto de parámetros de contorno está disponible.

6.1.4. Análisis de resultados.

Se ha realizado un análisis comparado de resultados BEPS de los modelos as-is STD y T-BIM. La finalidad ha sido la de comparar y conocer el alcance del comportamiento térmico y energético del edificio, utilizando una metodología de análisis similar a la expuesta en la subsección 4.1.4. En particular, señalamos que el uso de as-is T-BIM calibrados como modelo base facilita en gran medida la realización de estudios

predictivos BEM. La ventaja que ofrece este método se basa en la automatización de los procesos de recogida de datos para edificios y la automatización de la generación de modelos semánticos de entrada para simulaciones energéticas con mayor precisión geométrica. Además, el as-is T-BIM calibrado ofrece la posibilidad de realizar análisis de evolución de la temperatura superficial temporal experimentada en las zonas térmicas y, por lo tanto, un conocimiento preciso del comportamiento térmico del edificio en las condiciones de las mediciones 3D realizadas. Las posibilidades de calibración que se presentan sobre la base de series de información densa medida de las superficies de las zonas térmicas son de gran importancia. Se puede afirmar que existe una mayor precisión de los modelos base, tanto en su geometría y como en los valores de transmitancia, y por lo tanto se reducen las incertidumbres de predicción.

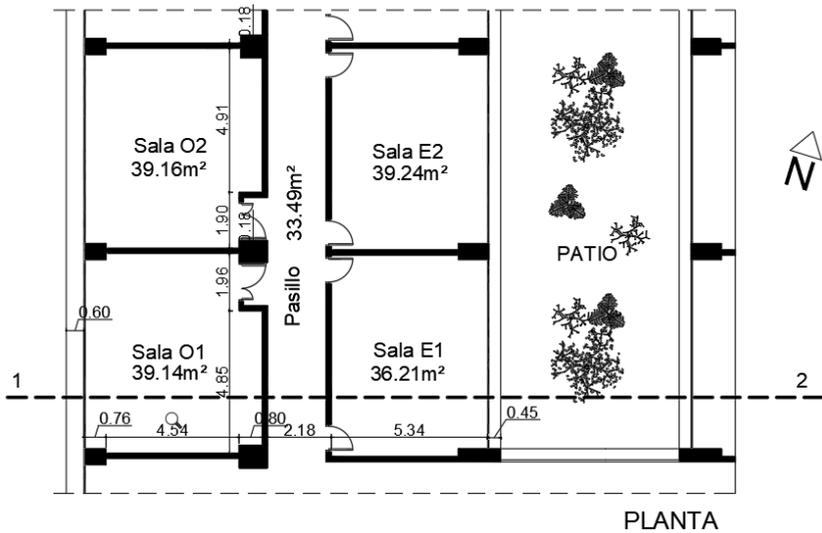
En la sección 6.3, se describe la aplicación de los dos métodos as-is BEM para la obtención de modelos de simulación energética a un mismo estudio de caso de edificio: un modelo generado con métodos as-is STD (según normas AG14) y un segundo modelo según el método as-is T-BIM. Los dos modelos se utilizarán para la simulación de la caracterización térmica y las demandas de climatización y del confort de 5 zonas de un edificio, en un clima continental. Los modelos as-is STD y as-is T-BIM previamente calibrados, serán modelos base de estudios predictivos estándar basados en simulaciones de tipo CTF, para predecir las demandas energéticas de aire acondicionado y confort térmico en regímenes transitorio para cada zona; y también, en simulación predictiva CFD calculando una distribución espacial de parámetros de confort ambiental de una zona térmica, en régimen estacionario.

6.2. Caso de estudio nº 3.

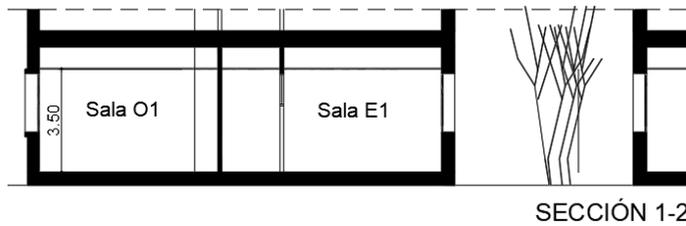
El objetivo de estos estudios es comparar los resultados de simulación de modelos energéticos generados con los métodos as-is STD y as-is T-BIM. Para ello, se han creado dos modelos del mismo bloque de un edificio que se diferencian en los procesos de modelado y de calibración, tal como se describe detalladamente en las subsecciones 6.2.2 y 6.2.3. Las 5 salas que componen el bloque del edificio fueron escaneadas con un escáner 3D-T, con el fin de obtener la geometría del modelo as-is T-BIM. La temperatura ambiente de la sala O1 fue monitoreada durante 48 horas, entre el 17 y el 19 de noviembre de 2021. El escáner térmico 3D capturó imágenes de la sala a lo largo de 6 horas, entre las 8:00 h y las 14:00 h del 19 de noviembre, para caracterizar la evolución térmica interior de las superficies de contorno de la sala, hasta el momento en que recibió luz solar directa. Una vez obtenidos los modelos, fueron calibrados y posteriormente simulados utilizando los datos meteorológicos típicos correspondientes a la localidad del edificio (TMY 2007-2021). Los resultados fueron finalmente analizados en un estudio comparativo fundamental de las conclusiones del estudio.

6.2.1. Descripción del edificio.

El edificio denominado Espacio IDEAS-UCLM Emprende, ubicado en el campus de Ciudad Real, de la Universidad de Castilla La Mancha, fue construido en 2016 con Fondos Europeos de Desarrollo Regional. El proyecto de edificación y sus normas de construcción correspondían al Código Técnico de Edificación (CTE) vigente ese año [110]. Las regulaciones para el HVAC del edificio se pueden encontrar en el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE) [14,115]. El edificio se encuentra dentro de una zona climática Bsk según la clasificación climática de Köppen-Geiger.



(a)



(b)

Figura 19. Planos generales del bloque de cinco salas del caso de estudio nº 3: a) Distribución y b) Vista de sección.

Las zonas del edificio que se han analizado consisten en cuatro salas de oficinas distribuidas a lo largo de un pasillo, situadas en la planta baja del edificio y separadas del suelo por una cámara de aire ventilada. El diseño y las dimensiones de las cinco zonas se muestran en la Figura 19. Dos oficinas dan a un patio interior en su fachada este (habitaciones E1 y E2), y otras dos dan a campo abierto exterior, hacia el oeste (salas O1 y O2), todas están interconectadas a lo largo del pasillo interior.

Tabla 13. Características térmicas y constructivas de los elementos de las envolventes y de la distribución de las salas del edificio (zonas térmicas del modelo) del caso de estudio nº 3.

Elemento	Descripción	Espesor	Transmitancia
		cm	W/m ² K
Muro exterior	Fábrica de ladrillo con revestimiento monocapa exterior, con cámara de aire de 2.5 cm y aislamiento un poliuretano de 4 cm, hoja interior de placas de yeso prefabricadas ligeras y perfiles de aluminio y 3 cm de poliuretano extruido (XPS).	40.0	0.36
Carpintería exterior	Perfiles de aluminio con rotura de puente térmico	6.0	2.1
Suelos	Pavimento cerámico sobre forjado de hormigón sobre cámara de aire semiventilada de 20 cm sobre el terreno.	60.0	0.43
Acristalamiento	4+4/10/6 Claro	2.2	2.85
Techos	Forjado de hormigón con sistema de falso techo suspendido 40 cm con placas prefabricadas de escayola acústica.	80.0	0.61
Particiones	Tabique ligero de placas de yeso prefabricado y perfiles de aluminio con aislamiento acústico.	15.0	1.52

Según los datos del proyecto de ejecución del edificio, las zonas de oficinas tienen una altura de 3.5 m y áreas de suelo similares entre ellas, de 36 a 40 m², aproximadamente. El volumen interior de cada una de estas habitaciones es, por lo tanto, entre 126 m³ y 140 m³. El conjunto de zonas, incluido el pasillo que las conecta, representa una superficie total útil de 236 m², y un volumen de 826 m³, aproximadamente. Las características constructivas y térmicas que constituyen

estos espacios corresponden a los estándares para el lugar y la fecha de construcción del edificio (Ciudad Real, 2016). Las principales características constructivas pueden verse en la Tabla 13.

Las instalaciones existentes en las oficinas y el distribuidor son tubos de iluminación fluorescentes en los techos, tomas de electricidad en paramentos verticales, y difusores y rejillas de instalaciones de ventilación mecánica y aire acondicionado en el techo, además de elementos de sistemas de emergencia (iluminación y detección de incendios). Los datos técnicos de estas instalaciones pueden consultarse en la Tabla 14.

El uso previsto para cada oficina es de cuatro puestos con mesas y equipos de trabajo. El dimensionamiento de las instalaciones de ventilación y climatización responde a una relación de ocupación de 0.1 pers/m^2 , actuando mediante salidas de aire de admisión y difusores de calefacción y rejillas de ventilación mecánica. En cada oficina hay una pequeña salida de aire de admisión de $10 \times 20 \text{ cm}$ en el techo para la entrada del aire fresco del exterior, con un sistema de recuperación de calor y control de temperatura clasificado con un factor de eficiencia de 0.7. Un sistema de flujo de refrigerante variable (VRF) proporciona aire acondicionado en todas las estancias. La unidad interior está instalada oculta en el falso techo y proporciona flujos de aire acondicionado de $9 \text{ m}^3/\text{min}$ que circulan a través de tres difusores de aire circulares alineados en la zona central del techo de cada habitación, y una rejilla extractora de $50 \times 50 \text{ cm}$, también en el techo, en un área cercana a las ventanas de cada habitación. Las temperaturas de consigna de aire acondicionado eran de $21 \text{ }^\circ\text{C}$ en invierno, y $24 \text{ }^\circ\text{C}$ en verano, en las fechas en las que el edificio fue monitorizado. El pasillo no está regulado directamente por el sistema de aire acondicionado y solo dispone de una rejilla en el techo del sistema de extracción de aire

interior que extrae los flujos de aire viciado por infiltración a través de las aberturas de cada oficina. El edificio se utiliza 12 horas al día y 6 días a la semana, en períodos no vacacionales.

Tabla 14. Servicios de instalaciones disponibles en las zonas del edificio del caso de estudio nº 3.

Servicio	Descripción	Valores
Iluminación	Reflectores de tubos fluorescentes en techo.	Potencia, 5 W/m ²
Ventilación	Mecánica con recuperación de calor.	Aire por persona, de 8 a 12 l/s
Aire acondicionado	Sistema de flujo de refrigerante variable (VRF) con conductos.	9 m ³ /min
	Coefficientes de rendimiento, calefacción/refrigeración.	2.5/3.0
	Consignas, calefacción/refrigeración.	21°C/24°C

El sistema de aire acondicionado VRF del edificio está zonificado por habitaciones y puede activarse de forma independiente en cada habitación. Se decidió desactivar el sistema de aire acondicionado durante las sesiones de escaneo térmico 3D, para reducir interferencias debidas al flujo de aire acondicionado en las temperaturas de la superficies interiores y poder interpretar de forma más sencilla el comportamiento de los sistemas constructivos de la envolvente. No obstante, no pudo hacerse así en la zona del distribuidor, debido a las condiciones de diseño del sistema de aire acondicionado. De la misma manera, tampoco fue posible desactivar el sistema de ventilación mecánica en ninguna de las oficinas. Los parámetros que establecieron las condiciones finales del reconocimiento se parametrizaron en los as-is BEM utilizados para la calibración y para el diseño de los ensayos predictivos.

Es importante señalar que, dado que el objeto de estudio es una parte de la planta baja del edificio, los elementos adyacentes a zonas que no fueron modeladas se consideraron adiabáticos. En concreto, los elementos que se consideraron adiabáticos fueron los techos, las paredes sur de las salas E1, O1 y el distribuidor, así como paredes norte de las habitaciones E2, O2. Mientras, las BEPS realizaron cálculos de transferencia de calor a los elementos adyacentes entre cada una de las 5 zonas y al aire exterior. En particular, la temperatura del terreno a 20 cm por debajo de la cámara de aire ventilada se obtuvo con la ecuación (4).

$$T_{ground} = 0,0068 \cdot T_{atm}^2 + 0,963 \cdot T_{atm} + 0,6865 \quad (4)$$

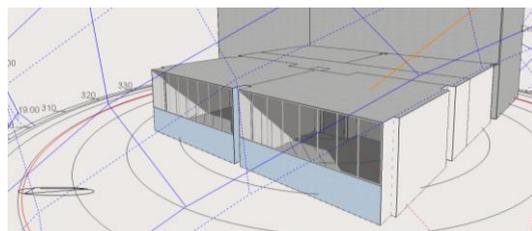
Dónde, T_{ground} es la temperatura del terreno y T_{amb} es la temperatura ambiental exterior. La ecuación (4) correlaciona la temperatura del suelo con la temperatura ambiental promedio para cada mes del año [116].

En nuestro caso, las temperaturas ambientales medias mensuales se han calculado a partir de datos climáticos proporcionados por AEMET para Ciudad Real: noviembre 2021 y para el cálculo del año TMY 2007-21, empleados para simulaciones de calibración y predicción del comportamiento térmico de los dos modelos as-is BEM (STD y T-BIM), respectivamente.

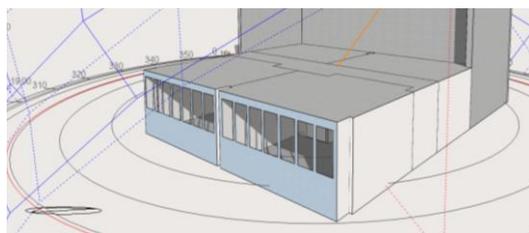
6.2.2. Modelado as-is STD.

La generación del primer modelo de simulación, obtenido con el método as-is STD, utilizó datos del proyecto validados in situ (Figura 18, tablas 13 y 14) y el clima exterior proporcionado por AEMET para Ciudad Real, en 2021. Los datos para el operación del edificio fueron proporcionados por el equipo humano de mantenimiento del edificio. La monitorización de las temperaturas interiores utilizadas para la calibración del

modelo se obtuvo con la instalación de dispositivos HEAT, un sistema de monitorización ambiental interior de bajo coste [117], basado en el empleo de sensores SHT35 [118], registrando valores de temperatura y humedad relativa cada 15 minutos. Estos datos se transformaron a series horarias de temperatura y humedad relativa para noviembre de 2021, que se utilizaron para la calibración del modelo as-is STD. Los resultados se presentan en la sección 6.3 de este capítulo



(a)



(b)

Figura 20. Vistas de modelos gbXML del caso de estudio nº 3 con la interfaz de visualización de DesignBuilder V.6. a) modelo as-is STD; y b) modelo as-is T-BIM.

Se ha creado un modelo as-is STD de las cinco zonas del edificio implementando los datos que son necesarios con el interfaz de modelado de DesignBuilder V6 para simulaciones energéticas con el motor de cálculo EnergyPlus. Una vista de modelo as-is STD se muestra en la Figura 20, a) con el visualizador del programa.

6.2.3. Modelado as-is T-BIM.

Las zonas en estudio estuvieron desocupadas durante las sesiones de escaneo 3D-T, evitando la

aparición de sombras informativas de objetos situados entre las paredes y el escáner. El sistema de aire acondicionado fue, además, apagado, durante las horas de escaneo termográfico 3D, mientras que la ventilación mecánica sí continuó funcionando, de acuerdo con las tasa de ventilación consignada a los espacios (Tabla 14). Las temperaturas de cada orto imagen obtenida de la nube de puntos corresponde con la temperatura real calculada (corrigiendo la temperatura aparente captada por los sensores IRT). Así, los mapas de temperatura obtenidos para cada pared, a cada hora del día, constituyen información densa de temperatura superficial que puede utilizarse para análisis cualitativos y cuantitativos (Figura 21).

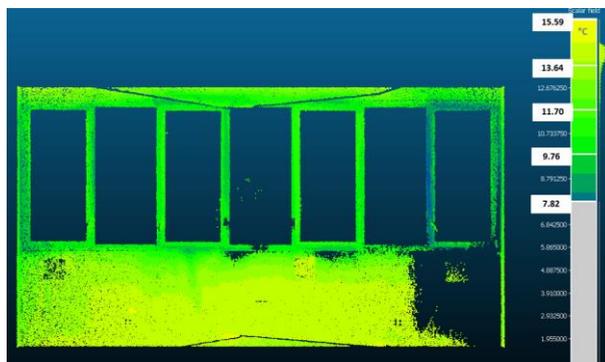


Figura 21 (a)

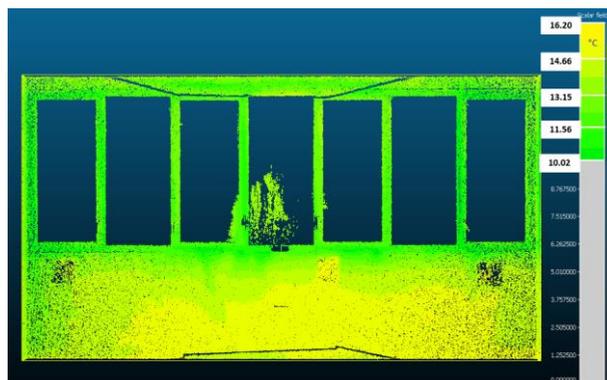


Figura 21 (b)

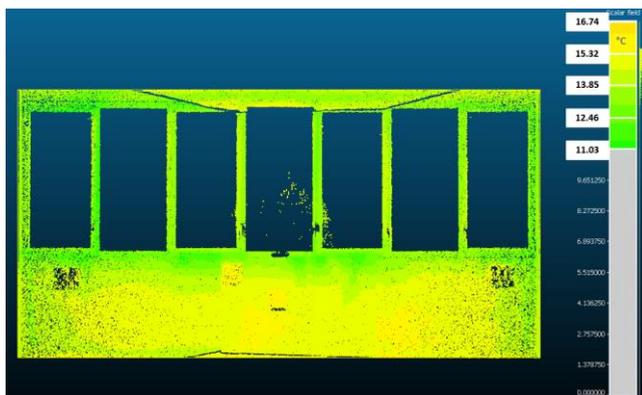


Figura 21 (c)

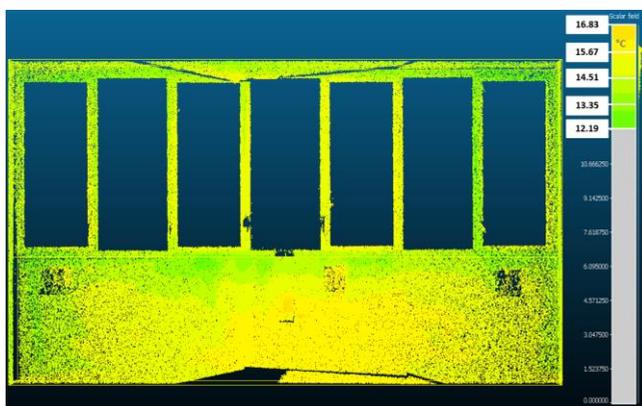


Figura 21 (d)

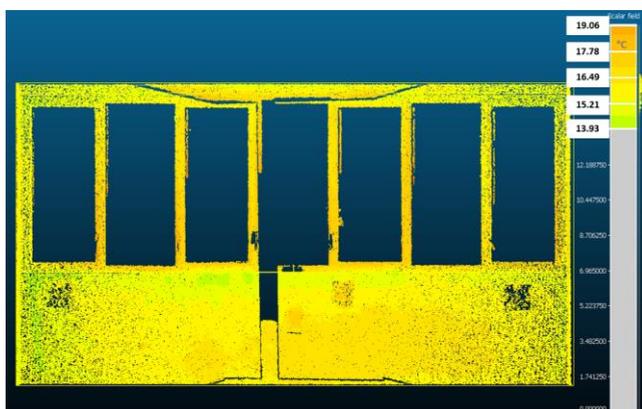


Figura 21 (e)

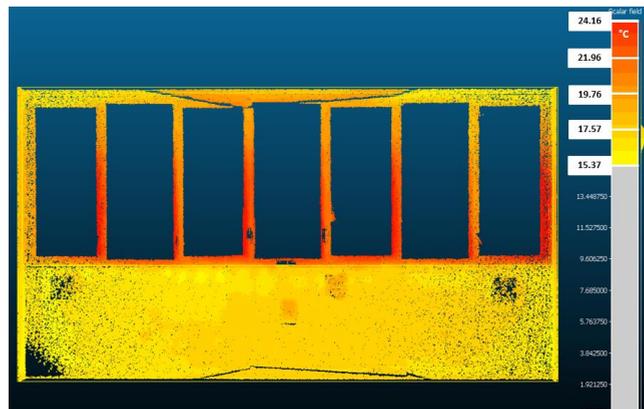


Figura 21 (f)

Figura 21. Serie de orto imágenes horarias de la pared occidental Sala O1 del caso de estudio nº 3, correspondientes al día 19 de noviembre del año 2021: a) 9:00 h, b) 10:00 h, c) 11:00 h, d) 12:00 h, e) 13:00 h y f) 14:00 h.

El procesamiento de las nubes de puntos generó automáticamente la geometría de las salas, en formatos gbXML o IDF, que son compatibles con varios programas de simulación [118]. La elección de la sala O1 para capturar la serie de imágenes termográficas 3D se debió a una orientación oeste que no recibió radiación solar directa entre las 7 p.m. y las 13 a.m., en la fecha en que se escanearon las imágenes. Esto nos permitió calcular las transmitancias de calor, valores U , de la pared con el exterior y de los marcos de las ventanas exteriores de aluminio y del suelo de la habitación utilizando la ecuación (4) en la subsección 6.2.1.

Adicionalmente, los mapas térmicos densos de los paramentos verticales del modelo térmico 3D-T pudieron analizarse de forma cualitativa, comprobándose la falta de heterogeneidad en la distribución de sus temperaturas y la detección de puntos térmicos que no están presentes en el modelo nominal generado con los datos del proyecto. De esta manera, hemos podido comprobar diferencias de temperatura de las zonas con puentes

térmicos creados por las subestructuras metálicas de particiones ligeras (ver Figura 22, b)). También, pérdidas de calor por ausencia del aislamiento en presumibles macizados de mortero en perímetros de carpintería exterior y zonas de dinteles, jambas y vierteaguas. Además, se apreciaron infiltraciones en los cierres en la carpintería del acristalamiento (ver Figura 22, a)).

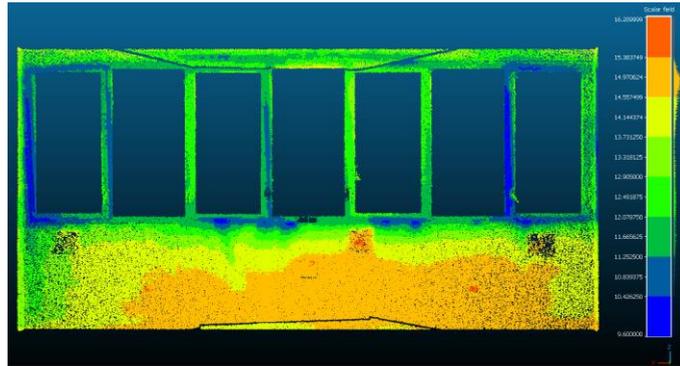


Figura 22 (a)

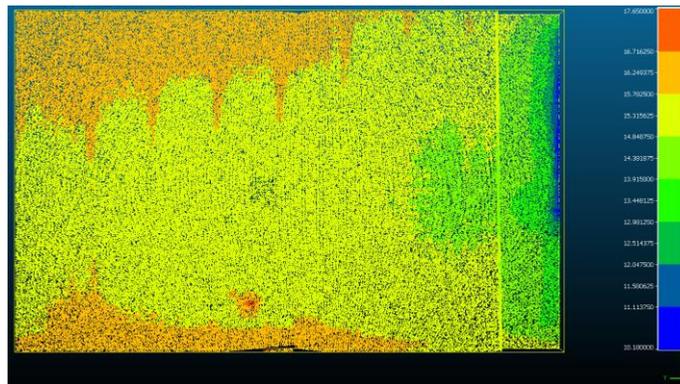


Figura 22 (b)

Figura 22. Orto imágenes termográficas obtenidas de la nube de puntos térmicos 3D, del caso de estudio nº 3, con temperaturas reales calculadas: a) Superficie interior de la pared oeste de la sala O1; b) Superficie interior de la pared sur de la sala O1. La paleta de colores cambia con la temperatura, con pasos de 0,4 °C.

6.3. Resultados y discusión.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el modelado y la simulación del comportamiento térmico de los modelos as-is STD y as-is T-BIM. De forma específica, se han analizado los resultados de la calibración de modelos, las simulaciones predictivas CTF del comportamiento energético del edificio y el cálculo de los parámetros de confort, en régimen transitorio. Además, también se tratan los resultados de las simulaciones CFD en un régimen estacionario.

6.3.1. Geometría de los modelos.

Se han analizado las diferencias geométricas entre los modelos obtenidos con los procedimientos as-is STD y as-is T-BIM.

En el primer caso, el modelo se generó con la interfaz de modelado DesignBuilder y los datos geométricos del proyecto de construcción. En el segundo, las nubes de puntos se capturaron automáticamente con el escáner termográfico 360°. La Tabla 15 contiene los valores superficiales de los elementos fundamentales de las cinco zonas para ambos modelos.

Tabla 15. Valores geométricos de los modelos as-is STD y T-BIM, para cada una de las zonas. (1) Porcentaje de concordancia superficial de zonas entre los modelos del caso de estudio nº 3.

Model	Ud.	Total, 5 zonas				E1		E2		O2		O1		Distribuidor	
		STD	T-BIM	%	STD	T-BIM									
Oficina	m ²	180.86	187.00	97	36.00	38.58	36.37	37.97	39.60	39.96	39.02	40.75	29.87	29.75	
	m ³	627.56	649.35	97	124.91	133.96	126.20	131.84	137.40	138.76	135.40	141.50	103.66	103.29	
Suelo	m ²	180.86	186.99	97	36.00	38.58	36.37	37.97	39.60	39.96	39.02	40.75	29.87	29.74	
Muro	m ²	38.07	56.42	67	8.75	14.98	8.75	13.90	11.83	13.50	8.75	14.03	0.00	0.00	
Acristal. int	m ²	41.72	28.91	144	13.61	7.76	13.61	9.02	0.90	0.64	13.61	9.06	0.00	0.00	
Acristal. ext.	m ²	29.81	11.05	270	1.31	0.89	1.28	0.91	13.62	9.25	0.90	0.00	4.39	2.43	

Una vez verificadas in situ, las magnitudes geométricas generadas a través de as-is T-BIM pudieron confirmarse como ajustadas con precisión a la realidad del edificio. Las concordancias entre los valores superficiales de los elementos que constituyeron cada uno de los modelos fue del 97 %; excepto en el caso del muro de fachada y el acristalamiento, en el que las diferencias métricas fueron mayores. El análisis de la estructuración semántica de los elementos demostró que era diferente entre modelos. Los tres elementos del cerramiento vertical exterior eran claramente distinguibles en el modelo as-is STD: la superficie de la pared, los marcos de las ventanas y el acristalamiento del edificio. Sin embargo, la superficie de los cristales de las ventanas y la pared son todo lo que se distingue en el modelo as-is T-BIM, y las superficies de carpintería se asimilaron en la superficie del elemento muro, de tal manera que el 78 % del elemento muro correspondía realmente a la superficie de la pared y el 22 % a los marcos de ventanas instalados en él. Este aspecto debe ser considerado para objetivar las diferencias existentes entre ambos modelos, y en los análisis comparativos de los resultados de simulación de los modelos as-is STD y as-is T-BIM. De esta manera, se confirmó que las diferencias entre paredes y acristalamientos de los elementos as-is T-BIM se aproximaban al 95 % de los elementos superficiales del modelo as-is STD, manteniendo una dispersión de superficies similares a las de todos los elementos entre ambos modelos.

6.3.2. Calibración de modelos.

En el proceso de calibración del modelo, los resultados de simulación y monitoreo se han ajustado. Dada la similitud constructiva y funcional de las cuatro zonas de oficinas, las calibraciones se realizaron con datos de simulación y monitoreo de una sola zona del modelo, la sala suroeste (sala O1). Para ello, se

recogieron datos horarios de la temperatura ambiental de la sala, entre el 18 y el 19 de noviembre de 2021, para un total de 48 horas. También se recogió una serie de datos de las exploraciones térmicas 360° cada hora, entre las 8:00 h y las 14:00 h del 19 de noviembre. Los seis modelos termográficos de 3 dimensiones que se generaron registraron las temperaturas aparentes, reflejadas y de cuerpo negro de cada material, de todos los elementos de contorno de la zona térmica. Las temperaturas superficiales medias se obtuvieron a partir de la serie de valores, de acuerdo con los procedimientos presentados en la subsección 6.2.3.

Para la calibración del modelo as-is STD, se aplicaron los datos de temperatura ambiental interior obtenidos al monitorizar la sala O1. Posteriormente se realizaron las simulaciones y los ajustes paramétricos de infiltración de forma sucesiva, hasta que se alcanzaron umbrales de tolerancia aceptables, de acuerdo con el rango de tolerancias admisibles para este estudio (ver Tabla 12).

Para la calibración de as-is T-BIM, los valores de pérdida de calor por infiltración del modelo se ajustaron de manera similar al procedimiento as-is STD, y adicionalmente los valores de transmitancia térmica U de la envolvente se calcularon y ajustaron previamente con la serie de datos de mediciones de temperatura superficial de los elementos de envolvente de la zona térmica. La elección de la sala O1 para la realización de estas pruebas se debió a la ausencia de radiación solar directa en la pared de la fachada durante las horas de la mañana. Durante la prueba de escaneo térmico as-is T-BIM, realizada el 19 de noviembre de 2021, se confirmó la ausencia de radiación solar directa en la fachada entre las 8:00 h, hora de puesta en marcha de la prueba, hasta las 13:10 h, hora en la que los primeros rayos de sol incidieron sobre la superficie exterior de la pared.

El salto térmico promedio entre el ambiente exterior y el interior durante este período fue de 8.4 °C. Con estas condiciones, se calcularon los valores U de los elementos de la fachada exterior, empleando la ecuación (3), en la subsección 6.1.2. Los valores de entrada fueron las temperaturas superficiales promedio, los valores de emisividad y las temperaturas reflejadas calculadas con mediciones de temperatura termográfica (ver resultados en la Tabla 16). De esta manera, se obtuvo una transmitancia global para este recinto de 0.925 W/K m², frente al valor nominal calculado de 0.908 W/K m².

Posteriormente, se obtuvo un valor U para el suelo (U_s). La temperatura exterior de este elemento no fue monitorizada. En los dos modelos de simulación, se viene aplicado un valor mensual, según la ecuación (4) de la subsección 6.2.1. Dado que el salto térmico obtenido fue muy inferior a 10 °C no se consideró suficiente para un cálculo de la transmitancia del suelo. Como alternativa, el valor U se ajustó hasta que la temperatura de simulación de la superficie del suelo (T_{sup.int.s}) alcanzó un valor aproximado a los datos que se monitorizaron, obteniendo un valor de transmitancia de U_s de 0.896 W/K m².

Tabla 16. Valores de entrada y resultados para el cálculo del valor U del recinto exterior (sala O1) del edificio (caso de estudio nº 3).

Tiempo	T _{amb.ext}	T _{amb.int}	T _{ref.m}	T _{ref.c}	T _{sup.int.m}	T _{sup.int.c}	U _m	U _c	U _{env}
9:00	5.90	16.70	14.41	16.01	13.30	10.08	0.789	1.535	0.953
10:00	8.20	17.08	14.81	16.46	13.97	13.97	0.877	0.877	0.877
11:00	9.70	17.38	15.49	17.21	14.49	14.48	0.943	0.946	0.944
Promedio	7.93	17.05	14.90	16.56	13.92	12.84	0.870	1.119	0.925

Dónde: T_{amb.ext} es la temperatura exterior, T_{amb.int} es la temperatura de ambiente interior, T_{ref.m} es la temperatura reflejada en el

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

muro, $T_{ref.c}$ es la temperatura reflejada del marco, $T_{sup.int.m}$ es la temperatura de la superficie del muro, $T_{sup.int.c}$ es la temperatura de la superficie del marco, U_m es el valor U del muro, U_c es el valor U del marco, y U_{env} es el valor U de la envolvente resultante sin acristalamiento, según la ecuación (5).

$$U_{env} = 0.78 \cdot U_m + 0.22 \cdot U_c \quad (5)$$

Finalmente, una vez ajustadas las temperaturas superficiales, el valor de infiltración se ajustó de nuevo tomando como referencia los valores de temperatura ambiental. De esta manera, se ajustaron los valores de transmitancia para la pared exterior y el suelo, de modo que proporcionaron valores de simulación de temperatura ambiental para la sala O1 suficientemente próximos a los valores de monitorización (Figura 23).

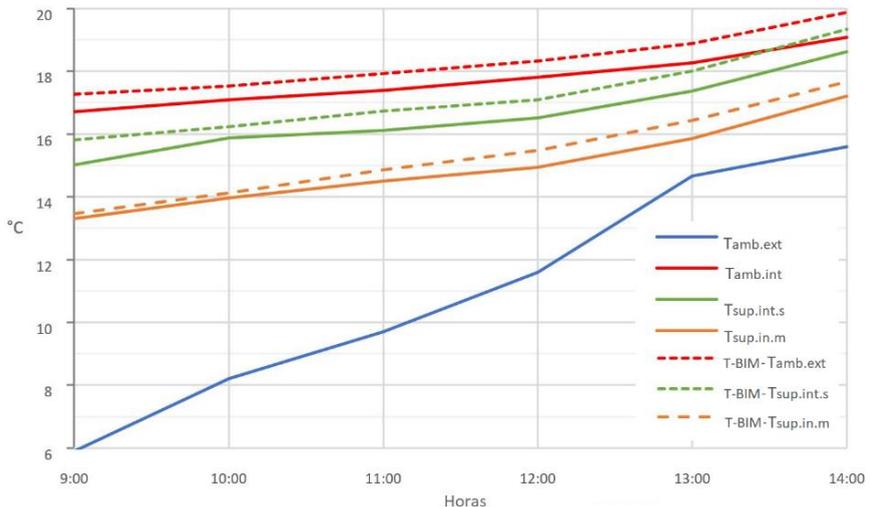


Figura 23. Resultados de simulación y temperaturas medias superficiales de monitorización del muro exterior y el suelo, de la Sala O1, del caso de estudio nº 3, el 19/11/21.

Una vez aplicados los procedimientos de calibración para cada modelo (as-is STD y as-is T-BIM) se obtuvieron temperaturas ambientales de simulación acordes con los de monitorización dentro con valores admisibles de

tolerancia establecidos para los indicadores estadísticos de comparación (Figura 24) (Tabla 17).

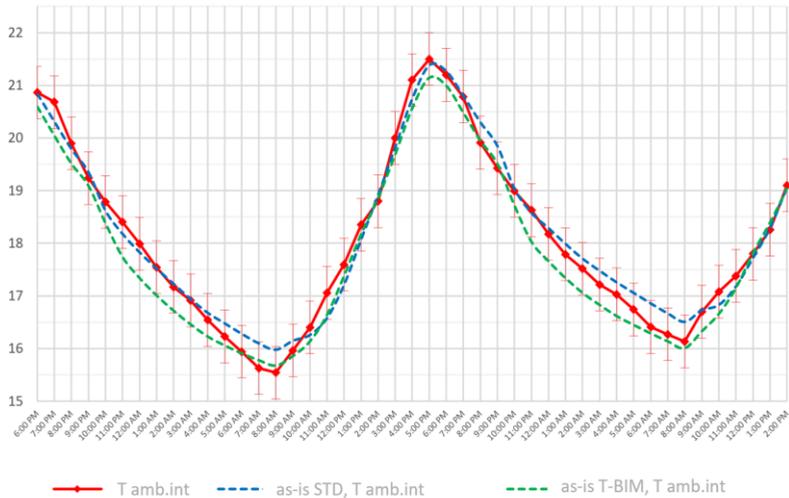


Figura 24. Temperaturas ambientales de monitorización y simulaciones as-is STD y T-BIM de la sala O1 del caso de estudio nº 3, los días 18, 19 y 20/11/2021.

Tabla 17. Indicadores de comparación de simulaciones de temperaturas para los modelos calibrados as-is STD y as-is T-BIM con los datos de monitorización de la sala O1 del caso de estudio nº 3.

Unidad	as-is T-BIM	as-is STD	Tolerancia
MBE ⁽¹⁾	0.273	-0.045	-
NMBE ⁽²⁾	0.123	0.123	± 10%
CV(RMSE) ⁽³⁾	16.462	1.703	30%
R ² ⁽⁴⁾	0.982	0.979	> 0.75

Dónde: ¹ Error de sesgo medio ² Error de sesgo medio normalizado, ³ Coeficiente de raíz cuadrada del error medio estándar, y ⁴ Coeficiente de determinación.

Analizando los valores estadísticos, se puede deducir que el modelo as-is STD está ligeramente

sobreestimado, i.e., en general las temperaturas de simulación fueron más altas que las temperaturas medidas dado que el error de sesgo medio (MBE) proporciona un valor de $-0.045 < 0$. Al contrario, el modelo T-BIM presentó un perfil de temperaturas inferiores a las experimentales, dado que el valor MBE obtenido fue de $0.273 > 0$. El valor estándar de comparación estadística de datos, error de sesgo medio normalizado (NMBE), presentó un valor resultante de 0.123 similar para ambos modelos. De la misma manera, la proximidad de los valores a la línea de regresión también fue similar. La mayor variación se presentó para la varianza entre los valores simulados y los valores medidos, CV (RMSE), siendo casi un 15 % superior en el caso del modelo T-BIM, aunque se mantienen dentro de los valores de calibración estadística límite establecidos para el estudio.

La siguiente sección nos muestra los resultados de las pruebas predictivas diseñadas para los dos modelos as-is, STD y T-BIM. Para estas simulaciones se diseñaron condiciones climáticas y de uso similares, con el fin de verificar y analizar objetivamente la trascendencia en los resultados de las diferencias geométricas y de calibración existentes entre esos dos modelos.

6.3.3. Ensayos predictivos.

Se han realizado simulaciones predictivas CTF para todas las zonas térmicas de ambos modelos (as-is STD y as-is T-BIM) bajo condiciones climáticas y de utilización similares, obteniendo tres tipos de resultados: demanda de energía y consumo de energía para aire acondicionado, y los parámetros de confort térmico de Fanger. También, se han realizado simulaciones predictivas CFD que han proporcionado la distribución espacial de índices Fanger de confort, en un régimen estacionario, para la sala O1.

Las condiciones climáticas de los ensayos han sido las mismas para ambos modelos siendo el clima exterior un año TMY 2007-2021 (Figura 25).

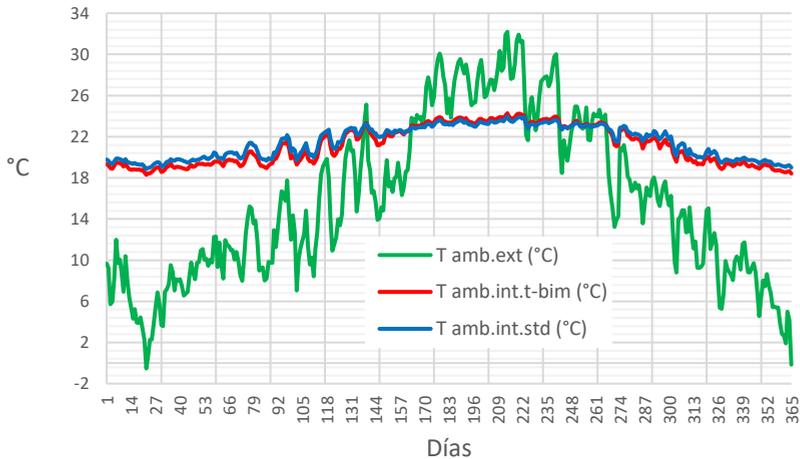


Figura 25. Promedio de temperaturas diarias del aire interior de todas las zonas del caso de estudio nº 3, de acuerdo con los resultados de simulación de los modelos as-is STD y as-is T-BIM, y temperatura exterior media diaria del año meteorológico típico TMY 2007-2021 utilizado en las simulaciones de ambos modelos.

Los parámetros y condiciones de servicio del edificio también han sido los mismos para las simulaciones predictivas de los dos modelos, siendo la densidad de ocupación de 0.1 por m² durante doce horas y seis días a la semana, con horario de apertura de 8:00 h a 20:00 h, una entrada de aire de 12 l/s por persona a través de ventilación mecánica con recuperación de calor con una eficiencia de 0.7. Cuando la demanda de aire acondicionado está activada, el sistema se activa a temperaturas inferiores a 19 °C para calefacción y a más de 24 °C para refrigeración, proporcionando los resultados de temperatura de la Figura 25. De la misma manera, los mismos parámetros de rendimiento se emplearon para los sistemas de iluminación y aire acondicionado para los dos modelos, con iluminación de 5 W/m², así como un sistema de climatización basado en

un sistema de climatización VRF, similar al realmente existente, con un coeficiente de rendimiento estacional (COP) de 2.5 para calefacción y 3.0 para refrigeración. En contraste, se mantuvieron los valores nominales de transmitancia en el caso del modelo as-is STD, para todos los elementos y los valores de infiltración ($0.1 \text{ ren}\cdot\text{h}^{-1}$) obtenidos en la calibración de su modelo base. En paralelo, para el modelo T-BIM se emplearon los valores de transmitancia de los elementos (cerramiento exterior y suelo en suelo) de la envolvente e infiltración ($0.4 \text{ ren}\cdot\text{h}^{-1}$), obtenidos también en su correspondiente proceso de calibración.

6.3.3.1. Demandas de calefacción y refrigeración

Existen diferencias en los resultados obtenidos para cada uno de los modelos. Pese a que las condiciones de simulación son las mismas (clima y modos de operación del edificio), los modelos as-is STD y T-BIM son aproximados, pero no iguales. Existen diferencias entre estos modelos en los valores U de acristalamiento, paredes externas y pisos, así como las tasas de infiltración. También se dan diferencias geométricas y dimensionales, fundamentalmente en el tamaño de las zonas y el acristalamiento.

La Figura 26 compara gráficamente las ganancias y pérdidas de calor mensuales calculadas mediante BEPS de cada modelo.

Por una parte, existen diferencias entre ambos modelos para las ganancias solares a través del acristalamiento, debido a las diferentes dimensiones de los cristales de las ventanas. En las transmitancias del acristalamiento, aunque el U_{cristal} era el mismo para ambos modelos, hay que tener en cuenta que el modelo as-is STD considera un valor global conjunto a los marcos de las ventanas,

mientras que el modelo as-is T-BIM calcula exclusivamente con el valor U_{cristal} .

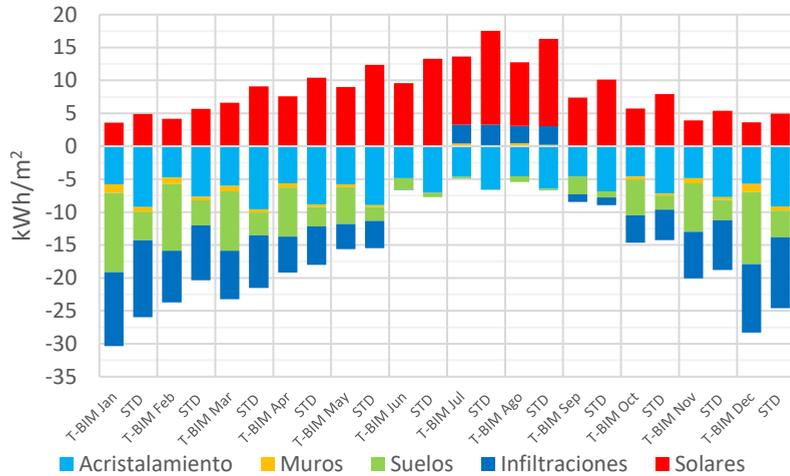


Figura 26. Ganancias energéticas medias mensuales obtenidas por BEPS de los dos modelos, as-is STD y as-is T-BIM del caso de estudio nº 3, para un año TMY 2007-2021.

La demanda térmica anual de climatización interior ha sido de aproximadamente 152 kWh/m^2 , prácticamente iguales entre modelos. Sin embargo, la distribución de los tipos de demanda ha sido diferente, siendo menor la demanda de energía de refrigeración del modelo T-BIM en un 77 % del STD, mientras que la demanda de calefacción T-BIM ha sido significativamente mayor, con un 161 % del modelo STD (Tabla 18).

Tabla 18. Demandas anuales de simulación de modelos as-is STD y T-BIM para año TMY 2007-2021, caso de estudio nº 3.

	Refrigeración	Calefacción	Energía térmica total
	(kWh/m ²)	(kWh/m ²)	(kWh/m ²)
As-is STD	111.5	40.8	152.3
As-is T-BIM	86.7	65.8	152.5

Comparando la evolución mensual de las demandas de acondicionamiento térmico (Figura 27), se observa un comportamiento similar para cada mes, es decir, un cambio gradual de refrigeración a necesidad de calefacción. Existe una mayor demanda mensual de energía para calefacción en el modelo T-BIM hacia el invierno y viceversa, una mayor demanda de aire acondicionado en el modelo STD hacia el verano.

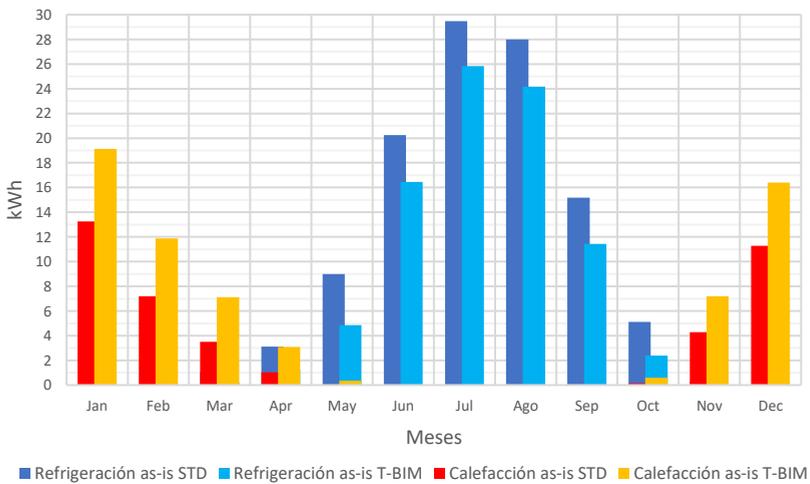


Figura 27. Demanda mensual de calefacción y refrigeración de los modelos, as-is STD y as-is T-BIM en el caso de estudio nº 3, para un TMY 2007-202.

6.3.3.2. Consumo de energía de climatización.

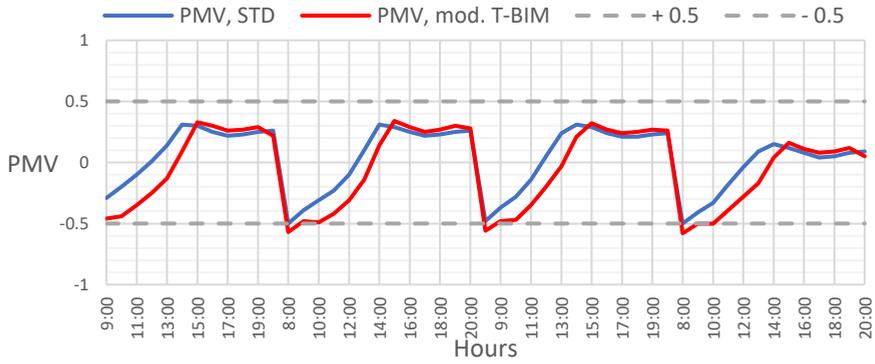
Dados los resultados de la demanda energética de acondicionamiento térmico (Tabla 18) y las características de los servicios de climatización (Tabla 14), los resultados anuales del consumo de energía del aire acondicionado, tanto en el modelo as-is T-BIM como en el STD, son bajos y muy similares: 52.2 kWh/m^2 y 53.5 kWh/m^2 , respectivamente. Al igual que con la demanda de energía, hay una desigual distribución de consumo

energético con valores de 26.3 kWh/m² y 28.9 kWh/m² para calefacción, y 16.3 kWh/m² y 37.2 kWh/m² para refrigeración, De acuerdo con los resultados de la simulación de los modelos as-is T-BIM y STD, respectivamente.

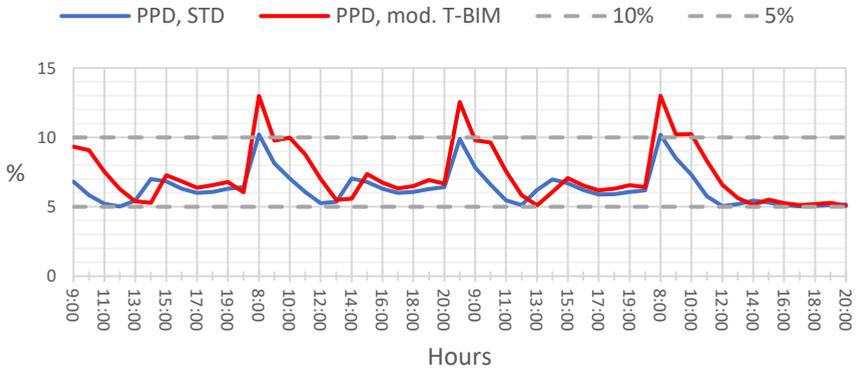
En términos globales de consumo de energía y emisiones de CO₂, las diferencias determinadas por el uso de las dos metodologías, as-is STD y as-is T-BIM, no son significativos en nuestro caso de estudio. Es posible que esto suceda siempre y cuando la fuente de energía de los sistemas de calefacción y refrigeración de edificios tengan rendimientos y vectores energéticos similares a los de nuestro caso de estudio.

6.3.3.3. *Condiciones de confort del usuarios.*

Se han calculado los parámetros PPD y PMV Fanger sobre la base de los resultados de la simulación CFT utilizando herramientas de Energy Plus, con el fin de evaluar la comodidad de los usuarios. Existen diferencias al comparar los resultados de ambos modelos: as-is STD y as-is T-BIM. En lo que sigue, se discuten los resultados correspondientes a la zona O1 y los días 18, 19 y 20 de noviembre de los escaneos 3D-T. Las mediciones de la sala se tomaron en las condiciones descritas en la sección 6.2.3, mientras que las condiciones meteorológicas simuladas correspondieron a un TMY 2007-2021. Aunque las condiciones de simulación del clima de la sala eran diferentes de las mediciones 3D-T, consideramos que las intensidades de la radiación solar han sido similares. De esta manera, el modelo 3D-T facilita la interpretación de las simulaciones de Fanger, ya que la radiación solar es un factor determinante en el confort de la zona O1.



a)



b)

Figura 28. Valores horarios de los parámetros de confort de Fanger para la sala O1 del caso de estudio nº 3, los días 18, 19 y 20 de noviembre de año TMY 2007-2021: a) PMV y b) PPD.

La Figura 28 muestra los valores horarios de los parámetros de confort PMV y PPD de Fanger para la sala O1, los días 18, 19 y 20 de noviembre de TMY 2007-2021. En las gráficas se representan los valores de confort horario entre las 8:00 h y las 20:00 h correspondientes al periodo de ocupación de la habitación. Si analizamos los valores horarios de PMV en la Figura 28(a), se puede observar que el indicador se mantiene dentro del rango de confort, (entre -0.5 y +0.5), casi en todo momento. Sin

embargo, la Figura 28(b), muestra la existencia de picos fuera del rango de confort, con valores PPD > 10 % en las primeras horas de las simulaciones del modelo T-BIM.

Los resultados de ambos modelos confirman la permanencia de los valores dentro de los intervalos de confort de Fanger (ver subsección 4.1.4). El PMV y el PPD son índices horarios genéricos para la predicción del confort para todo el espacio obtenidos a partir de la simulación CTF de los modelos as-is T-BIM y STD, en régimen transitorio, durante el mes TMY sincronizado con el período de calibración. Los cálculos CFD del comportamiento del aire dentro de la zona O1 pueden proporcionar un conocimiento detallado de la distribución espacial de estos valores. La herramienta en uso generó imágenes en modo estacionario.

6.3.3.4. Simulación CFD para análisis de confort.

Las pruebas CFD se realizaron con los dos modelos, as-is STD y as-is T-BIM. Se ha utilizado el módulo CDF de DesignBuilder V6 para calcular una distribución espacial de las temperaturas del aire interior y las velocidades del flujo de aire de la sala O1, para la misma hora y mismo día del mes, con los dos modelos. La hora elegida para realizar las pruebas fue las 17:00 h del 19 de noviembre TMY, con el fin de analizar unos resultados con distribución espacial tras detectar valores extremos de disconfort en esa estancia, a partir de las simulaciones CTF.

Los criterios que se exponen a continuación se han considerado para establecer la base para los cálculos CFD de cada modelo. Para configurar el mallado espacial de dominio de cálculo, se han tenido en cuenta las pequeñas diferencias geométricas que existen en cada modelo (Figura 29).

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

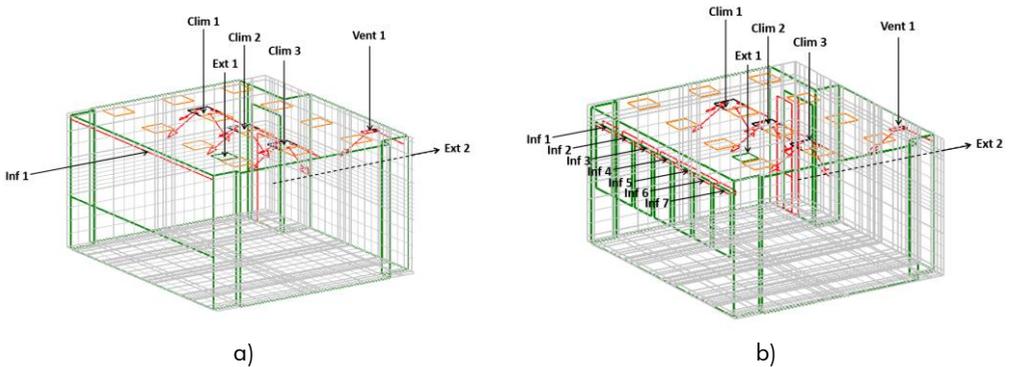


Figura 29. Modelos de habitación O1 del caso de estudio nº 3, malla de dominio, ventilaciones de entrada y salida de aire (en color rojo, difusores de 4 y 2 vías, y filtraciones en marcos de ventanas): a) as-is STD, y b) as-is T-BIM.

Los resultados de la simulación CTF de cada modelo correspondientes a la misma hora y el día del mismo año tipo meteorológico (17:00, 19/11/TMY 2007-21), se han utilizado para determinar los parámetros de contorno para las simulaciones CFD de cada modelo: as-is STD y as-is T-BIM.

Tabla 19. Flujos de aire de entrada y salida de elementos de contorno calculados mediante simulación CTF para las 17 h del 19 de noviembre, en la sala O1, y acoplados a la simulación de prueba CFD, en el caso de estudio nº 3.

Tipo de aire	Elemento constructivo	as-is STD		as-is T-BIM	
		Flujo del aire (l/s)	Temperatura del aire (°C)	Flujo del aire (l/s)	Temperatura del aire (°C)
Infiltraciones	Carpintería exterior	17.3	20.0	39.3	20.0
Ventilación	Aire de ventilación	48.0	18.8	48.0	18.8
	Carpintería interior	65.3	22.7	87.3	22.8
Climatización	Difusores	150.0	21.0	150.0	21.0
	Aire de retorno	150.0	21.0	150.0	21.0

En la Figura 30 y en la Tabla 19, se muestran las temperaturas y los flujos de aire de la simulación CTF, para la hora y el día de la prueba, que serán acoplados como valores de contorno para las simulaciones CFD. Se ha utilizado el modelo de turbulencia k- ϵ para todos los cálculos de simulación CFD, tal como recomiendan estudios anteriores sobre la distribución del aire interior de zonas térmicas con bajas velocidades de circulación de aire [119]. La convergencia de los cálculos se ha producido con 6.000 y 10.000 iteraciones, en los modelos as-is STD y as-is T-BIM, respectivamente.

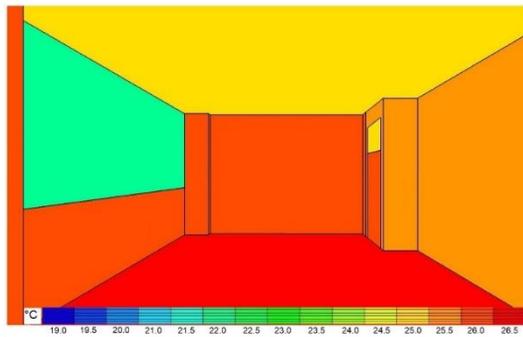


Figura 30 (a)

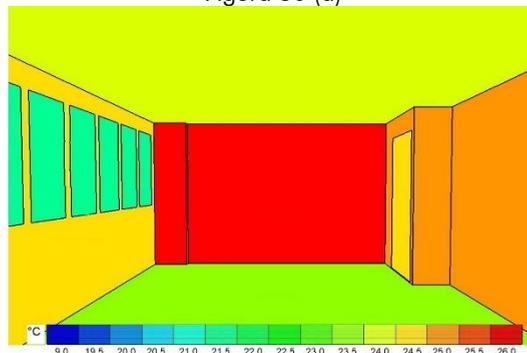


Figura 30 (b)

Figura 30. Valores de temperatura superficial de los elementos de contorno vinculados para la prueba de simulación CFD a las 17:00 h del 19 de noviembre, en la sala O1 del caso de estudio nº 3: a) as-is STD, y b) as-is T-BIM.

En la Figura 31 a) y b), se muestran los mapas gráficos 2D de las distribuciones de temperatura para el plano $Z=1,50$ m de la Zona O1 de ambos modelos. La Figura 30 c) ilustra las diferencias de temperatura punto a punto, el promedio de todas esas diferencias y los valores de la varianza estadística son 0.305 °C y 0.062 , respectivamente.

Las figuras 32 y 33 presentan el mapeado de índices PPD y PMV después de procesar los resultados del ensayo CFD con el método Fanger, en cada uno de los modelos. Las diferencias entre los resultados de estos dos modelos también se analizaron estadísticamente a través de una evaluación de las diferencias de temperatura en cada punto en el plano $Z=1.50$ m; a través de los valores PPD y PMV, y variaciones de los conjuntos de datos. Se han obtenido valores promedio de 0.739 y 0.039 , y valores de varianza de 3.82 y 0.14 , para PPD y PMV, respectivamente, bajo las condiciones de prueba del modelo as-is STD y as-is T-BIM.

Es posible objetivar las sensaciones térmicas de los ocupantes en diferentes puntos dentro de la Sala O1 con el valor PPD y PMV, de acuerdo con las condiciones de ensayo. Los valores de PPD informan del porcentaje de personas insatisfechas; un valor que siempre será positivo > 5 % y nunca negativo. La Figura 32 muestra las diferencias entre los resultados de ambos modelos. El indicador PPD establece un valor límite del 10 % entre confort y no confort. Se puede apreciar que los resultados apuntan mayores intensidades del valor PPD en aproximadamente las mismas zonas; los resultados del modelo as-is STD (Figura 32 a) muestran una distribución más amplia de los valores PPD, cercana o superior al 10 %, que los resultados del modelo as-is T-BIM.

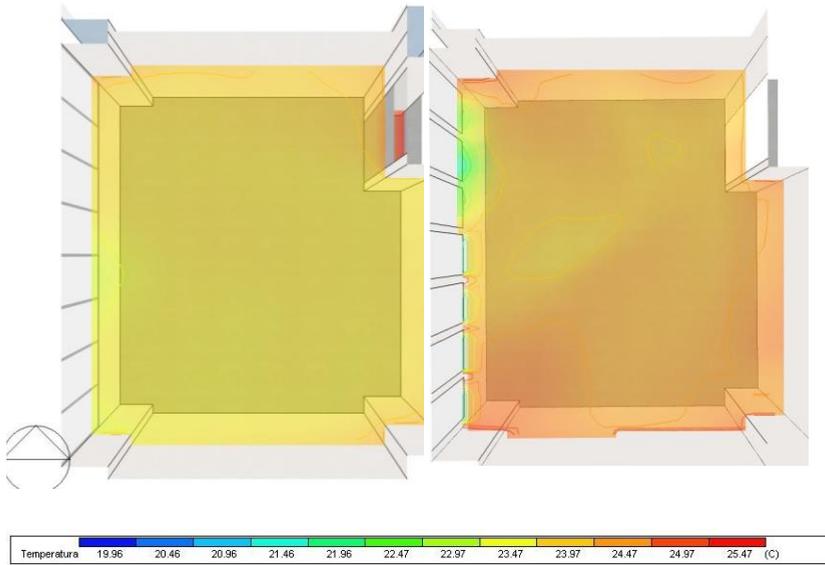


Figura 31 (a)

Figura 31 (b)

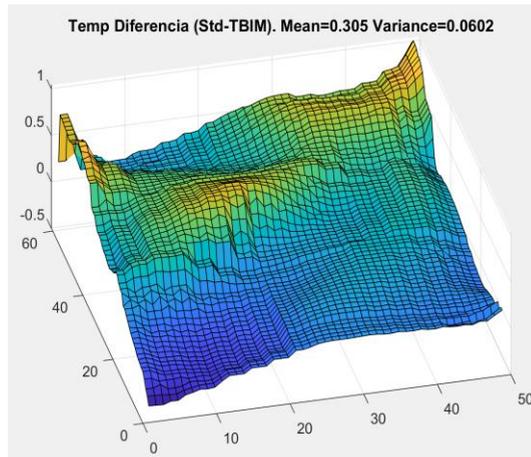


Figura 31 (c)

Figura 31. Mapas de valor de temperatura en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17 h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Temperaturas con modelo as-is STD, b) Temperaturas con modelo as-is T-BIM, y c) Resolución punto a punto de las diferencias de temperatura entre los dos modelos.

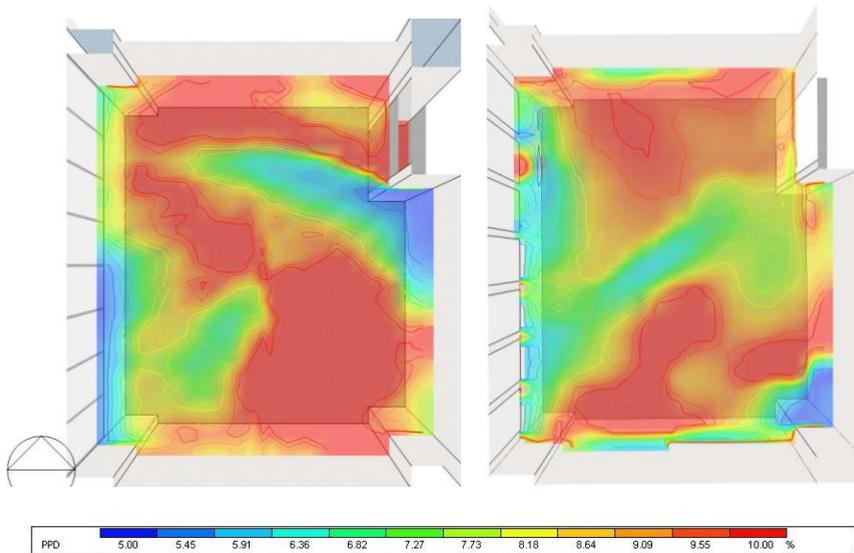


Figura 32 (a)

Figura 32 (b)

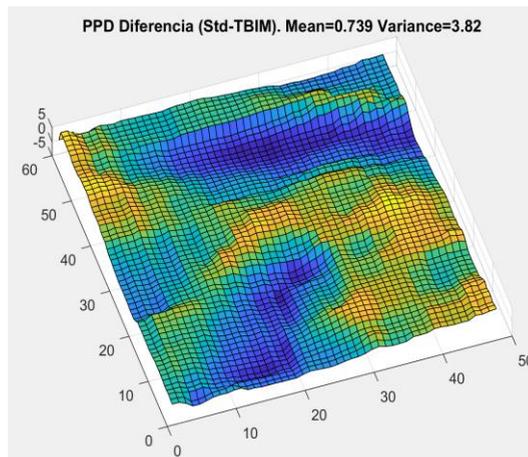


Figura 32 (c)

Figura 32. Mapas de valor PPD en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17 h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Mapa PPD con modelo as-is STD, b) Mapa PPD con modelo as-is T-BIM, y c) Resolución punto a punto de las diferencias entre mapas PPD de los dos modelos.

Los resultados estadísticos informan de una diferencia relativamente pequeña de PPD, dado que las diferencias del valor entre ambos modelos fueron inferiores al 1 % y 4 % para el promedio y la varianza del conjunto de valores, respectivamente. Por otro lado, el signo de los valores de PMV informa si los valores de insatisfacción se deben a sensaciones térmicas de frío o de calor, donde la neutralidad se sitúa alrededor de cero, limitando la zona de confort para espacios de oficina al intervalo (-0.5, +0.5).

Los mapas de imágenes PMV de ambos modelos (Figura 33 a) y b)), muestran que todos los puntos del plano $Z=1.50$ m tienen valores positivos y que el mapa del modelo STD presenta valores con intensidades más altas. Siendo, además, el único mapa que con valores superiores a +0,5 de insatisfacción térmica por calor excesivo.

Aunque los valores del modelo as-is STD están por encima de los valores límite, los valores del modelo as-is T-BIM se aproximan también a ese límite en las mismas zonas de coordenadas X e Y del plano $Z=1.50$ m, por lo tanto, los resultados pueden considerarse aproximados. Los valores estadísticos tampoco señalan diferencias numéricamente significativas entre los valores de PMV de ambos modelos, as-is STD y as-is T-BIM, dado que esas diferencias fueron inferiores a +0.04 y 0.015, respectivamente, para la media y la varianza del conjunto de valores.

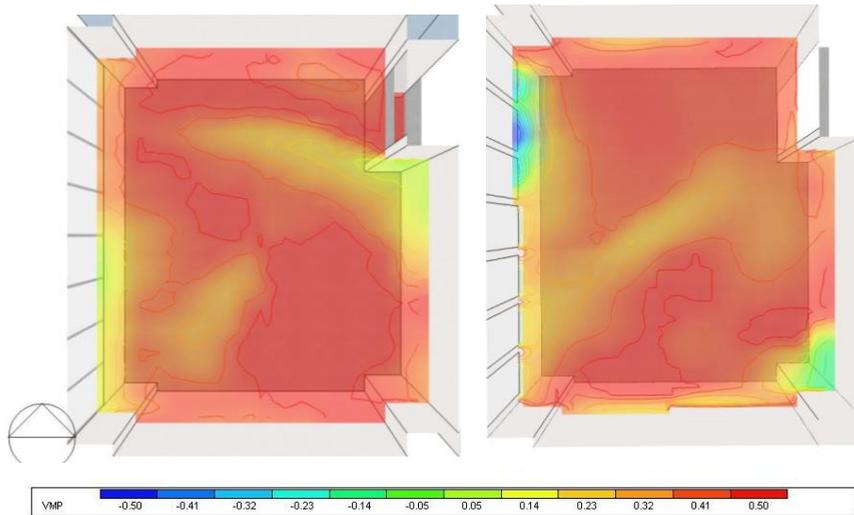


Figura 33 (a)

Figura 33 (b)

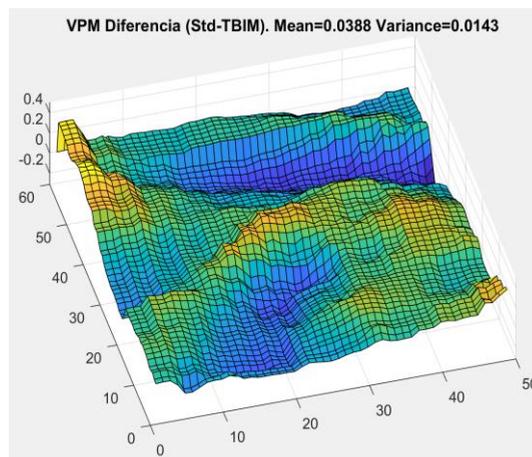


Figura 33 (c)

Figura 33. Mapas de valor PMV en un plano horizontal en $Z=1.50$, obtenido por simulación CFD de flujos de aire, según el estado de la sala O1 del caso de estudio nº 3, a las 17 h, del 19 de noviembre TMY 2007-21: a) Mapa PMV con modelo as-is STD, b) Mapa PMV con modelo as-is T-BIM, y c) Resolución punto a punto de las diferencias entre mapas PMV de los dos modelos.

6.4. Conclusiones.

En este capítulo se ha presentado una metodología de simulación energética de edificios existentes basada en el uso de modelos as-is T-BIM. Los as-is T-BIM se obtienen al exportar en forma de archivos BEM estándar (i.e., IDF and gbXML) nubes de puntos térmicos correspondientes al escaneo 3D-T de zonas térmicas de edificios. Los modelos BEM obtenidos contienen información geométrica multizona y transmitancia térmica de los elementos envolventes. Adicionalmente, los modelos as-is T-BIM se proporcionan junto a series de información densa de la temperatura superficial de los elementos de las zonas térmicas (horarias, diarias o mensuales), que permiten elaborar análisis cualitativos y cuantitativos de las tendencias de la temperatura de las superficies del edificio. En nuestra investigación se han utilizado dos modelos de simulación energética, denominados as-is T-BIM y as-is STD, de un mismo caso de estudio, para realizar una comparación de los comportamientos térmicos de ambos. Los modelos as-is T-BIM se obtuvieron a partir de nubes de puntos térmicos, mientras que los modelos STD se generaron manualmente de acuerdo con los estándares AG14. Ambos modelos han sido calibrados utilizando los datos experimentales que proporciona cada metodología. El proceso de calibración consistió en ajustar las infiltraciones hasta alcanzar los valores de monitorización de temperaturas ambientales interiores. En el caso del modelo as-is T-BIM, las transmitancias de elementos de la envolvente se calcularon previamente con datos experimentales. Se encontraron algunas diferencias notables entre los valores de transmitancia de los elementos de la envolvente y los flujos del aire de infiltración entre los dos modelos. En el caso de una de las cinco zonas probadas (Sala O1) la comparación arrojó valores de transmitancia de muro exterior y suelo sanitario con diferencias de $0.017 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$ y $0.466 \text{ W/K}\cdot\text{m}^2$, respectivamente, y caudales de infiltración de $0.3 \text{ ren}\cdot\text{h}^{-1}$.

En consecuencia, existen diferencias entre los modelos calibrados, as-is STD y as-is T-BIM: en el caso de simulaciones de la demanda de energía para calefacción durante un año para un clima continental, las diferencias se debieron a los diferentes valores de transmitancia del elemento envolvente, y al flujo de aire de infiltración, respectivamente. Ambos modelos una vez calibrados con los datos experimentales, se simularon con algoritmos CTF en una serie de períodos por hora de un año TMY 2007-2021, correspondiente al clima continental del edificio.

Demandas de refrigeración de 111.50 kWh/m^2 y demandas de calefacción de 40.8 kWh/m^2 se han obtenido de simulaciones del bloque multizona con el modelo as-is STD, en contraposición a 86.7 kWh/m^2 para refrigeración y 65.8 kWh/m^2 para calefacción con el modelo as-is T-BIM, determinándose una mayor demanda de refrigeración con el primero y una mayor demanda de calefacción con el segundo, durante el período anual de ensayos. La demanda total de climatización resulta prácticamente similar en los dos modelos con valores de 152.3 kWh/m^2 y 152.5 kWh/m^2 , respectivamente, para los modelos STD y T-BIM.

También se obtuvieron las diferencias en los valores PPD y PMV de confort térmico generados por ambos modelos, utilizando el método Fanger de acuerdo con ISO 7730 [55], en dos escalas temporales. Los resultados de ambiente interior obtenidos mediante simulaciones CTF transitoras, durante un periodo anual, han permitido calcular y analizar la confortabilidad de la sala, con los dos modelos. Para una zona representativa, la zona O1, se han comprobado diferencias relativamente bajas de los valores medios diarios de confort PPD, 6.9 % para el modelo as-is STD y 7.6% para el as-is T-BIM. Por el contrario, se han comprobado diferencias de 0.15 entre los valores de sensación de confort PMV: -0.02 y 0.13, respectivamente, para ambos modelos as-is STD y as-is T-BIM. Estos resultados predicen una sensación mayor de calor para la mayoría de los usuarios en

el primer modelo, al mismo tiempo que se estimó un mayor consumo de refrigeración.

Finalmente, acoplando los resultados CTF, de una hora representativa en la sala O1, al contorno del dominio de su modelo de simulación CFD, se ha podido calcular y analizar detalladamente la distribución espacial de los indicadores de confort de ese momento, en un régimen estacionario, para los dos modelos. A través de una serie convergente de pruebas CFD estacionarias se han obtenido resultados de la distribución espacial de PPD y PMV para los dos modelos. La comparación de los resultados de la simulación muestra variaciones insignificantes, con diferencias de valores medios y variaciones de 1 % y un 4 % para el indicador PPD, y de +0.04 y 0.015 para PMV, respectivamente, para los modelos as-is STD y T-BIM de la sala objeto de este estudio.

Por lo tanto, los resultados de las pruebas de nuestra investigación han demostrado que T-BIM proporciona una serie de avances significativos:

- La reducción de los tiempos operativos de recogida de datos y la generación de modelos energéticos para edificios existentes, como resultado de la automatización de estos procesos.
- La generación de automatizada de geometrías con esquema IDF o gbXML para simulación energética, de mayor precisión que as-is STD gracias al uso del escáner térmico 360°.
- La disponibilidad de información térmica densa de superficies con la que realizar análisis cualitativos y cuantitativos para una mejor comprensión del modelo térmico del edificio, al posibilitar la detección de elementos constructivos ocultos y fenómenos físicos no visibles, tales como puentes térmicos y pérdida de calor por infiltración.

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

- La posibilidad de calcular y asignar transmitancias a elementos del modelo sobre una base de información experimental.

Se han establecido las siguientes líneas futuras de investigación y desarrollo en relación con la tecnología as-is T-BIM: el uso de modelos multiplanta para la creación de archivos IDF y gbXML de edificios completos; controlar las condiciones climáticas para garantizar cálculos más precisos de la transmisión de calor de los elementos de envolvente de zonas térmicas; y el uso del método T-BIM para estudiar las condiciones de confort interior en entornos de trabajo.

7. Conclusiones de la investigación.

Los resultados obtenidos en cada una de las fases de la investigación se describen de forma detallada en los epígrafes 4.4, 5.4 y 6.4 de los capítulos 4, 5 y 6, correspondientes a las partes en las que se monitoriza y simula el comportamiento energético de una vivienda, se estudia el impacto del cambio climático en la demanda energética de un edificio y se desarrolla una nueva metodología para la caracterización térmica de edificios integrando técnicas de monitorización 3D-T.

En general, se puede afirmar que las investigaciones desarrolladas en el contexto de la tesis proporcionan un mayor conocimiento del comportamiento térmico de los edificios unifamiliares construidos en un clima mediterráneo y de los métodos de estudio para su rehabilitación energética, teniendo en cuenta las variaciones del clima, a lo largo de sus ciclos de vida. Además, se propone y se desarrolla una metodología de monitorización de edificios que proporciona mayores rendimientos operativos y presumiblemente una mayor precisión de los resultados que se obtienen, en los procedimientos de calibración de modelos térmicos y por tanto en los ensayos predictivos que se basan en esos modelos.

7.1. Síntesis de resultados.

En el desarrollo de la investigación de la tesis se han identificado diferentes metodologías BEM y BEPS para la caracterización y el ensayo predictivo de edificios existentes. Estas metodologías se han desarrollado y ensayado con diferentes tipos de edificios, residencial y terciario, y diferentes climas, mediterráneo y continental, incluyendo proyecciones futuras de cambio climático. En todo ello se ha tenido en cuenta los rendimientos de los métodos desde los puntos de vista de su operatividad y de la fiabilidad de los resultados obtenidos.

De esta forma, los resultados que se han obtenido y analizado con el desarrollo de esta tesis son relativos a:

Análisis metodológico y experimental de modelos térmicos de edificios.

- La caracterización de comportamientos térmicos, análisis de las demandas y los consumos energéticos de climatización, y el análisis del confort de los usuarios de los edificios.
- La efectividad de las propuestas de mejora de edificios, en función del clima característico de los lugares en los que se encuentran estos edificios.
- La integración y el desarrollo de técnicas y procedimientos BIM en los procedimientos BEM y BEPS que habitualmente se utilizan en el ámbito de nuestro estudio.

Se puede considerar que los objetivos del proyecto de la tesis de investigación se han cubierto, tanto en el ámbito de estudio como en los resultados obtenidos.

De forma más concreta, se listan a continuación cuales han sido los resultados y conclusiones más destacadas de la investigación llevada a cabo:

- Se ha diseñado una metodología de ensayos predictivos para optimizar el comportamiento energético de edificios unifamiliares de bajo rendimiento energético considerando diferentes modelos BEM que mejoran la eficiencia del modelo base obtenido a partir del modelo as-is-BEM calibrado.
- Se demuestra que el confort térmico no está directamente relacionado con la demanda de energía. Para garantizarlo es importante tener en cuenta la realización de análisis de confort verificando el enfoque de las medidas de actuación para la rehabilitación energética de edificios.
- Se caracteriza la influencia del cambio climático en el rendimiento térmico de diferentes configuraciones de edificios residenciales en un clima mediterráneo, contribuyendo de esta forma al conocimiento existente

sobre estrategias pasivas para el rendimiento de un edificio unifamiliar representativo en la estrategia de rehabilitación energética del parque inmobiliario local.

- Se demuestra que el cambio climático tiene efecto directo en la demanda energética de las viviendas. Las predicciones climáticas determinan que las actuales estrategias de ventilación son las más sensibles y tendrán menor influencia en la adaptación de edificios en un clima mediterráneo futuro. Por lo tanto, los diseños de viviendas de consumo casi nulo para el futuro más próximo deberían garantizar una estanqueidad que reduzca las infiltraciones, y disponer de un buen aislamiento para garantizar confortabilidad con menor consumo energético.
- Se ensaya una metodología de simulación energética de edificios existentes basada en BEM compatibles con BEPS obtenidos automáticamente del escaneado 3D-T de zonas térmicas de edificios. Los modelos obtenidos permiten elaborar análisis cualitativos y cuantitativos de las tendencias de la temperatura de las superficies del edificio. Nuestra investigación verifica que la metodología mejora los procesos de modelado, de calibración y de simulación de comportamiento energético y de confort de edificios existentes, desde los puntos de vista operacional y de reducción de la incertidumbre de resultados.

7.2. Futuras líneas de trabajo.

Partiendo de los resultados obtenidos en la investigación de la tesis doctoral se han establecido unas líneas generales de futuras investigaciones:

- Aumentar el catálogo de caracterización térmica de tipologías de edificios en relación con el clima local que les afecta en línea con el perfeccionamiento de las predicciones climáticas a escala regional, focalizado

en el inventario de los edificios de bajo rendimiento energético más representativos.

- Desarrollar la tecnología y la metodología que hemos denominado as-is T-BIM que se ha desarrollado para la creación automatizada de modelos multiplanta de edificios completos; posibilitando cálculos más precisos de la transmisión de calor de los elementos de envolvente de zonas térmicas mediante un mayor control de las condiciones térmicas de los ensayos; y ampliar la aplicación del método T-BIM para estudiar las condiciones de confort interior en entornos de trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Birol, F., Cozzi, L., Bromhead, A., Gould, T., & Baroni, M. (2014). World Energy Outlook 2014. Retrieved from http://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2014_weo-2014-en
- [2] D'Agostino, D. Improving Energy Efficiency in Buildings: Challenges and Opportunities in the European Context. In *Sustainability through Energy-Efficient Buildings*; Shukla, A., Sharma, A., Eds.; CRC Press: Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2018., 2018; pp. 181-209 ISBN 9781315159065.
- [3] European Commission Energy use in buildings Available online: https://ec.europa.eu/energy/eu-buildings-factsheets-topics-tree/energy-use-buildings_en (accessed on Feb 17, 2021).
- [4] González-Torres, M.; Pérez-Lombard, L.; Coronel, J.F.; Maestre, I.R.; Yan, D. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. *Energy Reports* 2022, 8, 626-637.
- [5] The 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector; Nairobi, 2020.
- [6] Institute for Energy Diversification and Saving - IDAE Project Sech-Spahousec, Analysis of the Energetic Consumption of the Residential Sector in Spain (Proyecto Sech-Spahousec, Análisis del consumo energético del sector residencial en España). *Idae* 2016, 76.
- [7] Ríos Fernández, J.C.; González-Caballín, J.M.; Gutiérrez-Trashorras, A.J. Effect of the climatic conditions in energy efficiency of Spanish existing dwellings. *Clean Technol. Environ. Policy* 2020, 22, 211-229.

- [8] Aguacil, S.; Lufkin, S.; Rey, E.; Cuchi, A. Application of the cost-optimal methodology to urban renewal projects at the territorial scale based on statistical data—A case study in Spain. *Energy Build.* 2017, 144, 42-60.
- [9] Isasa, M. Gazulla, C. Zabalza, I. et al. 2014. Herramienta Enerbuilca para el análisis del ciclo de vida de edificios y su adaptación al contexto urbano. II Congreso EECN: Edificios de Emisiones de Ciclo de Vida casi cero.
- [10] Villena, F.; García, T.; Ballesteros, P.; Pellicer, E. Energy and environmental impact of the CTE-DB-HE evolution on a single-family house. 23 Int. Congr. Proj. Manag. Eng. 2019, 29, 1466-1480.
- [11] Presidencia del Gobierno de España. (1979). Real Decreto 2429/1979. Norma Básica de La Edificación NBE-CT-79 Sobre Condiciones Térmicas de Los Edificios, 24524-24550.
- [12] Europeo, E. L. P., Consejo, E. L., & Uni, D. E. L. a. (2003). DIRECTIVA 2002/91/CE relativa a la eficiencia energética de los edificios (DEEE). Directiva, 2002, 65-71.
- [13] BOE. Orden FOM/1635/2013 *Código Técnico de la Edificación*. CTE; 2013.
- [14] España *REAL DECRETO 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios*; 2007.
- [15] España. Real Decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción. Boletín Oficial Del Estado, 31 de Enero de 2007, Núm. 27, 4499-4507.
- [16] Gangoellés, M.; Casals, M.; Forcada, N.; MacArulla, M.; Cuerva, E. Energy mapping of existing building stock in Spain. *J. Clean. Prod.* 2016, 112, 3895-3904.

- [17] EU. (2010). Directiva 2010/13/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de servicios de comunicación audiovisual. (6), 1-24.
- [18] Ministerio de Fomento CTE-DB-HE. *Septiembre 2019*
- [19] Martín-Consuegra, F.; de Frutos, F.; Oteiza, I.; Alonso, C.; Frutos, B. Minimal monitoring of improvements in energy performance after envelope renovation in subsidized single-family housing in Madrid. *Sustain.* 2021, 13, 1-26.
- [20] Mata; Medina Benejam, G.; Sasic Kalagasidis, A.; Johnsson, F. Modelling opportunities and costs associated with energy conservation in the Spanish building stock. *Energy Build.* 2015, 88, 347-360.
- [21] Mata, É.; Sasic Kalagasidis, A.; Johnsson, F. Building-stock aggregation through archetype buildings: France, Germany, Spain and the UK. *Build. Environ.* 2014, 81, 270-282.
- [22] Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. TABULA building typologies in 20 European countries—Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy Build.* 2016, 132, 4-12.
- [23] Villar-Burke, R. Jiménez-González, D. Larrumbide, E. Tenorio, J. A. 2014. Impacto energético y emisiones de co2 del edificio con soluciones alternativas de fachada. *Informes de la Construcción*, Vol. 66, 535.
- [24] Pérez Díez, J. 2013. La eficiencia energética en la edificación. *Técnica Industrial*, 303. Pag. 50-62.
- [25] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2014.
- [26] Sanz, M.J. y Galán, E. (editoras), 2020. Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Oficina

Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

- [27] Radhi H. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings - A contribution to reduce the CO2 emissions. *Build Environ* 2009; 44:2451-62.
- [28] Rosenthal DH, Gruenspecht HK, Moran E. Effects of global warming on energy use for space heating and cooling in the United States. vol. 16. 1994.
- [29] SCOTT MJ, WRENCH LE, HADLEY DL. Effects of Climate Change on Commercial Building Energy Demand. *Energy Sources* 1994, 16:317-32.
- [30] Li DHW, Yang L, Lam JC. Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review. *Energy* 2012, 42:103-12.
- [31] Rubio-Bellido C, Pérez-Fargallo A, Pulido-Arcas JA. Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile. *Energy* 2016, 114:569-85.
- [32] Wang H, Chen Q. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy Build* 2014, 82:428-36.
- [33] Pierangioli L, Cellai G, Ferrise R, Trombi G, Bindi M. Effectiveness of passive measures against climate change: Case studies in Central Italy. *Build Simul* 2017, 10:459-79.
- [34] Zhou Y, Clarke L, Eom J, Kyle P, Patel P, Kim SH, et al. Modeling the effect of climate change on U.S. state-level buildings energy demands in an integrated assessment framework. *Appl Energy* 2014, 113:1077-88.
- [35] Karimpour M, Belusko M, Xing K, Boland J, Bruno F. Impact of climate change on the design of energy efficient

- residential building envelopes. *Energy Build* 2015, 87:142-54.
- [36] Nik VM, Sasic Kalagasidis A. Impact study of the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties. *Build Environ* 2013, 60:291-304.
- [37] Wang X, Chen D, Ren Z. Assessment of climate change impact on residential building heating and cooling energy requirement in Australia. *Build Environ* 2010; 45:1663-82.
- [38] Zhu M, Pan Y, Huang Z, Xu P. An alternative method to predict future weather data for building energy demand simulation under global climate change. *Energy Build* 2016, 113:74-86.
- [39] Dodoo A, Gustavsson L. Energy use and overheating risk of Swedish multi-storey residential buildings under different climate scenarios. *Energy* 2016, 97:534-48.
- [40] Invidiata A, Ghisi E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. *Energy Build* 2016, 130:20-32.
- [41] Huang KT, Hwang RL. Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan. *Appl Energy* 2016, 184:1230-40.
- [42] Isaac M, van Vuuren DP. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 2009; 37:507-21.
- [43] Van Hooff T, Blocken B, Timmermans HJP, Hensen JLM. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy* 2016; 94:811-20.

- [44] Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 2006; 15:259-63.
- [45] Gobierno de España, Ministerio de Fomento, Documento Básico Ahorro de Energía; 2019; Vol. 2013, pp. 1-129.
- [46] Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea, Directiva 2002/91/CE, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios.
- [47] Østergård, T.; Jensen, R.L.; Maagaard, S.E. Early Building Design: Informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis. *Energy Build.* 2017, 142, 8-22.
- [48] Negendahl, K. Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Autom. Constr.* 2015, 54, 39-53.
- [49] Méndez Echenagucia, T.; Capozzoli, A.; Cascone, Y.; Sassone, M. The early design stage of a building envelope: multi-objective search through heating, cooling and lighting energy performance analysis. *Appl. Energy* 2015, 154, 577-591.
- [50] Bracht, M.K.; Melo, A.P.; Lamberts, R. A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage. *Autom. Constr.* 2021, 121, 103422.
- [51] Ramaji, I.J.; Messner, J.I.; Leicht, R.M. Leveraging building information models in IFC to perform energy analysis in openstudio. *ASHRAE IBPSA-USA Build. Simul. Conf.* 2016, 251-258.
- [52] González, J.; Soares, C.A.P.; Najjar, M.; Haddad, A.N. Bim and bem methodologies integration in energy-efficient buildings using experimental design. *Buildings* 2021, 11.

- [53] Gao, H.; Koch, C.; Wu, Y. Building information modelling-based building energy modelling: A review. *Appl. Energy* 2019, 238, 320-343.
- [54] Gerrish, T.; Ruikar, K.; Cook, M.; Johnson, M.; Phillip, M. Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. *Eng. Constr. Archit. Manag.* 2017, 24, 190-208.
- [55] European Standard EN ISO-7730:2005. Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria 2005.
- [56] Blázquez, T.; Suárez, R.; Sendra, J.J. Hacia una calibración de modelos energéticos: Caso de estudio del parque residencial español en clima mediterráneo. *Inf. la Construcción* 2015, 67.
- [57] Vrachimi, I.; Melo, A.P.; Cóstola, D. Prediction of wind pressure coefficients in building energy simulation using machine learning.
- [58] Ruiz, G.R.; Bandera, C.F. Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies* 2017, 10.
- [59] Shi, X.; Si, B.; Zhao, J.; Tian, Z.; Wang, C.; Jin, X.; Zhou, X. Magnitude, causes, and solutions of the performance gap of buildings: A review. *Sustain.* 2019, 11, 1-21.
- [60] Martinez-Molina, A.; Boarin, P.; Tort-Ausina, I.; Vivancos, J.L. Assessing visitors' thermal comfort in historic museum buildings: Results from a Post-Occupancy Evaluation on a case study. *Build. Environ.* 2018, 132, 291-302.
- [61] Sarbu, I.; Pacurar, C. Experimental and numerical research to assess indoor environment quality and schoolwork performance in university classrooms. *Build. Environ.* 2015, 93, 141-154.

- [62] Ballarini, I.; Costantino, A.; Fabrizio, E.; Corrado, V. A Methodology to Investigate the Deviations between Simple and Detailed Dynamic Methods for the Building Energy Performance Assessment. *Energies* 2020, *13*, 6217.
- [63] Aparicio-Fernández, C.; Vivancos, J.L.; Ferrer-Gisbert, P.; Royo-Pastor, R. Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Appl. Therm. Eng.* 2014, *66*, 563-570.
- [64] Aparicio-Fernández, C.; Vivancos, J.L.; Cosar-Jorda, P.; Buswell, R.A. Energy modelling and calibration of building simulations: A case study of a domestic building with natural ventilation. *Energies* 2019, *12*.
- [65] Martínez-Ibernón, A.; Aparicio-Fernández, C.; Royo-Pastor, R.; Vivancos, J.-L. Temperature and humidity transient simulation and validation in a measured house without a HVAC system. *Energy Build.* 2016, *131*, 54-62.
- [66] Pérez-Andreu, V.; Aparicio-Fernández, C.; Martínez-Ibernón, A.; Vivancos, J.L. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy* 2018, *165*, 63-74.
- [67] Gregório-Atem, C.; Aparicio-Fernández, C.; Coch, H.; Vivancos, J.L. Opaque ventilated façade (OVF) thermal performance simulation for office buildings in Brazil. *Sustain.* 2020, *12*.
- [68] Kerfah, I.K.; El Hassar, S.M.K.; Rouleau, J.; Gosselin, L.; Larabi, A. Analysis of strategies to reduce thermal discomfort and natural gas consumption during heating season in Algerian residential dwellings. *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* 2020, *11*, 45-76.
- [69] Ranjbar, A. Analysing the effects of thermal comfort and indoor air quality in design studios and classrooms on student performance. In Proceedings of the IOP

Conference Series: Materials Science and Engineering;
Institute of Physics Publishing, 2019; Vol. 609.

- [70] Sarbu, I.; Adam, M. Experimental and numerical investigations of the energy efficiency of conventional air conditioning systems in cooling mode and comfort assurance in office buildings. *Energy Build.* 2014, 85, 45-58.
- [71] Haberl, J.S.; Claridge, D.E.; Culp, C. ASHRAE's Guideline 14-2002 for Measurement of Energy and Demand Savings: How to Determine what was Really Saved by the Retrofit. In Proceedings of the Fifth International Conference for Enhanced Building Operations; 2005; pp. 1-13.
- [72] Choi, Y.; Yoon, S.; Park, C.-Y.; Lee, K.-C. In-situ observation and calibration in building digitalization: Comparison of intrusive and nonintrusive approaches. *Autom. Constr.* 2023, 145, 104648.
- [73] Zhan, S.; Wichern, G.; Laughman, C.; Chong, A.; Chakrabarty, A. Calibrating building simulation models using multi-source datasets and meta-learned Bayesian optimization. *Energy Build.* 2022, 270, 112278.
- [74] Ji, L.; Shu, C.; Hou, D.; Laouadi, A.; Wang, L.; Lacasse, M. Predicting indoor air temperatures by calibrating building thermal model with coupled airflow networks. *REHVA 14th HVAC World Congr.* 2022, 1-8.
- [75] Baba, F.M.; Ge, H.; Zmeureanu, R.; Wang, L. (Leon) Calibration of building model based on indoor temperature for overheating assessment using genetic algorithm: Methodology, evaluation criteria, and case study. *Build. Environ.* 2022, 207, 108518.
- [76] Guo, J.; Liu, R.; Xia, T.; Pouramini, S. Energy model calibration in an office building by an optimization-based method. *Energy Reports* 2021, 7, 4397-4411.

- [77] UNE UNE-EN ISO 6946:2021. Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica, y transmitancia térmica. Método de cálculo. (ISO 6946:2017, Versión corregida 2021-12). 2021.
- [78] Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ministerio Ciencia e Innovación, G. de E. Catálogo de elementos constructivos del CTE 2010, 3, 1-141.
- [79] International Organization for Standardization ISO 10456:2007. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. 2007.
- [80] Standardization, I.O. for ISO 9869-1:2014 - Thermal insulation - Building elements - In situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. Part 1: Heat flow meter method. 2014.
- [81] Albatici, R.; Tonelli, A.M.; Chiogna, M. A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. Appl. Energy 2015, 141, 218-228.
- [82] Albatici, R.; Tonelli, A.M. Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. Energy Build. 2010, 42, 2177-2183.
- [83] Standards; European EN 13187:1998. Thermal performance of buildings - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method (ISO 6781:1983 modified) 1998, 0-19.
- [84] Jankovic, L. 2013. A method for reducing simulation performance gap using fourier filtering. 13 th Conference of International Building Performance Simulation Association.

- [85] Cuervo, M.T. 2008. La simulación energética como herramienta de predicción, normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes. Congreso Nacional del Medio Ambiente.
- [86] Vollmer, M.; K.P., M. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications; WILEY-VCH, 2017.
- [87] Dall'O', G.; Sarto, L.; Panza, A. Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: Results of a field test. *Energies* 2013, 6, 3859-3878.
- [88] Bienvenido-Huertas, D.; Rodríguez-Álvaro, R.; Moyano, J.J.; Rico, F.; Marín, D. Determining the U-Value of fa ades using the thermometric method: Potentials and limitations. *Energies* 2018, 11.
- [89] Nardi, Iole; Sfarra, Stefano; Ambrosini, D.; Quantitative thermography for the estimation of the U-value: state of the art and a case study. In *Proceedings of the 32nd Italian Union of Thermo-Fluid-Dynamics*; 2014.
- [90] Grinzato, E.; Vavilov, V.; Kauppinen, T. Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy Build.* 1998, 29, 1-9.
- [91] Fokaides, P.A.; Kalogirou, S.A. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. *Appl. Energy* 2011, 88, 4358-4365.
- [92] Tejedor, B.; Casals, M.; Gangoellés, M.; Roca, X. Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades. *Energy Build.* 2017, 151, 187-197.
- [93] Cho, Y.K.; Ham, Y.; Golpavar-Fard, M. 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. *Adv. Eng. Informatics* 2015.

- [94] Chen, J.; Fang, Y.; Cho, Y.K. Performance evaluation of 3D descriptors for object recognition in construction applications. *Autom. Constr.* 2018, 86, 44-52.
- [95] Ham, Y.; Golparvar-Fard, M. Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. *Autom. Constr.* 2015.
- [96] Wang, C.; Cho, Y.K.; Gai, M. As-Is 3D Thermal Modeling for Existing Building Envelopes Using a Hybrid LIDAR System. *J. Comput. Civ. Eng.* 2013, 27, 645-656.
- [97] Demisse, G.G.; Borrmann, D.; Nüchter, A. Interpreting Thermal 3D Models of Indoor Environments for Energy Efficiency. *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.* 2015, 77, 55-72.
- [98] Adan, A.; Prado, T.; Prieto, S.A.; Quintana, B. Fusion of thermal imagery and LiDAR data for generating TBIM models. *Proc. IEEE Sensors 2017, 2017-Decem*, 1-3.
- [99] Adán, A.; Pérez, V.; Vivancos, J.L.; Aparicio-Fernández, C.; Prieto, S.A. Proposing 3D thermal technology for heritage building energy monitoring. *Remote Sens.* 2021, 13.
- [100] Klein SA. TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program. 2010.
- [101] Thirumalai, C.; Vignesh, M.; Balaji, R. Data analysis using box and whisker plot for lung cancer. *2017 Innov. Power Adv. Comput. Technol. i-PACT 2017, 2017-Janua*, 1-6.
- [102] Amblar Francés P, Casado Calle MJ, Pastor Saavedra A, Ramos Calzado P, Rodríguez E. Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5. Madrid: 2017.
- [103] Giorgetta MA, Jungclaus J, Reick CH, Legutke S, Bader J, Böttlinger M, et al. Climate and carbon cycle changes from

- 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *J Adv Model Earth Syst* 2013; 5:572-97.
- [104] Feng X-L, Zhi H, Lin P-F, Liu H-L. Assessment of Historical Climate Trends of Surface Air Temperature in CMIP5 Models. *Atmos Ocean Sci Lett* 2015; 7:137-42.
- [105] Cattiaux J, Douville H, Peings Y. European temperatures in CMIP5: origins of present-day biases and future uncertainties. *Clim Dyn* 2013; 41:2889-907.
- [105] Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 2010; 463:747-56.
- [107] Van Vuuren DP, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim Change* 2011; 109:5-31.
- [108] Belcher S, Hacker J, Powell D. Constructing design weather data for future climates. *Build Serv Eng Res Technol* 2005; 26:49-61.
- [109] Institute for Energy Diversification and Saving - IDAE. Project Sech-Spahousec, Analysis of the Energetic Consumption of the Residential Sector in Spain (Proyecto Sech-Spahousec, Análisis del consumo energético del sector residencial en España). 2011.
- [110] Documento Básico DB-HE Ahorro de Energía. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de la Vivienda, Gobierno de España; 2017.
- [111] Orme M, Liddament MW, Wilson A. Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations. Internatio. Coventry, Great Britain: Air Infiltration and Ventilation Centre; 1998.

- [112] Aparicio-Fernández C, Vivancos J, Ferrer-Gisbert P, Royo-Pastor R. Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation. *Appl Therm Eng* 2014; 66:563-70.
- [113] Martínez-Ibernón A, Aparicio-Fernández C, Royo-Pastor R, Vivancos J-L. Temperature and humidity transient simulation and validation in a measured house without a HVAC system. *Energy Build* 2016.
- [114] Prieto, A. Quintana, B. Adán, A. Vázquez, A.S. As-is building-structure reconstruction from a probabilistic next best scan approach. *Robotics and Autonomous Systems*. Volume 94, 2017, Pages 186-207.
- [115] Ministerio de la Presidencia Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, aprobado por Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio. (BOE núm. 89, de 13 de abril de 2. Bol. Of. del estado 2013, 27563-27593.
- [116] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración. "Guía técnica de condiciones climáticas exteriores de proyecto", Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), 2010, Page 123.
- [117] Sensirion AG Datasheet SHT3xA-DIS. Humidity, Automotive Grade Sensor, Temperature; 2019; Vol. Version 3.
- [118] Adán, A.; Quintana, B.; Prieto, S.A. Autonomous mobile scanning systems for the digitization of buildings: A review. *Remote Sens*. 2019, 11.
- [119] Cortés, M.; Fazio, P.; Rao, J.; Bustamante, W.; Vera, S. CFD modelling of basic convection cases in enclosed environments: Needs of CFD beginners to acquire skills and confidence on CFD modelling, *Rev. Ing. Construcción* 2014, 29, 22-45.