



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LA EDIFICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

2018/2019

**PREDICCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA
BASADA EN EL CONFORT ADAPTATIVO APLICADO
AL SECTOR TERCIARIO CONSIDERANDO EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

ALUMNA

Mónica Trisancho Carvajal

TUTOR/A

Dr. Carlos Rubio Bellido

Dra. Madelyn Marrero Meléndez

DEPARTAMENTO

Construcciones arquitectónicas II

TUTOR

Dr. Carlos Rubio Bellido
Universidad de Sevilla

TUTORA

Dra. Madelyn Marrero Meléndez
Universidad de Sevilla

1. ÍNDICE

1.	ÍNDICE.....	1
2.	RESUMEN /ABSTRACT	5
3.	INTRODUCCIÓN.....	7
4.	JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	10
5.	OBJETIVOS	12
6.	ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	13
6.1.	CONFORT TÉRMICO.....	13
6.2.	EFICIENCIA ENERGÉTICA ASOCIADA AL CONFORT TÉRMICO	15
6.3.	MODELOS DE CONFORT	16
6.4.	NORMATIVA VIGENTE EN ESPAÑA.....	28
6.5.	CAMBIO CLIMÁTICO	31
7.	METODOLOGÍA.....	32
7.1.	ANÁLISIS DE ZONAS CLIMÁTICAS	34
7.2.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TEÓRICO	38
7.3.	CASO DE ESTUDIO REAL	41
7.4.	RECOPIACIÓN DE DATOS	44
7.5.	SIMULACIONES.....	45
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
8.1.	EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA	48
8.2.	ANÁLISIS DEL CONFORT TÉRMICO A TRAVÉS DE DATOS DE TEMPERATURAS HORARIOS	51
8.3.	APLICACIÓN A UN CASO REAL: ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA E INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO	57
9.	CONCLUSIONES	60
10.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	61
11.	PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DURANTE EL DESARROLLO DEL TRABAJO	62
12.	REFERENCIAS.....	63

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2: Rangos de temperatura operativa aceptable para edificios ventilados naturalmente (ASHRAE 55, 2017)	24
Ilustración 3: Zona de confort para edificios ventilados mecánicamente (ASHRAE 55, 2017).....	25
Ilustración 4: Valores de diseño de la temperatura operativa interior para edificios sin sistemas de enfriamiento mecánico en función de la temperatura exterior media ponderada exponencialmente. (UNE EN 15251)	26
Ilustración 5: Velocidad del aire requerida para compensar el incremento de temperatura (UNE-EN 15251)	28
Ilustración 1: Condiciones interiores de diseño conforme al RITE.....	30
Ilustración 6: Diagrama de flujo.....	33
Ilustración 7: Mapa zonas climáticas CTE. Fuente: www.construmatica.com	34
Ilustración 8: Temperatura media mensual (°C). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET	35
Ilustración 9: Precipitación media mensual (mm). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET	36
Ilustración 10: Humedad relativa media (%). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET	36
Ilustración 11: Predicción de las temperaturas en futuros escenarios climáticos	37
Ilustración 12: Modelo teórico	38
Ilustración 13: Características de la envolvente del edificio.....	39
Ilustración 14: Calendario cargas internas.....	40
Ilustración 15: Localización en el mapa. Fuente: Google Earth.....	41
<i>Ilustración 16: Edificio Madrid-Río. Fuente: Proyecto arquitectónico</i>	<i>42</i>
Ilustración 17: Planta tipo edificio Madrid Río. Fuente: proyecto arquitectónico	43
Ilustración 18: Definición de la zona de confort según los límites establecidos en cada categoría.....	45
Ilustración 19: Variación de la demanda total en contexto de cambio climático considerando las tres zonas climáticas de estudio.....	49

Ilustración 20: Variación de la demanda de calefacción y refrigeración en contexto de cambio climático	50
Ilustración 21: Diagrama de dispersión de temperaturas operativas (Oscilación libre - Sistemas de climatización)	52
Ilustración 22: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática B4 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.	53
Ilustración 23: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática D3 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.	54
Ilustración 24: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática E1 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.	55
Ilustración 25: Demanda energética total resultado del estudio del caso real y el caso base	57
Ilustración 26: Evolución de la demanda de calefacción y refrigeración en el contexto de cambio climático en el caso real	58
Ilustración 27: Valores de temperaturas neutras de los países del caso de estudio (líneas discontinuas) y valor de temperatura media del proyecto SCATs (línea continua), frente a la temperatura exterior.	61

LISTADO DE TABLAS Y ECUACIONES

Tabla 1: Metabolismo basal en función de la edad y el sexo. Fuente: NTP 323	18
Tabla 2: Clasificación del metabolismo por tipo de actividad. Fuente: ISO 8996.....	19
Tabla 3: Aislamiento térmico para distintas combinaciones de prendas. Fuente: ISO 7730	20
Tabla 4: Categorías de ambiente térmico (ISO 7730)	23
Tabla 7: Descripción de las categorías del ambiente interior	26
Tabla 5: Categorías de calidad del aire interior conforme al RITE.....	30
Tabla 6: Caudales de aire exterior conforme al RITE	31
Tabla 8: Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica.	38
Tabla 9: Permeabilidad al aire de huecos. Fuente: Documento Básico HE Ahorro de Energía	40
Tabla 10: Rangos de temperatura de confort por categoría con respecto a la temperatura media del aire exterior (θ_{rm}).	44
Tabla 11: Formato de consignas para simulación dinámica.	47
Tabla 12: Porcentaje de variación de demanda de calefacción y refrigeración respecto al CTE	51
Tabla 13: Comparación del número de horas de funcionamiento del edificio con requerimiento de calefacción y refrigeración para el escenario actual, 2050 y 2080 según EN 15251 Cat. II.	56
Tabla 14: Porcentaje de variación de la demanda de calefacción y refrigeración en el caso real	58
Ecuación 1: Ecuación de Fanger para obtención del PMV (ISO 7730)	21
Ecuación 2: PPD en función del PMV (ISO 7730).....	22

2. RESUMEN /ABSTRACT

RESUMEN

En España, el Código Técnico de la Edificación (CTE) establece temperaturas de consigna muy restrictivas que aseguran el confort térmico a costa de altas demandas energéticas. Sin embargo, la estrategia para alcanzar el confort térmico en oficinas tiende a acercarse al enfoque adaptativo, ya que en algunos casos los usuarios pueden controlar manualmente el funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento, abrir las ventanas y realizar acciones de adaptación con el propósito de alcanzar niveles adecuados de bienestar. Esta investigación desarrolla el modelo de confort adaptativo, el cual trata de forma dinámica las temperaturas de consigna basadas en los límites de confort adaptativo, en tres zonas climáticas representativas del territorio español, en el escenario actual y en escenarios futuros (2050 y 2080). Esto se lleva a cabo siguiendo una metodología basada en las fases de: (I) análisis de las zonas climáticas, (II) construcción del modelo teórico, (III) recopilación de datos, (IV) simulaciones llevadas a cabo para el escenario actual, (V) simulaciones en futuros escenarios climáticos, (VI) aplicación a un caso real y (VII) análisis de los resultados. Los resultados indican que es posible reducir la demanda energética mediante el uso de consignas adaptativas, alcanzándose reducciones de hasta un 69.91% para la categoría menos restrictiva y de un 31.34% en la categoría que presenta un mayor nivel de expectativa de los usuarios, además de mostrar, las variaciones en la demanda que se produciría en posibles escenarios climáticos futuros. La aplicación del estudio en un caso real permite validar el modelo teórico, logrando reducciones de hasta el 59% en el modelo adaptativo respecto al modelo estático.

Palabras claves: Confort térmico, eficiencia energética, demanda energética, confort adaptativo, cambio climático.

ABSTRACT

In Spain, the current Building Technical Code (CTE by its acronyms in Spanish) establishes very restrictive setpoint temperature that ensure high levels of thermal comfort at the expense of high energy demands. However, the strategy to achieve thermal comfort in offices tends to be closer to the adaptive approach, since users manually control the operation of the air conditioning systems, open windows and perform adaptation actions in order to achieve adequate levels of well-being. This research develops the adaptive comfort model which dynamically treats the setpoint temperature based on the limits of adaptive comfort, in three representative climatic zones of the Spanish territory, in the present scenario and future scenarios (2050 and 2080). This is carried out following a methodology based on the phases of: (I) analysis of climate zones, (II) construction of the theoretical model, (III) data collection, (IV) simulations carried out for the current scenario, (V) simulations in future climatic scenarios, (VI) application to a real case and (VII) analysis of the results. The results indicate that it is possible to reduce the energy demand by using adaptive setpoint temperature, reaching reductions up to 69.91% for the less restrictive category and 31.34% in the category that has a higher level of expectation of the users, in addition to showing the variations in demand that would occur in possible future climatic scenarios. The application of the study in a real case allows validating the theoretical model, achieving reductions up to 59% on the adaptive model with respect to the static model.

Key words: Thermal Comfort, energy efficiency, energy demand, adaptive comfort, climate change.

3. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es resultado del calentamiento global y del efecto invernadero cuya principal causa se debe a la influencia del hombre. Cada vez estamos más concienciados de la necesidad de proteger el medio ambiente y se busca mitigar los efectos del cambio climático con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

El sector de la edificación es responsable de un importante consumo de energía a nivel mundial de entorno al 30 % (The United Nations Environment Programme (UNEP) 2012), produciendo emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y contribuyendo considerablemente a la contaminación ambiental.

A nivel europeo, la Directiva (UE) 2018/844 señala que la utilización de energía de los edificios representa aproximadamente un 40% del consumo de energía total. Esta directiva ha establecido la necesidad de establecer estrategias con el objetivo de modernizar energéticamente el parque inmobiliario existente y reducir al menos en un 40% las emisiones de gases de efecto invernadero de aquí a 2030 con respecto a los valores de 1990, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático además de aumentar la proporción de energía renovable consumida y conseguir un ahorro energético para mejorar la sostenibilidad de Europa. Por otro lado, la Comisión Europea ha presentado una estrategia a largo plazo para alcanzar una economía baja en carbono para el año 2050 cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera en un 85-90% con respecto a los niveles de 1990.

La directiva 2018/844 modificó a la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios que, a su vez, refundió la Directiva 2002/91/CE cuyas siglas en inglés se corresponden con EPBD (Energy Performance of Buildings Directive). Esta última, fue la principal norma europea dirigida a garantizar el cumplimiento de los objetivos de la UE en edificación, en lo referente a contención de emisiones de gases de efecto invernadero, del consumo energético y eficiencia energética (European Commission 2002) y fue aplicada en España a través del Código Técnico de la Edificación (CTE) (RD 314/2006 2006) y del Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios en España (RITE) (Ministerio de la Presidencia 2007).

La normativa actual española de construcción en España (CTE), divide el territorio español en diversas zonas climáticas, y las clasifica en función de su severidad climática en invierno (de la A, con menor severidad, a la E, con mayor severidad) y en función de su severidad climática de verano (del 1, con menor severidad, al 4 con mayor severidad). Por lo tanto, la nomenclatura de cada una de estas zonas climáticas se compone de una letra y un número. En base a dicha clasificación, la normativa actual establece unas limitaciones en la máxima transmitancia térmica de la envolvente de los edificios. Sin embargo, los valores se vuelven más restrictivos únicamente con la tendencia creciente de la severidad

climática de invierno, y no con la de verano. De esta forma, los altos niveles de malestar térmico, o en su defecto, los consecuentes altos consumos energéticos no están siendo considerados en zonas con clima cálido.

El Código Técnico de la Edificación por otro lado, establece temperaturas de consigna estáticas con valores muy restrictivos, siendo la temperatura de consigna baja de 20°C y la temperatura de consigna alta de 25°C para edificios de uso no residencial, a partir de las cuales se activarían los sistemas de climatización. Se aplicó por tanto, un modelo de confort basado en el Predicted Mean Vote (PMV) (Fanger 1967). Esta normativa no tiene en consideración los altos consumos necesarios para mantener la temperatura operativa interior en un rango de temperatura tan restrictivo. Estas temperaturas, además, se mantienen invariables independientemente de la zona climática, de las condiciones climáticas externas o de las cargas internas debida a la ocupación.

De la importancia del tratamiento de las temperaturas de consignas nacen investigaciones basadas en modelos de confort adaptativo (de Dear and Brager 1998)(de Dear and Brager 2002), los cuales consideran que las personas tienen una percepción de la temperatura de confort que varía con la temperatura exterior. Las normas EN 15251:2007 y ASHRAE 55:2017 son normas internacionales de confort adaptativo, siendo la primera de aplicación en Europa y la segunda a nivel global.

La principal diferencia entre los modelos de confort adaptativo y basados en el PMV es que los primeros consideran que la temperatura neutral depende de las variaciones del promedio la temperatura exterior, mientras que los segundos consideran que la temperatura neutral es independiente de la temperatura exterior. Además, en los modelos adaptativos se contempla la posible adaptación del individuo a la variación de temperaturas mediante acciones de conducta, como abrir o cerrar ventanas (Rijal et al. 2007), ponerse o quitarse ropa (Morgan and de Dear 2002)(Parsons 2002), o ingerir comidas o bebidas calientes o frías (Damiani et al. 2016), así como mediante la adaptación psicológica a las temperaturas, en las que intervienen las expectativas del ocupante mediante el efecto llamado memoria climática (weather memory) (Luo et al. 2018). Sin embargo, los modelos basados en el PMV fueron desarrollados en oficinas, en las que los ocupantes debían llevar una vestimenta muy regulada y no tenían acceso a ventanas o termostatos y, por lo tanto, no existían oportunidades de adaptación.

Los modelos de confort adaptativo presentan algunas limitaciones. Una de esas limitaciones es que, para su aplicación, no debe existir sistema de refrigeración, y si existe sistema de calefacción, no debe estar en funcionamiento, por lo que el único medio para acondicionar el aire interior es por medio de la ventilación natural. Sin embargo, están surgiendo investigaciones que estudian la extensión del enfoque adaptativo al uso del aire acondicionado y al uso del modo mixto. Dicha extensión se fundamenta en la utilización de temperaturas de consigna diarias asignadas a la temperatura neutral (i.e. la

temperatura en la que se alcanza mayor porcentaje de aceptabilidad) para mantener la temperatura interior dentro de los límites diarios de confort adaptativo, y en caso del modo mixto, priorizar el uso de la ventilación natural cuando las condiciones exteriores son favorables, o usar el aire acondicionado cuando no lo sean. Estos métodos conllevan un alto potencial de ahorro energético: el hecho de establecer las temperaturas de consigna de calefacción y refrigeración a 20°C y 26°C permitió conseguir una reducción del 45% en el consumo energético (Spyropoulos and Balaras 2011). En otra investigación se obtuvieron ahorros energéticos de entre el 32% y el 73% dependiendo de la zona climática al ajustar las temperaturas de consigna de calefacción y refrigeración a 18.3°C y 27.8°C. Sin embargo, aunque en estos estudios se utilizaron temperaturas de consigna menos restrictivas que las convencionales, seguían siendo temperaturas de consigna estáticas. En esta línea de investigación, existen estudios en los que se aplicaron temperaturas de consigna dinámicas con la finalidad de mantener la temperatura operativa dentro de la zona de confort adaptativo: la utilización del límite inferior del modelo de confort adaptativo desarrollado para Holanda (Van Der Linden et al. 2006), establecido en la norma ISSO 74 (Arets 2004a) como temperatura de consigna de calefacción, permitió obtener una reducción en el consumo energético del 74% (Kramer et al. 2015a). Hasta la fecha, existen pocas investigaciones en este campo situadas en España. En una de ellas, se aplicó el modelo adaptativo de la norma ASHRAE Standard 55-2013 (ASHRAE 55 2013) por medio del método simplificado, es decir, usando límites de confort basados en la temperatura media mensual, y que, por lo tanto, variaban mensualmente (Sánchez-Guevara Sánchez et al. 2016). De esta forma, las temperaturas de consigna basadas en estos límites también variaban mensualmente. Los resultados mostraron reducciones en la demanda energética de calefacción y refrigeración de 20% y 80% respectivamente. En otra investigación, tras haber desarrollado previamente un modelo de confort térmico para edificios en modo mixto (Damiani et al. 2016), se utilizaron los límites de confort de dicho modelo como temperaturas de consigna. Posteriormente, se comparó la demanda energética resultante de haber utilizado las temperaturas de consigna convencionales (promedio de 23.5°C en refrigeración y 22.3°C en calefacción) con aquellas basadas en el modelo de confort adaptativo (promedio de 24°C en refrigeración y 21°C en calefacción), y se observaron reducciones del 27.5% y 11.4% en refrigeración y calefacción respectivamente (Barbadilla-Martín et al. 2018). Por último, el proceso de utilización de temperaturas de consigna basadas en el modelo de confort adaptativo fue automatizado mediante la implementación en un sistema de domótica (Aparicio-Ruiz et al. 2018) que se llevó a cabo en un edificio de oficinas y cuyos resultados mostraron reducciones del 27% en el consumo de refrigeración y de un 11% de reducción en calefacción con la aplicación de un algoritmo de confort adaptativo.

En otra investigación se estudió la implementación de temperaturas de consigna basadas en modelos adaptativos en edificios que funcionaban completamente con aire

acondicionado, alcanzando valores en refrigeración entre 2°C y 5°C sobre la temperatura de consigna usada previamente de 23°C (Yun et al. 2016).

El uso de temperaturas de consigna basadas en el enfoque de confort adaptativo podría derivar en una nueva definición de demanda energética: demanda energética adaptativa, que se podría definir como la energía útil necesaria para mantener las condiciones térmicas interiores dentro de la zona de confort adaptativo. Esta nueva definición de demanda energética podría generar a su vez una nueva definición de pobreza energética, en la que se aplicarían modelos de confort adaptativo (Sánchez-Guevara Sánchez et al. 2016)(Pérez-Fargallo et al. 2017)(Sánchez et al. 2018) y en la que estudiar la influencia del cambio climático es un campo de interés (Pérez-Fargallo et al. 2018a) .

La presente investigación se centra en cuantificar las demandas energéticas que se obtienen mediante el establecimiento de temperaturas de consignas adaptativas en edificios de oficina ubicados en tres zonas climáticas representativas del territorio español, usando los límites del modelo de confort adaptativo considerando las tres categorías establecidas en la norma EN 15251 (CEN 2007). Además, se contrastarán las demandas resultantes con aquellas correspondientes a la aplicación del modelo basado en el PMV; se analizarán las tendencias procedentes del efecto del cambio climático en los años 2050 y 2080 y se comparará el modelo de predicción con un caso real.

4. JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El parque edificatorio de España está conformado en su mayor parte por edificios residenciales. Según los datos estadísticos del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), el consumo de electricidad del sector terciario en el año 2016 era de 6.183.486 tep, superando un consumo de 5.989.728 tep que presenta el sector residencial. El sector terciario, por otra parte, constituye el 30 % del consumo de energía total del país. Además, las condiciones ambientales de los lugares de trabajo se relacionan con el rendimiento laboral de los ocupantes (Luna 1999), razones por la que se hace necesaria esta investigación.

La preocupación por satisfacer el confort térmico de los ocupantes lleva asociado un consumo de energía para alcanzar ese confort. El consumo energético de un edificio está condicionado por el tipo de edificio, el diseño, el clima, la orientación o los sistemas de climatización. Diversos estudios confirman que el mayor consumo de energía se debe a la climatización, correspondiéndose este porcentaje con un 47% en edificios de oficina (Anónimo 2014).

Por otro lado, la Directiva 2010/31/UE, modificada en la actualidad por la Directiva Europea 2018/844, introdujo el término de edificio de consumo de energía casi nulo o NZEB (Nearly Zero Energy Building) con el objetivo de lograr la mayor reducción de la demanda posible.

Esta Directiva define un edificio de consumo de energía casi nulo como:

“Edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto (...). La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno”(UE 2010).

La Directiva Europea 2010/31/UE planteó que las construcciones de nueva planta deberían ser de consumo energético casi nulo a partir de 2020 y las edificaciones públicas a partir de 2018, objetivos que no se han cumplido hasta el momento. De hecho, en España, aún no se ha incluido esta definición en ninguna normativa, aunque se espera que en 2019 se apruebe la tercera revisión del Código Técnico de la Edificación que sí la integre.

El rendimiento energético de los nZEB reflejado en la literatura científica muestran reducciones de hasta el 80% en edificios tradicionales en Europa central (Feist et al. 2005) y una reducción del 62% en el consumo de energía de calefacción en edificios modernos de Irlanda (Colclough et al. 2018). Sin embargo, los resultados obtenidos en países situados al sur de Europa muestran que los criterios nZEB podrían reducir considerablemente el consumo de energía durante la época de calefacción, pero también podrían tener un impacto negativo en el periodo estival.

La viabilidad de implantar edificios nZEB depende de factores como las condiciones climáticas, ya que algunos estudios (Robert and Kummert 2012) demuestran que el cambio climático puede hacer que los edificios con esta condición no alcancen sus objetivos. Por otro lado, los hábitos culturales y de las barreras económicas obligan a utilizar soluciones de baja tecnología (Attia et al. 2017). Por lo tanto, este trabajo pretende cambiar la metodología empleada en edificios nZEB por una solución más viable económicamente sin necesidad de invertir en equipos altamente eficientes y energías renovables atendiendo así, a la realidad de pobreza energética.

En base a lo expuesto anteriormente, se justifica la elección de este estudio centrado en reducir la demanda energética. Se realizará mediante el control en los equipos de climatización de las temperaturas de consigna.

5. OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la demanda energética en tres zonas climáticas representativas del territorio español mediante el establecimiento de consignas adaptativas en un edificio de oficinas.

ESPECÍFICOS

1. Determinar los límites de confort para cada zona climática de estudio conforme a la norma EN15251.
2. Evaluar, mediante la realización de simulaciones, la demanda energética en función de los límites de confort que establece el marco normativo actual (CTE) y la norma EN15251.
3. Analizar el número de horas que se encuentran dentro y fuera de la zona de confort según el modelo de la norma EN15251 y CTE.
4. Estudiar el efecto que el cambio climático tendrá sobre la demanda energética en los años 2050 y 2080 en ambos modelos.
5. Comprobar la aceptabilidad del modelo teórico en un caso real.

6. ESTADO DE LA CUESTIÓN

6.1. CONFORT TÉRMICO

Alrededor del año 400 aC, Sócrates tuvo algunos pensamientos sobre cómo construir para garantizar el confort térmico de las personas. Vitruvio (siglo I aC) también escribió sobre la necesidad de considerar el clima en el diseño de edificios, por razones de salud y comodidad (Auliciems and Szokolay 2007). Con la llegada de la Revolución Industrial, se hizo necesario la construcción de viviendas para albergar a una gran masa de población obrera en la mayor brevedad posible y a un coste reducido. Esto provocó problemas higiénicos y sanitarios que obligaron a tomar medidas para habitar de forma salubre y confortable. Fue entonces cuando surge el interés por el confort, junto con la aparición de los sistemas de climatización a principios del siglo XX (Godoy Muñoz 2012)(Castejón 1983). Los primeros equipos de climatización fueron instalados en edificios industriales. En 1923 Houghten y Yagloglou en los laboratorios de ASHVE (American Society of Heating and Ventilation Engineers) intentaron definir una “zona de confort”(Houghton and Yagloglou 1923). En 1963 el arquitecto Victor Olgyay fue el primero en unir varias disciplinas (ingeniería, filosofía, medicina, geografía y climatología) para definir una zona de confort con fines arquitectónicos y creo un diagrama para determinar las características climáticas de espacios abiertos. Entorno a esa fecha, 1969, Baruch Givoni construye un diagrama de confort diseñado para determinar las condiciones climáticas, pero en el interior de los edificios.

La finalidad principal de un edificio es satisfacer las necesidades de sus ocupantes y una de sus funciones principales es proporcionar un ambiente térmicamente cómodo. Se puede entender como confort térmico un estado en la que la persona no experimenta una sensación ni de frío ni de calor. Según ASHRAE 55 2017, el confort térmico es definido como *“Aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico”*.

El ser humano presenta un sistema de autorregulación buscando lograr un equilibrio térmico y mantener la temperatura interna del cuerpo entorno a los 37°C por lo que constantemente se encuentra intercambiando calor con el ambiente con el fin de conservar esa temperatura. Esos intercambios de calor se producen por convección, radiación, conducción o evaporación.

- Conducción: basado en el contacto directo entre dos cuerpos en el que el flujo de calor se transfiere de un cuerpo más caliente a uno más frío (Ley de Fourier).
- Radiación: transferencia de calor por medio de ondas electromagnéticas
- Convección: transferencia de calor desde un cuerpo hasta las partículas de aire o agua al entrar en contacto.
- Evaporación: pérdida de calor por evaporación de agua.

Para mantener esa temperatura corporal, el cuerpo pone en marcha una serie de mecanismos siendo estos: mecanismos de producción de calor, conservación o de pérdida de calor.

La pérdida de calor se consigue mediante la sudoración (producción de sudor) o vasodilatación (dilatación de los vasos sanguíneos). La conservación del calor mediante la vasoconstricción (los vasos sanguíneos se vuelven más pequeños para disminuir la transmisión de calor al ambiente), intercambio de calor por contracorriente (el calor fluye de la sangre más cálida a sangre más fresca) y piloerección (levantado del vello para aumentar la capa de aire junto a la piel evitando la pérdida de calor). La producción de calor a través de la termogénesis tiritante (mediante contracción muscular, comúnmente conocida como escalofríos) y la termogénesis no tiritante (actividad de la grasa parda como fuente de calor).

La valoración del confort térmico es muy subjetiva puesto que no todas las personas presentan el mismo grado de satisfacción con el ambiente térmico, aunque se relacionan una serie de parámetros que influyen en la sensación térmica como son:

- Ambientales: temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad relativa.
- Personales: Sexo, edad, peso, nivel de actividad, tiempo de exposición, tipo de vestimenta.

Por otro lado, la capacidad de adaptación del cuerpo humano tiene una cierta limitación ya que a partir de cierta temperatura el cuerpo comenzaría a experimentar daños con posibles consecuencias fatales.

El término "adaptación" puede definirse como la disminución gradual de la respuesta del organismo a la exposición repetida a un estímulo, involucrando todas las acciones que las hacen más adecuadas para sobrevivir en un entorno de este tipo (Nikolopoulou and Steemers 2003). Este término es dividido a su vez en tres categorías: física, fisiológica y psicológica.

La adaptación física hace alusión a los cambios que hace una persona para adaptarse al ambiente térmico como puede ser: modificar el nivel de ropa, consumir alimentos o bebidas calientes o frías, realizar acciones como abrir o cerrar ventanas, subir o bajar persianas, etc. La segunda hace referencia a cambios en las respuestas fisiológicas por la exposición repetida a un estímulo. La adaptación psicológica depende de la información que las personas tienen para una situación en particular.

6.2. EFICIENCIA ENERGÉTICA ASOCIADA AL CONFORT TÉRMICO

Obtener el equilibrio entre confort térmico y eficiencia energética es un reto para el sector de la construcción. El confort térmico se encuentra directamente relacionado con la eficiencia energética ya que se busca conseguir un ambiente térmico confortable consumiendo únicamente la energía necesaria. Un aspecto importante es que nunca la eficiencia energética, debe comprometer el confort interior para los usuarios de los edificios (Kolokotsa et al. 2001) y para ello se debe tener en cuenta la adaptación térmica de los ocupantes al entorno. Otros autores opinan que el punto de ajuste de la temperatura es la forma más fácil de reducir el consumo de energía sin implicar ningún costo adicional e implicación negativa en el confort térmico (Kwong et al. 2014).

Lo expuesto anteriormente ratifica que, aunque la reducción de la energía depende en su mayor medida de las características constructivas de la envolvente del edificio, de su orientación y de las condiciones exteriores, los sistemas activos juegan también un papel importante en la reducción de la energía necesaria para alcanzar el confort térmico.

Muchos estudios se han centrado particularmente en el control de los sistemas de climatización motivado por la necesidad de optimizar el consumo energético. Cambiando el punto de ajuste de las temperaturas interiores a 20°C en invierno y 26°C en verano se logró un importante ahorro energético del 45% en el consumo de energía (Spyropoulos and Balaras 2011). Otros autores mostraron que un amplio rango de ajuste como 18.3–27.8°C puede generar un ahorro del 32–73% de energía dependiendo del clima (Hoyt et al. 2014), manifestando la importancia de evaluar el confort para alcanzar la eficiencia energética en los edificios. Wan et al. (Wan et al. 2011) estudiaron el impacto del cambio climático en edificios de oficinas en climas subtropicales y la influencia de temperaturas de consigna. La utilización de temperaturas de consigna para refrigeración superiores a 25.5 °C, les permitió obtener disminuciones en la demanda energética en los diferentes escenarios futuros. Estos estudios impulsan el desarrollo de estándares propios mediante la obtención de datos de campo de zonas determinadas que supondría la mejora de la aplicabilidad de los modelos en otros tipos de climas. Sin embargo, en la mayoría de los estudios mencionados anteriormente, las temperaturas de consigna estaban basadas en el índice Predicted Mean Vote (PMV). En este contexto, en los últimos años una serie de investigaciones han destacado la importancia de utilizar temperaturas de consigna adaptativas, que se podrían definir como temperaturas de consigna con la finalidad de mantener la temperatura operativa interior dentro de los límites de confort adaptativo. Estas investigaciones se centran en la aplicación de los modelos de confort adaptativos de la ASHRAE 55 (ASHRAE 55 2017) y de la EN 15251 (European Committee for Standardization 2007) a las temperaturas de consignas, analizando las ventajas y limitaciones que presentan con respecto a los modelos basados en el PMV. Algunas de estas investigaciones son las siguientes: Sánchez-García et al. (Sánchez-García et al. 2017)

estudiaron la utilización de temperaturas de consigna adaptativas en futuros escenarios climáticos con el objeto de reducir la demanda energética en edificios de oficina; Holmes and Hacker (Holmes and Hacker 2007) analizaron la aplicación del enfoque de confort térmico adaptativo en diferentes edificios de uso administrativo en Reino Unido, tanto actualmente como en escenarios futuros; y Kramer et al. (Kramer et al. 2015b) asignaron el límite inferior de la zona de confort del modelo desarrollado para Holanda por Van der Linden et al. (van der Linden et al. 2006), establecido en la norma ISSO 74 (Arets 2004b), a la temperatura de consigna de calefacción de un museo, lo que permitió obtener una reducción del consumo energético del 74%. No obstante, en España hay escasez de investigaciones en este campo de estudio: Sánchez-Guevara Sánchez et al. (Sánchez-Guevara Sánchez et al. 2017) aplicaron el modelo de confort adaptativo de ASHRAE 55-2013 mediante temperaturas de consignas que variaban mensualmente, y obtuvieron reducciones del 20% en la demanda energética de calefacción y del 80% en la demanda energética de refrigeración; Barbadilla-Martín et al. (Barbadilla-Martín et al. 2017a) compararon las demandas energéticas de un edificio con modo mixto usando temperaturas de consigna usuales y usando temperaturas de consigna basadas en la temperatura neutral de un modelo de confort previamente desarrollado en la ciudad de Sevilla (Barbadilla-Martín et al. 2017b). Las temperaturas de consigna usuales eran 23.5°C y 22.3°C en promedio para refrigeración y calefacción respectivamente, mientras que las basadas en la temperatura neutral eran de 24°C y 21°C en promedio para refrigeración y calefacción. Los resultados mostraron reducciones de 27.5% y 11.4% respectivamente en refrigeración y calefacción.

6.3. MODELOS DE CONFORT

6.3.1. MODELO ESTÁTICO

FANGER

Los primeros estudios sobre la evaluación del confort térmico fueron realizados por Povl OLE Fanger (1934-2006), fisiólogo de la Universidad técnica de Dinamarca. Éstos se centraron en la interacción entre los parámetros físicos del ambiente y fisiológicos de las personas.

En su libro "Thermal Comfort" (Fanger 1970) define el modelo de balance térmico basado en el voto medio estimado (PMV) y el porcentaje estimado de insatisfechos (PPD) para dar respuesta a la interacción térmica entre el hombre y el medio ambiente.

El PMV (Predicted Mean Vote)

Los datos para el cálculo del PMV fueron obtenidos por Fanger a través de un experimento realizado a 1300 jóvenes en cámaras térmicas con unas dimensiones de 2,8x5,6x2,8 m y el cual consideraba las siguientes variables: tasa metabólica,

aislamiento de ropa, temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad y humedad del aire. A continuación, se definen cada uno de estos términos:

Tasa metabólica

Es definido como el gasto energético muscular que experimenta una persona al desarrollar una actividad. Gran parte de dicha energía es transformada directamente en calor. Aproximadamente sólo el 25% de la energía es aprovechada en realizar el trabajo, el resto se convierte en calor. El cálculo de la tasa metabólica es útil para la estimación del bienestar térmico o para la evaluación de la carga física asociada a una tarea, existiendo una relación directa entre la dureza de la actividad desarrollada y el valor de la tasa metabólica (Diego-Mas 2015).

Según indica la norma ISO 8996, la estimación de la tasa metabólica a través de tablas implica un riesgo de errores importantes puesto que estamos aceptando unos valores estandarizados para distintos tipos de actividad.

Se puede estimar el consumo metabólico en función del sexo y la edad (Tabla 1) y en función del tipo de actividad (Tabla 2).

El metabolismo basal es el consumo de energía que necesita un cuerpo estando en estado de reposo para mantener las funciones vitales como la respiración, circulación, una temperatura corporal adecuada, etc. Éste depende de factores como el sexo, la edad o la altura.

Tabla 1: Metabolismo basal en función de la edad y el sexo. Fuente: NTP 323

VARONES		MUJERES	
Años de edad	Wattios/m ²	Años de edad	Wattios/m ²
6	61,480	6	58,719
7	60,842	6,5	58,267
8	60,065	7	56,979
8,5	59,392	7,5	55,494
9	58,626	8	54,520
9,5	57,327	8,5	53,940
10	56,260	9-10	53,244
10,5	55,344	11	52,502
11	54,729	11,5	51,968
12	54,230	12	51,365
13-15	53,766	12,5	50,553
16	53,035	13	49,764
16,5	52,548	13,5	48,836
17	51,968	14	48,082
17,5	51,075	14,5	47,258
18	50,170	15	46,516
18,5	49,532	15,5	45,704
19	49,091	16	45,066
19,5	48,720	16,5	44,428
20-21	48,059	17	43,871
22-23	47,351	17,5	43,384
24-27	46,678	18-19	42,618
28-29	46,180	20-24	41,969
30-34	45,634	25-44	41,412
35-39	44,869	45-49	40,530
40-44	44,080	50-54	39,394
45-49	43,349	55-59	38,489
50-54	42,607	60-64	37,828
55-59	41,876	65-69	37,468
60-64	41,157		
65-69	40,368		

En cuanto a la estimación del metabolismo en función del tipo de actividad, norma ISO 8996 establece la siguiente clasificación expresado en W/m² (Tabla 2).

Tabla 2: Clasificación del metabolismo por tipo de actividad. Fuente: ISO 8996

CLASE	W/m ²
Reposo	65
Metabolismo ligero	100
Metabolismo moderado	165
Metabolismo elevado	230
Metabolismo muy elevado	290

Correspondiéndose con:

<p><u>Metabolismo ligero:</u> Escribir, teclear, dibujar, coser, anotar contabilidad, manejo de pequeños útiles o herramientas, inspección, ensamblaje o clasificación de materiales ligeros, conducir un vehículo en condiciones normales, maniobrar un interruptor con el pie o con un pedal, marchar a una velocidad de hasta 3,5 km/h.</p>
<p><u>Metabolismo moderado:</u> Claveteado, maniobras sobre camiones, o máquinas, trabajo con martillo neumático, enyesado, recolección de frutos o de legumbres); empuje o tracción de carretillas, marchar a una velocidad de hasta 3,5 a 5,5 km/hora.</p>
<p><u>Metabolismo elevado:</u> Transporte de materiales pesados, trabajo con martillo, serrado, segar a mano, excavar, empuje de carretillas muy cargadas, marchar a una velocidad de 5,5 a 7 km/hora.</p>
<p><u>Metabolismo muy elevado:</u> Actividad muy intensa a marcha rápida cercana al máximo; trabajar con el hacha, acción de palear o de cavar intensamente; subir escaleras, marchar a una velocidad superior a 7 km/h.</p>

Otra unidad de medida para cuantificar la actividad metabólica es el “met”. La norma ISO 7730 establece que 1 met equivale a 58,2 W/m². Para edificios de oficina en los que se realiza una actividad sedentaria, la norma ISO 8996 establece una tasa metabólica de 1,2 met.

Aislamiento de ropa

“Otro factor muy importante es el vestido que modifica la interrelación entre el organismo y el medio al formar una frontera de transición entre ambos que amortigua o incrementa (según el caso) los efectos del ambiente térmico sobre la persona” (Mondelo et al. 2000).

La unidad de medición para el índice de vestimenta es el “clo”, proveniente del inglés “clothing” y equivale a una resistencia térmica de 0,155 m² × K/W. A continuación, se muestra la Tabla 3 en la que aparecen diferentes valores según el nivel de vestimenta conforme a la norma ISO 7730.

Tabla 3: Aislamiento térmico para distintas combinaciones de prendas. Fuente: ISO 7730

Ropa de trabajo	I_{cl}		Ropa de uso diario	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Calzoncillos, mono, calcetines, zapatos	0,70	0,110	Bragas, camiseta, pantalón corto, calcetines finos, sandalias	0,30	0,050
Calzoncillos, camisa, mono, calcetines, zapatos	0,80	0,125	Calzoncillos, camisa de manga corta, pantalones ligeros, calcetines finos, zapatos	0,50	0,080
Calzoncillos, camisa, pantalones, bata, calcetines, zapatos	0,90	0,140	Bragas, combinación, medias, vestido, zapatos	0,70	0,105
Ropa interior de mangas y perneras cortas, camisa, pantalones, chaqueta, calcetines, zapatos	1,00	0,155	Ropa interior, camisa, pantalones, calcetines, zapatos	0,70	0,110
Ropa interior de mangas y perneras largas, chaqueta térmica, calcetines, zapatos	1,20	0,185	Bragas, camisa, pantalones, chaqueta, calcetines, zapatos	1,00	0,155
Ropa interior de mangas y perneras cortas, camisa, pantalones, chaqueta, chaquetón y sobrepantalones con acolchado grueso, calcetines, zapatos, gorro, guantes	1,40	0,220	Bragas, medias, blusa, falda larga, chaqueta, zapatos	1,10	0,170
Ropa interior de mangas y perneras cortas, camisa, pantalones, chaqueta, chaquetón y sobrepantalones con acolchado grueso, calcetines, zapatos	2,00	0,310	Ropa interior de manga y perneras largas, camisa, pantalones, jersey de cuello en V, chaqueta, calcetines, zapatos	1,30	0,200
Ropa interior de mangas y perneras largas, chaqueta y pantalones térmicos, parka con acolchado grueso, chaquetón y sobrepantalones con acolchado grueso, calcetines, zapatos	2,55	0,395	Ropa interior de manga y perneras cortas, camisa, pantalones, chaleco, chaqueta, chaquetón, calcetines, zapatos	1,50	0,230

El RITE por otro lado, establece un nivel de vestimenta para personas con actividad metabólica sedentaria de 1,2 met de 0,5 clo en verano (época de refrigeración y 1,0 clo en invierno (época de calefacción).

Temperatura del aire

“Es la temperatura a la que se encuentra el aire que rodea al individuo. La diferencia entre esta temperatura y la de la piel de las personas determina el intercambio de calor entre el individuo y el aire, a este intercambio se le denomina intercambio de calor por convección”(Araujo et al. 2007a)

Temperatura radiante media

Es un factor importante en la evaluación de la sensación térmica. La temperatura radiante media hace referencia al calor por radiación que emiten los elementos de un entorno. Cada elemento del entorno de un cuerpo humano emite o absorbe calor en forma de radiación, dependiendo de la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el elemento. Si la temperatura del elemento es más alta que la del cuerpo, este se calienta; si, por el contrario, es menor, este se enfría emitiendo radiación hacia el elemento frío (Gálvez Huerta et al. 2013).

Velocidad del aire

La velocidad del aire es otro de los parámetros que influye en la sensación térmica. Dependiendo la velocidad del aire, la capa de aire que nos aísla se verá modificada y aumentará la evaporación de sudor (Araujo et al. 2007b).

Humedad del aire

La humedad es el vapor de agua que se encuentra presente en la atmósfera. Está directamente relacionada con la transpiración, a mayor humedad menor transpiración. Por otro lado, tenemos la humedad relativa que se define como la capacidad que tiene el aire de absorber agua, es decir, el porcentaje de vapor de agua que tiene el aire respecto al máximo que admitiría.

Una vez establecidos los valores de los parámetros anteriormente citados, se obtiene el PMV. Este índice refleja el valor medio de los votos emitidos por las personas que participaron en el experimento respecto de una escala de sensación térmica de 7 niveles al ser sometidos a diferentes ambientes térmicos (ISO 2005). Estos niveles se corresponden con: frío, fresco, ligeramente fresco, neutro, ligeramente caluroso, caluroso, muy caluroso siendo los valores numéricos -3,-2,-1,0,1,2,3, respectivamente.

El rango aceptable para el índice de confort PMV es entre -0.5 y 0.5.

Ecuación 1: Ecuación de Fanger para obtención del PMV (ISO 7730)

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ -1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ -3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\}$$

Donde:

M es la actividad metabólica (W/m²)

W Trabajo externo; generalmente cero (W/m²)

Pa presión parcial de vapor de agua en Pa

Ta temperatura del aire (°C)

Fcl factor de superficie de la ropa

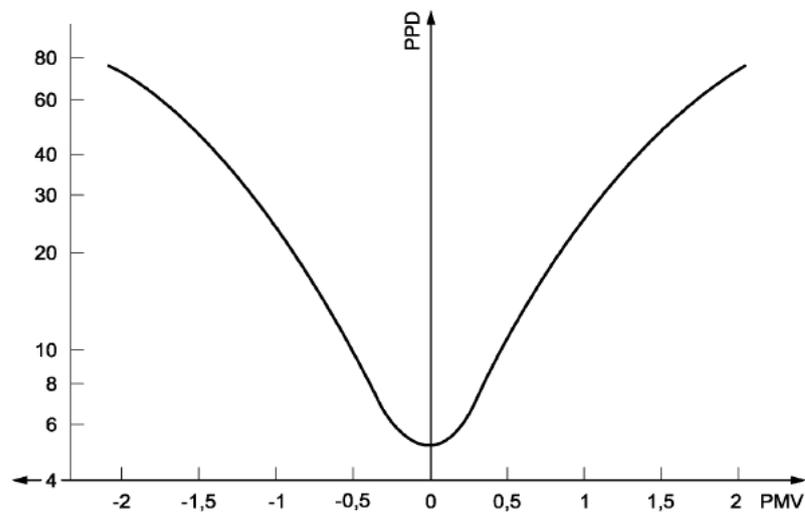
Tcl temperatura de la superficie de la ropa (°C)

Tr temperatura media radiante (°C)

Por otro lado, Fanger propone un índice PPD (Predicted Percentage Dissatisfied), para evaluar el porcentaje de personas que siente ese ambiente como incómodo. La siguiente curva en forma de U relaciona estas dos variables siendo el procedimiento de obtención sencillo, levantando una línea vertical que corte en un punto de la citada curva para después trazar otra línea horizontal que corte el eje en el que se ubican los porcentajes.

Ecuación 2: PPD en función del PMV (ISO 7730)

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)$$



Leyenda

PMV voto medio estimado

PPD porcentaje estimado de insatisfechos, %

Los modelos basados en los estudios de Fanger son llamados “modelos estáticos” los cuales son las bases de estándares como ISO 7730, ASHRAE 55 y EN 15251.

ISO 7730: 2005. Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local

Esta norma recoge la metodología utilizada por Fanger para la obtención del confort, pero, además, expone que la insatisfacción térmica puede estar motivada por el calentamiento o enfriamiento local indeseado del cuerpo. Según esta norma, las causas más comunes de incomodidad local son las corrientes de aire, diferencia vertical de la temperatura del aire, suelos calientes y fríos o asimetría de temperatura radiante. Para ello, se establecen

una serie de ecuaciones para calcular el porcentaje de insatisfechos en función de estos parámetros de incomodidad local.

Esta norma establece tres categorías (A, B, y C) que relacionan el porcentaje de insatisfechos de (PPD) con voto medio previsto (PMV) y el porcentaje de insatisfechos por sensaciones térmicas locales (PD) (Tabla 4).

Tabla 4: Categorías de ambiente térmico (ISO 7730)

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto		Incomodidad local			
	PPD %	PMV	DR %	diferencia de temperatura vertical del aire	PD % provocada por suelo caliente o frío	asimetría radiante
A	< 6	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

Este modelo, basado en consignas estáticas, puesto que no tiene en consideración las condiciones ambientales exteriores. A diferencia del modelo de Fanger, esta norma plantea un estudio del efecto que tendrá la modificación del nivel de aislamiento de ropa sobre la temperatura operativa ya que considera que esta acción puede contribuir a equilibrar las diferencias entre los distintos individuos.

6.3.2. MODELO DINÁMICO

ASHRAE 55-2017 “Condiciones térmicas ambientales para la ocupación humana”

Tal y como se declara en la norma, el propósito de este estándar es especificar las combinaciones de factores ambientales térmicos interiores y personales que producirán condiciones ambientales térmicas aceptables para la mayoría de los ocupantes dentro del espacio.

Este modelo es considerado como un modelo adaptativo puesto que además de abordar factores ambientales como la temperatura, radiación térmica, humedad y velocidad del aire; y factores personales como la actividad y la vestimenta; relaciona los rangos de temperatura interior aceptables con las condiciones climáticas exteriores.

ASHRAE 55 se desarrolló a partir del proyecto RP-884 mediante el cual se reunieron los datos de confort térmico en función de la temperatura exterior e interior de experimentos realizados en 160 edificios de todo el mundo en una amplia gama de zonas climáticas. Se realizó un análisis por separado de edificios acondicionados naturalmente o mecánicamente, ya que diversos estudios han demostrado que la temperatura neutral en edificios ventilados mecánicamente difiere de aquellos ventilados naturalmente (de Dear and Brager 1998), debido a que la percepción del confort es distinta por las diferentes

experiencias térmicas, la disponibilidad de control y los cambios resultantes en las expectativas de los ocupantes (ASHRAE 55 2017) .

El método destinado a edificios ventilados naturalmente está basado en el enfoque de modelo adaptativo. Este método establece una serie de requisitos para su aplicación: no hay sistema de refrigeración y calefacción en funcionamiento, las ventanas deben ser operables, los ocupantes tienen tasas metabólicas que van desde 1.0 a 1.3 met. y pueden libremente adaptar su ropa a las condiciones térmicas interiores y/o exteriores dentro de un rango de 0.5 a 1.0 clo., y la temperatura media exterior debe ser mayor que 10°C (50 ° F) y menor de 33.5°C (92.3 ° F).

El estándar ASHRAE 55 establece los límites de temperaturas operativas interiores dentro de unos rangos de aceptabilidad del 80% y el 90% (Ilustración 1).

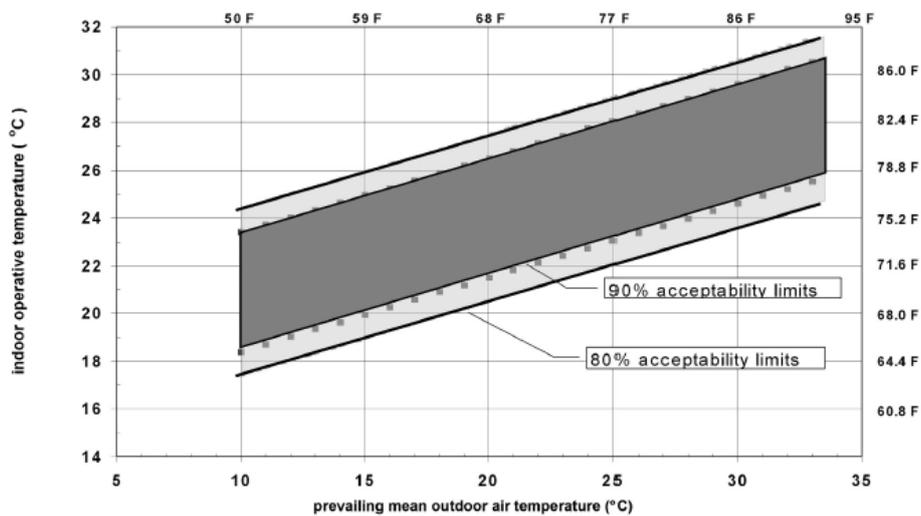


Ilustración 1: Rangos de temperatura operativa aceptable para edificios ventilados naturalmente (ASHRAE 55, 2017)

Los espacios ventilados mecánicamente se evaluarán utilizando el modelo estático o también llamado modelo de balance térmico de Fanger y la zona de confort (Ilustración 2) se define teniendo en cuenta parámetros como la tasa metabólica (entre 1.0 y 1.3 met) y aislamiento de ropa (entre 0.5 y 1.0 clo), temperatura del aire, ratio de humedad, temperatura radiante media y velocidad del aire inferiores a 0.2 m/s.

El espacio también debe cumplir los requisitos para evitar el desconfort térmico local: el nivel del tobillo de los ocupantes debe ser de 0.1 m sobre el suelo y el nivel de la cabeza de 1.1 m para los ocupantes sentados y 1.7 m para los ocupantes de pie.

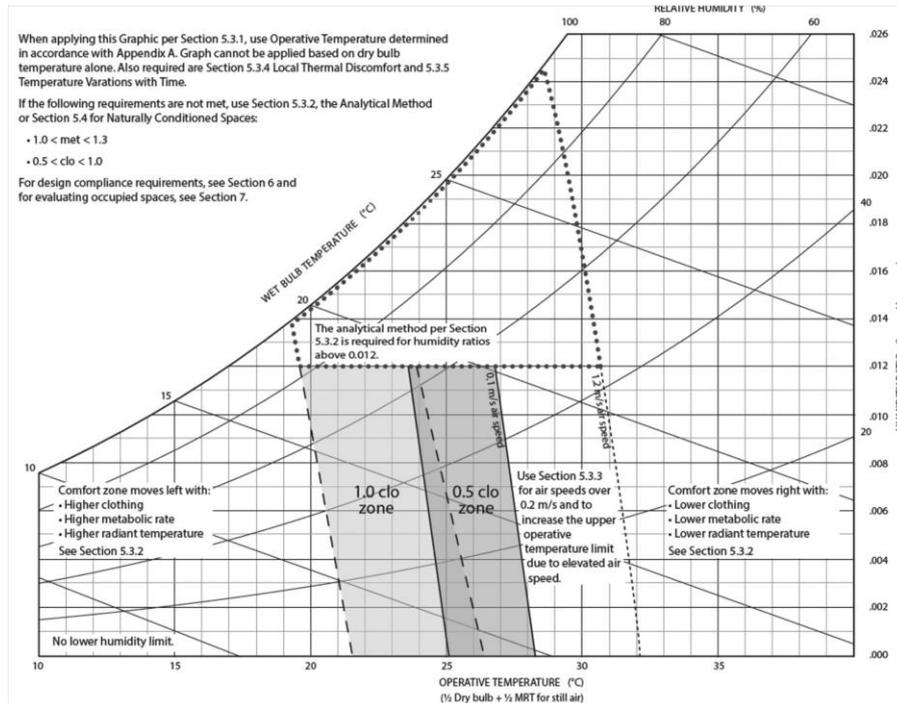


Ilustración 2: Zona de confort para edificios ventilados mecánicamente (ASHRAE 55, 2017)

EN 15251: 2007. Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.

Esta norma europea establece los parámetros de entrada para la evaluación del ambiente interior siendo estos: el ajuste de ropa, la tasa metabólica y ambiente térmico, los cuales, están incluidos dentro del enfoque adaptativo, un concepto que se basa en un sistema de autorregulación para producir confort térmico (Nicol and Humphreys 1973).

Esta norma fue desarrollada a partir del proyecto SCATs (Smart Controls and Thermal Comfort), llevado a cabo en un total 26 edificios de funcionamiento libre pertenecientes a cinco países europeos (Francia, Grecia, Suecia, Portugal y Reino Unido). Del estudio de campo realizado en este proyecto se extrajo la temperatura de confort (neutra) en base a la temperatura exterior para cada país, aunque, para edificios de funcionamiento libre en Suecia los datos disponibles eran limitados (Nicol and Humphreys 2010).

La aplicación de este estándar va destinada a edificios no industriales (oficinas, viviendas, edificios educacionales, hoteles, etc.) donde los ocupantes realizan actividades casi sedentarias y tienen fácil acceso a ventanas operables, pueden modificar libremente su ropa con un valor de aislamiento entre 0,5 y 1,0 clo y la tasa metabólica debe encontrarse entre 1,0 y 1,3 met.

Esta norma establece unos límites de aplicabilidad en base a la temperatura exterior estando estos límites comprendidos entre 10 y 30 °C para el límite superior y entre 15 y 30°C para el límite inferior. Por otro lado, la norma EN 15251 expone que los gráficos del

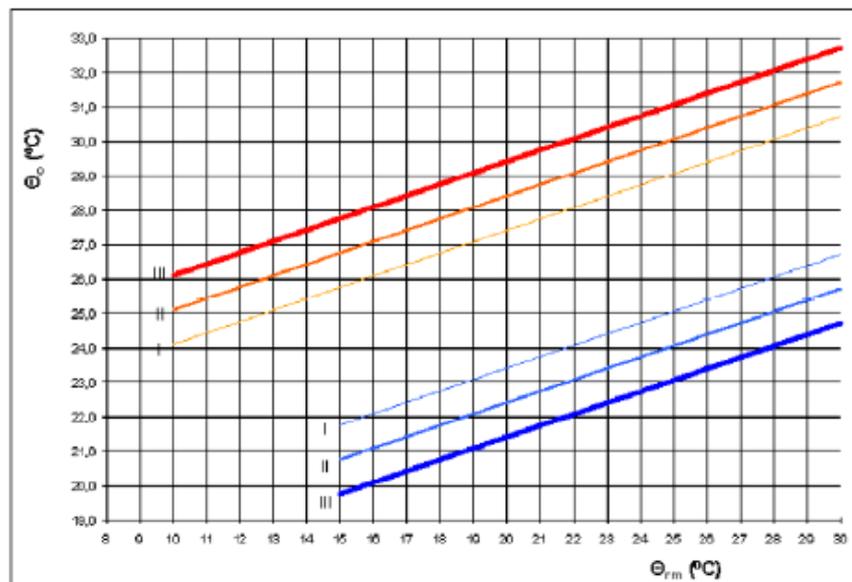
estándar de confort se basan en una base de datos limitadas. Este planteamiento se fundamenta en base a los resultados del proyecto SCATs.

Por otro lado, esta norma presenta diferentes categorías del ambiente interior dependiendo del nivel de expectativa de los ocupantes (Tabla 5).

Tabla 5: Descripción de las categorías del ambiente interior

Categoría	Explicación
I	Alto nivel de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requisitos especiales, como disminuidos, enfermos, niños muy pequeños y ancianos
II	Nivel normal de expectativa; debería utilizarse para edificios nuevos y renovados
III	Aceptable y moderado nivel de expectativa; puede utilizarse en edificios ya existentes
IV	Valores fuera de los criterios de las categorías anteriores. Esta categoría sólo debería aceptarse durante una parte limitada del año

En la Ilustración 3 aparecen representados los límites de temperatura para cada categoría, los cuales, establecen la zona de confort.



Leyenda

Θ_{rm} es la temperatura media exterior °C

Θ_o es la temperatura operativa °C

Ilustración 3: Valores de diseño de la temperatura operativa interior para edificios sin sistemas de enfriamiento mecánico en función de la temperatura exterior media ponderada exponencialmente. (UNE EN 15251)

Los límites mostrados anteriormente, están basados en estudios realizados en edificios de oficinas y cuyo cálculo fue efectuado mediante la siguiente formulación:

Categoría I	límite superior:	$\Theta_{i\text{máx.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 2$
	límite inferior:	$\Theta_{i\text{mín.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 2$
Categoría II	límite superior:	$\Theta_{i\text{máx.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 3$
	límite inferior:	$\Theta_{i\text{mín.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 3$
Categoría III	límite superior:	$\Theta_{i\text{máx.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 + 4$
	límite inferior:	$\Theta_{i\text{mín.}} = 0,33 \Theta_{rm} + 18,8 - 4$

Donde:

Θ_i es el valor límite de la temperatura operativa interior

Θ_{rm} es la temperatura media exterior de funcionamiento

Para el cálculo de la temperatura exterior promedio de funcionamiento se utiliza la siguiente fórmula extraída de la norma UNE-EN 15251:

$$\Theta_{rm} = (1-\alpha) \cdot \{ \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \Theta_{ed-3} \dots \}$$

Que puede simplificarse a:

$$\Theta_{rm} = (1-\alpha) \cdot \Theta_{ed-1} + \alpha \cdot \Theta_{rm-1}$$

Dónde:

Θ_{rm} es la temperatura promedio de funcionamiento del día de hoy

Θ_{rm-1} es la temperatura promedio de funcionamiento del día de ayer

Θ_{ed-1} es la temperatura promedio exterior diaria del día anterior

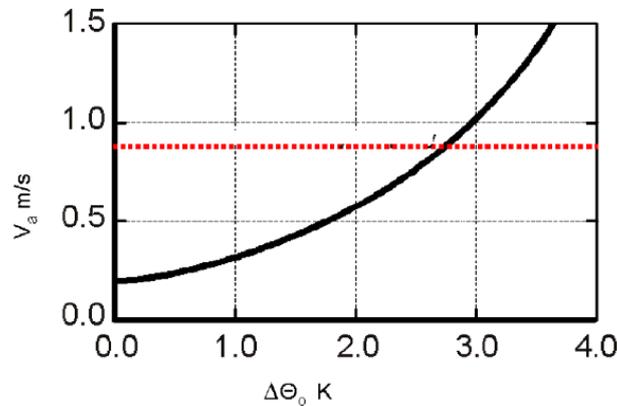
Θ_{ed-2} es la temperatura promedio exterior diaria del día anterior y así a continuación;

α es una constante entre 0 y 1; se recomienda usar 0,8.

Cuando no estén disponibles los informes del promedio de aire de la temperatura exterior puede utilizarse la siguiente ecuación aproximada:

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8\Theta_{ed-2} + 0,6\Theta_{ed-3} + 0,5\Theta_{ed-4} + 0,4\Theta_{ed-5} + 0,3\Theta_{ed-6} + 0,2\Theta_{ed-7})/3,8$$

La norma expone que para condiciones de verano en las que la temperatura interior es $>25^{\circ}\text{C}$, se puede aumentar la velocidad del aire para compensar el incremento de temperatura.



Donde:

$\Delta\Theta_o$ es el incremento en la temperatura operativa, K
 V_a es la velocidad del aire, m/s

Ilustración 4: Velocidad del aire requerida para compensar el incremento de temperatura (UNE-EN 15251)

Actualmente, la norma europea EN 15251 está siendo revisada y será anulada por la prEN 16798-1 que incluirá cambios en la aplicabilidad del modelo y el rango de confort.

- Límite inferior de temperatura operativa óptima es 1°C menor que en la versión anterior
- El rango de temperatura exterior media de funcionamiento pasa de ser de $15^{\circ} - 30^{\circ}$ a $10^{\circ} - 30^{\circ}\text{C}$.

6.4. NORMATIVA VIGENTE EN ESPAÑA

6.4.1. CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE)

En 1977 se establecieron, mediante el Real Decreto 1650/1977, las NBE (Normas Básicas de la Edificación), de obligado cumplimiento, para definir las reglas necesarias para su correcta aplicación en el proyecto y la ejecución de los edificios, en defensa de la seguridad de las personas, para atender las exigencias humanas y proteger la economía de la sociedad.

Más adelante, en 1999, se aprueba la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE), con el propósito de regular el proceso de la edificación, establecer las obligaciones y responsabilidades de los agentes que intervienen en dicho proceso y asegurar el cumplimiento de los requisitos básicos de los edificios. Esta ley, autorizó al gobierno para la redacción del Código Técnico de la edificación (CTE) que entró en vigor en el año 2006

y que deroga las anteriores NBE, ya que a pesar de ser el sector de la construcción de gran importancia necesitaba de una regulación más precisa.

El CTE, es el marco normativo que establece las exigencias que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. Se compone de una serie de normativas denominadas Documentos Básicos, dedicados por un lado a seguridad y por otro a la habitabilidad. Uno de estos Documentos Básicos que nos suscita mayor interés es el DB-HE de Ahorro de Energía, relacionado con la habitabilidad y el cual, se compone de cinco apartados dedicados al consumo energético, a la demanda energética, al rendimiento de las instalaciones térmicas, al rendimiento de la iluminación, a la contribución solar de agua caliente y a la contribución solar fotovoltaica.

En el apartado dedicado a la limitación de la demanda energética hace alusión al “bienestar térmico” y establece unos valores de referencia para asegurar el confort térmico dependiendo del clima, del uso del edificio, de la orientación, del régimen de verano y de invierno. Para cada uno de los cerramientos (suelo, muros, cubierta...) se establece un límite de transmitancia térmica y se limitan, además, el factor solar de los huecos y la permeabilidad al aire.

Los límites de transmitancia se establecen en función de la zona climática. Cada provincia tiene asignada una zona climática definida por una letra y un número. La letra hace referencia a la severidad climática de invierno (A, B, C, D, E) y el número a la severidad climática de verano (1, 2, 3 y 4).

Por otro lado, este documento tiene establecido un límite de temperatura de 20°C en invierno y de 25°C en verano, independientemente de la zona climática. Existe una excepción para uso residencial en la que aparece una consigna secundaria solo durante el periodo nocturno de 17°C para invierno y de 27°C para verano.

En 2018 se publicó el borrador con el objeto de actualización del CTE el cual, va encaminado hacia la construcción de edificios de energía casi nulo (nZEB) adaptándose a la Directiva 2010/31/UE que establece la obligación de revisar y actualizar los requisitos mínimos de eficiencia energética periódicamente, a intervalos no superiores a cinco años, con el fin de adaptarlos a los avances técnicos del sector de la construcción.

6.4.2. REGLAMENTO DE INSTALACIONES TÉRMICAS EN LOS EDIFICIOS (RITE)

El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), establece las exigencias de eficiencia energética y seguridad que deben cumplir las instalaciones destinadas a atender la demanda de bienestar térmico e higiene de las personas a través de las instalaciones de calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria, haciendo un uso racional de la energía (Ministerio de la Presidencia 2007).

De la necesidad de transponer la Directiva 2002/91/CE de eficiencia energética de los edificios y a raíz de la aprobación del CTE por el Real Decreto 314/2006, nace el Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE), aprobado por el Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio y que derogó el antiguo RITE, aprobado por el Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio. El Real Decreto 1027/2007, ha sido modificado por el Real Decreto 238/2013 con el fin de adaptarse a las nuevas necesidades de ahorro y eficiencia energética expresadas en las nuevas leyes y directivas europeas.

El RITE desarrolla las exigencias de calidad térmica del ambiente de los edificios atendiendo, además, al ahorro energético si parámetros como la temperatura operativa, humedad relativa, temperatura radiante media del recinto, velocidad media del aire se mantienen dentro de los valores expuestos en la norma.

Los valores de temperatura operativa y la humedad relativa (Ilustración 5) se fijan para personas con actividad metabólica sedentaria de 1,2 met, con grado de vestimenta de 0,5 clo en verano y 1 clo en invierno y un PPD entre el 10 y el 15 %.

Tabla 1.4.1.1 Condiciones interiores de diseño		
Estación	Temperatura operativa °C	Humedad relativa %
Verano	23...25	45...60
Invierno	21...23	40...50

Ilustración 5: Condiciones interiores de diseño conforme al RITE

La norma establece por otro lado, diferentes categorías de calidad del aire interior (IDA) en función del uso de edificio (Tabla 6).

Tabla 6: Categorías de calidad del aire interior conforme al RITE

IDA 1 (aire de óptima calidad): hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías.
IDA 2 (aire de buena calidad): oficinas, residencias (locales comunes de hoteles y similares, residencias de ancianos y de estudiantes), salas de lectura, museos, salas de tribunales, aulas de enseñanza y asimilables y piscinas.
IDA 3 (aire de calidad media): edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos, habitaciones de hoteles y similares, restaurantes, cafeterías, bares, salas de fiestas, gimnasios, locales para el deporte (salvo piscinas) y salas de ordenadores.
IDA 4 (aire de calidad baja)

En base a estas, se fija el caudal mínimo de aire exterior de ventilación para los edificios (Tabla 7).

Tabla 7: Caudales de aire exterior conforme al RITE

Categoría	dm ³ /s por persona
IDA 1	20
IDA 2	12,5
IDA 3	8
IDA 4	5

6.5. CAMBIO CLIMÁTICO

El Quinto Informe de Evaluación (AR5) del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) afirma que el cambio climático está ocurriendo en todo el mundo (Alexander and Allen 2013). Diversos estudios muestran que la tendencia del aumento de las temperaturas en las próximas décadas no es imprevisto por lo que disminuirá por tanto, la necesidad de estrategias de calentamiento y aumentarán las estrategias de enfriamiento (Roshan et al. 2019).

Existe una preocupación generalizada en el sector de la construcción, ya que el cambio climático afectará al diseño de los edificios, lo cual está abriendo nuevas líneas de investigación.

Una predicción de las condiciones climáticas futuras es el primer paso para poder diseñar edificios que responda a esas necesidades climáticas.

Belcher et al. (Belcher et al. 2005) desarrolló un método conocido como “morphing” para generar datos meteorológicos de diseño que dan cuenta de los cambios proyectados en el clima para la simulación térmica de edificios.

Otros estudios (Crawley 2008), crearon mediante este método datos meteorológicos típicos para 20 regiones climáticas para representar una gama de escenarios de cambio climático para la simulación en edificios prototipos de oficinas, cuyos resultados mostraron el impacto del cambio climático en el rendimiento de los edificios. En climas fríos el resultado se prevé positivo, reduciéndose el uso de energía en torno al 10%. En climas tropicales, los edificios verán un aumento en el uso total de energía del 20% en algunos meses. Los climas templados experimentarán una reducción alrededor del 25% en calefacción y un aumento de hasta el 15% en refrigeración.

Se estima que se producirá un aumento de la temperatura de aproximadamente 1.5°C en la temperatura media anual para 2050, pudiendo superar los 2°C en 2080. Un estudio sobre la implicación del calentamiento global en edificios de oficinas con aire acondicionado en Australia (Guan 2012) señala que, cuando el aumento anual medio de la temperatura exterior supera los 2°C, el riesgo de sobrecalentamiento aumentará y que

este posible problema de sobrecalentamiento podría reducirse significativamente con la disminución de la densidad de carga interna, en particular la iluminación y la carga de enchufe. En otra investigación, para reducir las horas de sobrecalentamiento, se optó por sombrear el acristalamiento con el fin de evitar la radiación solar incidente. Se obtuvieron resultados óptimos, aunque no se pudo eliminar por completo el riesgo de sobrecalentamiento (Gupta and Gregg 2012).

Otro gran interés que suscita este tema es cómo afectará el aumento de las temperaturas en la adaptación de los ocupantes. Los resultados de un estudio llevado a cabo en Turquía (Dino and Meral Akgül 2019), mostraron que los ocupantes pueden tolerar temperaturas más altas en las zonas de con un clima más cálido. En climas fríos, es más difícil para los ocupantes adaptarse a temperaturas más cálidas.

7. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la metodología ha sido indispensable realizar una búsqueda previa, basada en fundamentaciones teóricas que justifican el estudio propuesto.

La metodología utilizada detalla el procedimiento llevado a cabo en la realización de este trabajo que se divide en las siguientes fases: (I) análisis de las zonas climáticas, (II) construcción del modelo teórico, (III) recopilación de datos, (IV) simulaciones llevadas a cabo para el escenario actual, (V) simulaciones en futuros escenarios climáticos, (VI) aplicación a un caso real y (VII) análisis de los resultados.

La primera y segunda fase recogen las zonas climáticas seleccionadas y las características del modelo teórico establecido para este trabajo el cual se corresponde con un edificio de oficina. La fase III recoge el proceso de obtención de las temperaturas de consigna adaptativas, siendo la fase de mayor peso en la investigación. El siguiente paso, fase IV y V, se centra en el análisis de la demanda energética con el programa de simulación DesignBuilder. La fase VI establece los datos de un modelo real con el objetivo de analizar la viabilidad de la aplicación del modelo teórico. Por último, se procede al análisis de los resultados y a la discusión de los mismos.

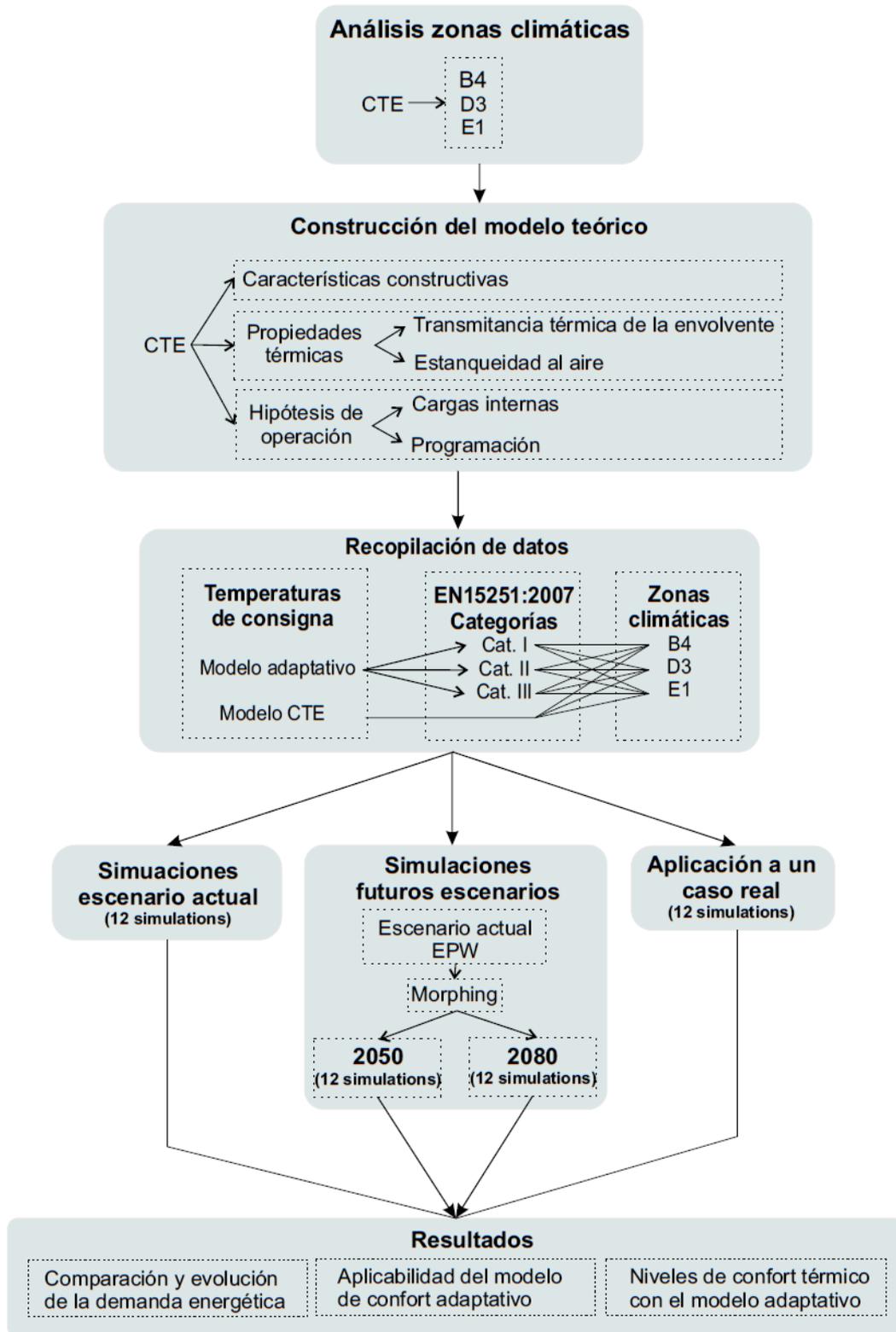


Ilustración 6: Diagrama de flujo

7.1. ANÁLISIS DE ZONAS CLIMÁTICAS

7.1.1. ESCENARIO CLIMÁTICO ACTUAL

Se han seleccionado tres zonas climáticas representativas del territorio español, siendo estas las zonas B4, D3 y E1 según la clasificación que establece el Código Técnico de la Edificación en su Documento Básico HE Ahorro de Energía. La zona B4 se corresponde con el clima de Sevilla, la zona D3 con el clima de Madrid y la E1 con Ávila.

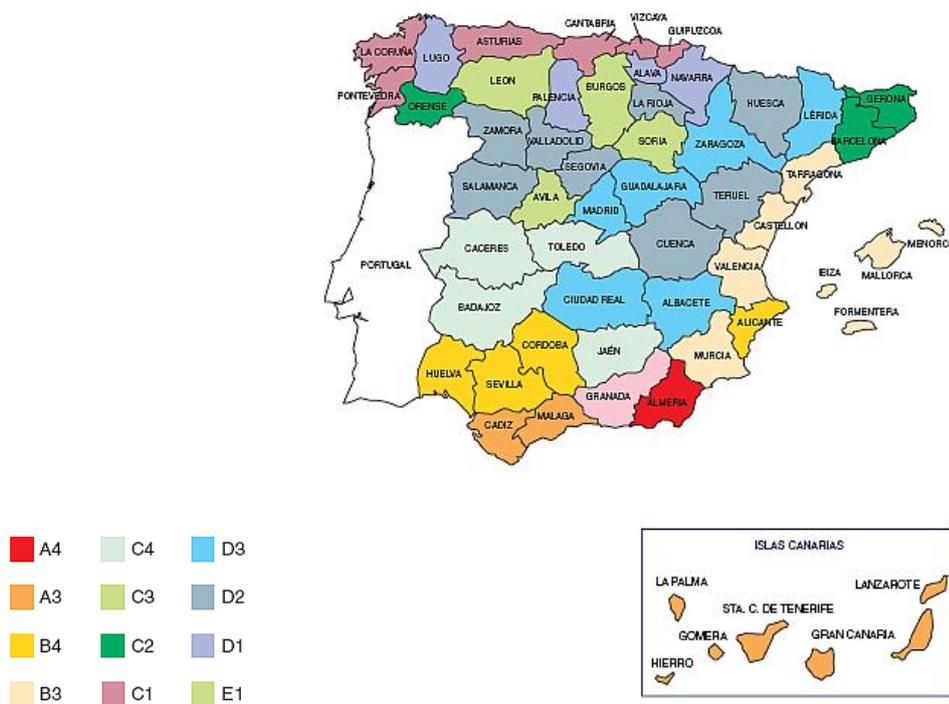


Ilustración 7: Mapa zonas climáticas CTE. Fuente: www.construmatica.com

Las temperaturas de cada uno de los climas, para el escenario actual, fueron obtenidas mediante el programa Climate Consultant, que utiliza datos climáticos anuales en formato EPW.

Clima de Sevilla:

Sevilla se encuentra a una altitud de 34 m sobre el nivel del mar y su clima, según la clasificación de Köppen Geiger, es considerado como mediterráneo con veranos secos y muy cálidos e inviernos templados, cuya temperatura media en el mes más cálido está entorno a los 28.2 °C y de 10.9 °C en el mes más frío. Por ello, Sevilla es considerada la ciudad más calurosa de España. Cuenta con una precipitación media anual de 539 mm y una humedad relativa media del 59%, datos estadísticos

climatológicos extraídos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) del período comprendido entre 1981-2010.

Clima de Madrid:

A una altura de 667 m sobre el nivel del mar, Madrid presenta un clima semiárido-frío con veranos calurosos cuya temperatura media en el mes más cálido es de 25.6 °C, e inviernos fríos con una temperatura media en el mes más frío (enero) de 6.3 °C.

La precipitación media anual es de 421 mm siendo el periodo otoñal el que más precipitaciones registra. La media de humedad relativa anual es del 57% encontrando la época fría más húmeda.

Clima de Ávila:

Ávila está situada a una altitud de 1130 m. Se puede describir el clima de Ávila de tipo oceánico mediterráneo con veranos suaves e inviernos muy fríos. Temperaturas medias en el periodo estival en torno a 20°C y la temperatura media más baja la encontramos en el mes de enero siendo esta de 3°C.

Las precipitaciones en esta zona son escasas con 416 mm de media anual, siendo los meses de mayo y octubre los más lluviosos. La humedad media anual se sitúa en un 63%.

Los siguientes gráficos han sido realizados en base a datos estadísticos climatológicos extraídos de AEMET.

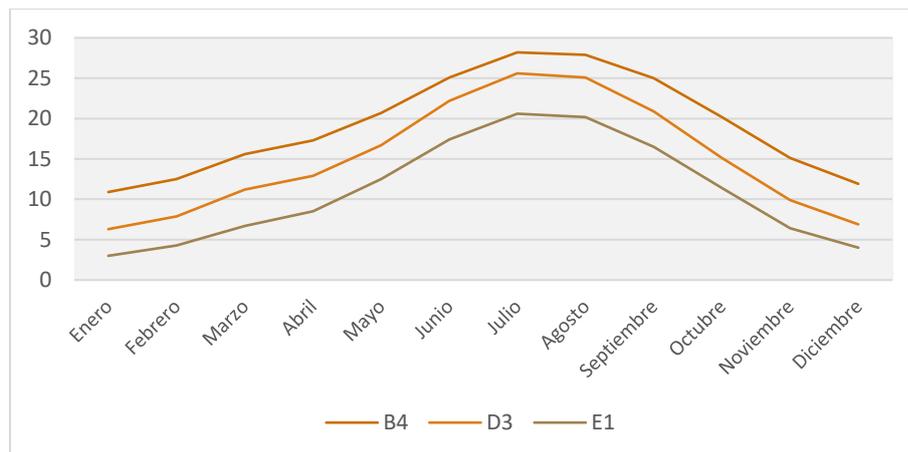


Ilustración 8: Temperatura media mensual (°C). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET

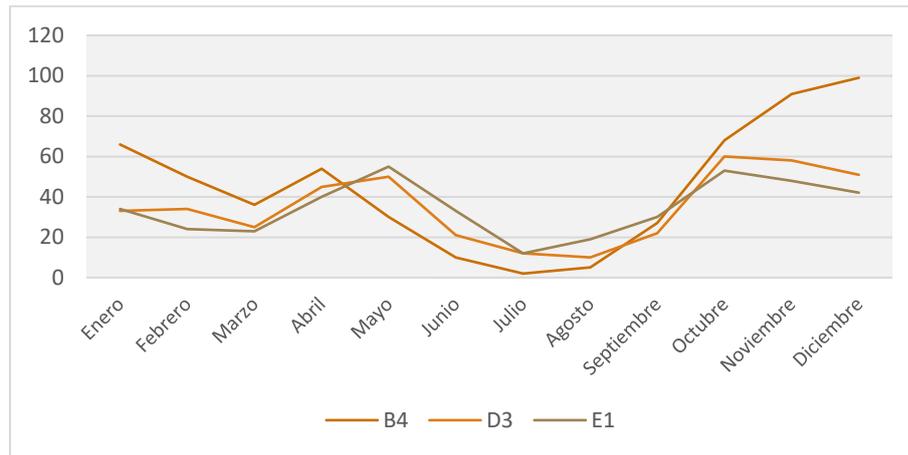


Ilustración 9: Precipitación media mensual (mm). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET

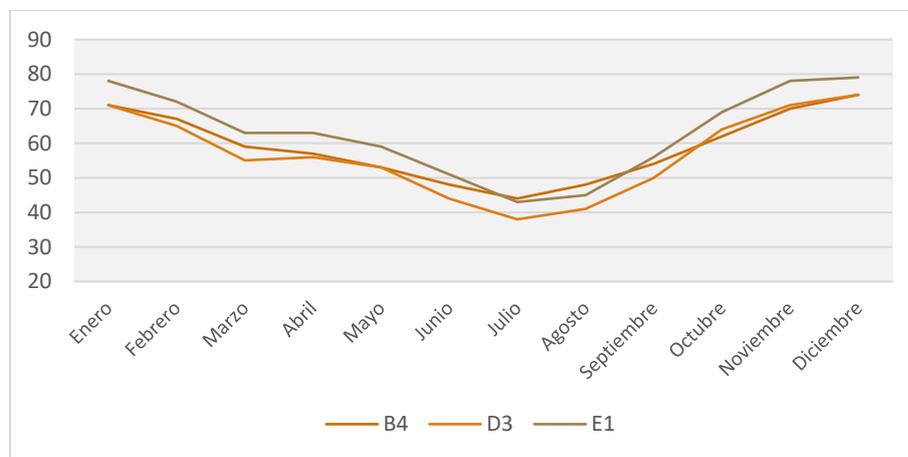


Ilustración 10: Humedad relativa media (%). Fuente: Elaborado por la autora en base a los datos de AEMET

7.1.2. ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

En este estudio se plantea, además, la evaluación del modelo en futuros escenarios climáticos. Para ello se ha utilizado la herramienta, CCWorldWeatherGen del UK Met Office Hadley Centre Coupled Model 3 HadCM3, que, mediante un proceso de morphing, genera archivos meteorológicos adaptados al cambio climático de cualquier ubicación en el mundo y crea archivos compatibles con la mayoría de los programas de simulación de rendimiento de edificios (Jentsch et al. 2013). El “morphing” de los 3 archivos climáticos actuales, correspondiente a las zonas B4, D3 y E1, se ha realizado para el escenario A2 de emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo con el IPCC, dando como resultado 3 archivos de escenarios climáticos para 2050 y 3 para 2080. Tomando como base los estudios llevados a cabo por el profesor Carlos Rubio Bellido (Sánchez-García et al. 2019) (Pérez-Fargallo et al. 2018b) (Rubio-Bellido et al. 2016).

Los siguientes gráficos muestran la predicción de las temperaturas para los escenarios climáticos futuros siendo el incremento de la misma en las tres zonas climáticas, causada por la acción del cambio climático, en 2050 en torno a 2°C en los meses fríos y alcanzando hasta 5°C en los meses de julio y agosto. Para el escenario 2080, la temperatura sufre un incremento de hasta 8°C en el periodo estival con respecto al escenario actual.

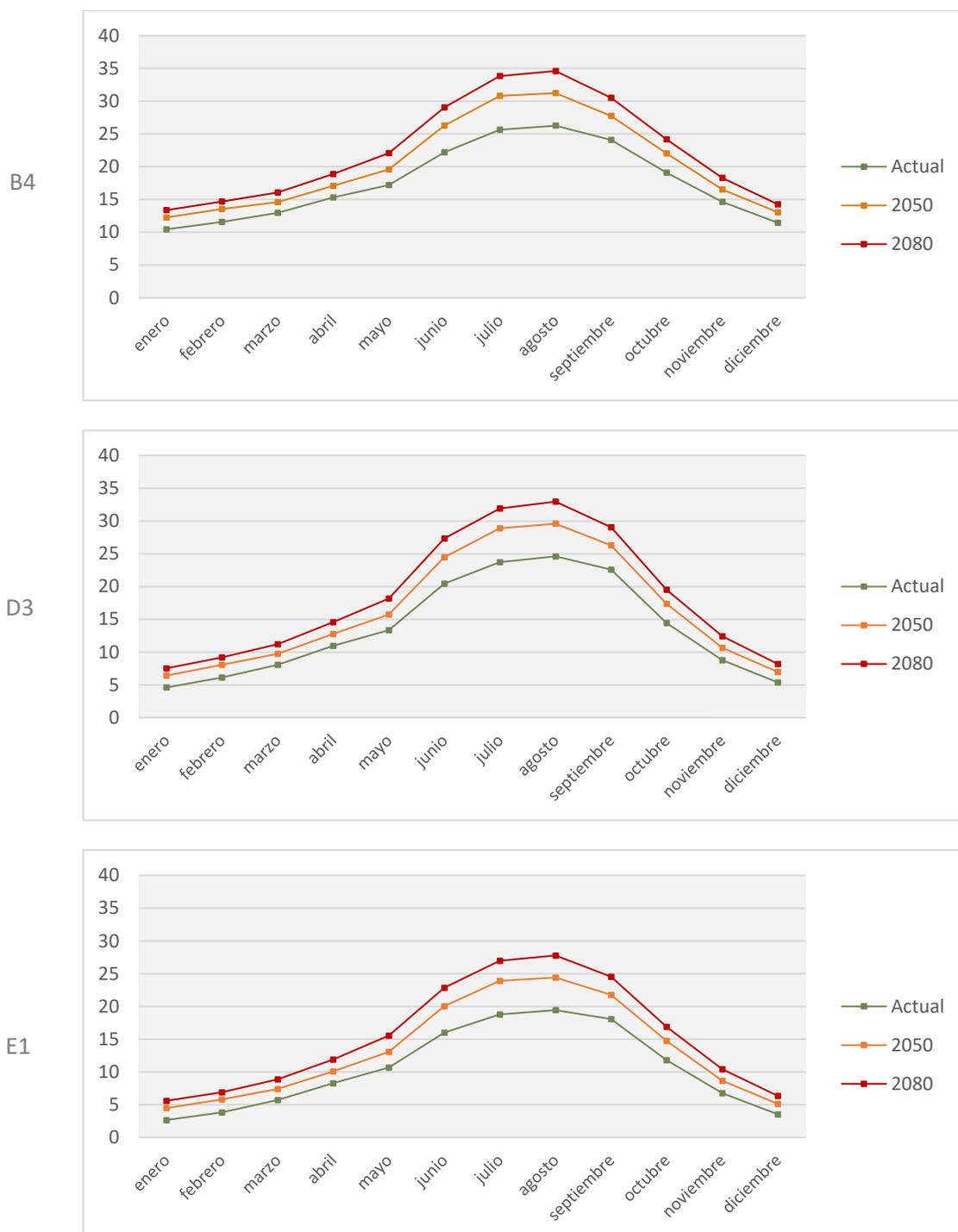


Ilustración 11: Predicción de las temperaturas en futuros escenarios climáticos

7.2. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TEÓRICO

7.2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Para este trabajo se ha elaborado un prototipo definido como “shoebox” con una dimensión de 5 x 5 x 2.5 metros, una superficie útil de 20.3 m² y un volumen ocupado de 60.8 m³. Este prototipo representa un edificio de uso de oficina, siendo la norma EN 15251 de aplicabilidad a esta tipología de edificio (Ilustración 12).

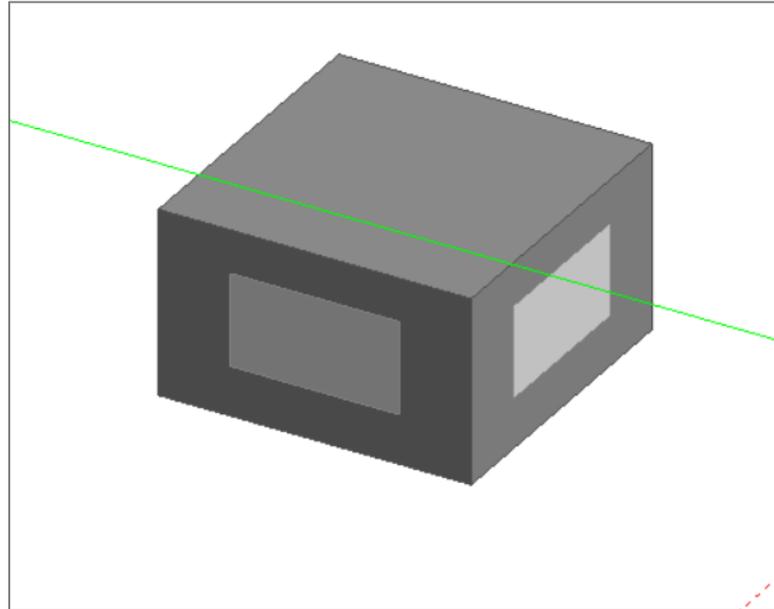


Ilustración 12: Modelo teórico

Por otro lado, éste ha sido definido constructivamente conforme al Apéndice D del DB HE-1 del CTE teniendo en cuenta los parámetros característicos de la envolvente en función de la zona climática.

La Tabla 8 recoge el límite de transmitancia de los elementos de la envolvente térmica. En el prototipo propuesto, el porcentaje de huecos adoptado es del 30% con respecto al cerramiento vertical.

Tabla 8: Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica.

Fuente: DB HE-1 del CTE

LÍMITE DE TRANSMITANCIA DE LOS ELEMENTOS (W/m ² K)		ZONAS CLIMÁTICAS		
		B4	D3	E1
MUROS DE FACHADA Y CERRAMIENTOS EN CONTACTO CON EL TERRENO		0.82	0.66	0.57
SUELOS		0.52	0.49	0.48
CUBIERTAS		0.45	0.38	0.35
VENTANAS (30% de huecos)	Marcos/divisores	1.72	1.72	1.72
	Vidrio	2.00	2.00	2.00

A continuación, se definen constructivamente cada uno de estos elementos:

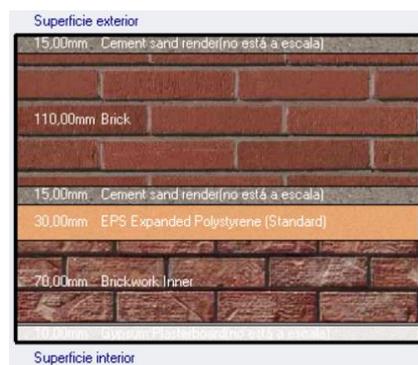
SUELO:

Formado por una capa de hormigón armado de 10 cm, aislamiento de 6,5 cm, mortero de cemento de 3 cm y suelo de terrazo.



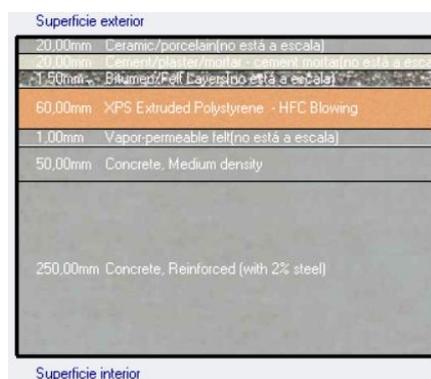
CERRAMIENTO:

El cerramiento está compuesto por medio pie de ladrillo perforado con aislante de poliestireno expandido de 3 cm y tabicón de ladrillo hueco doble. Acabado exterior con enfoscado y blanqueado e interior enlucido y pintado.



CUBIERTA:

Cubierta plana con aislamiento de poliestireno extruido 6 cm de espesor y acabado de baldosa cerámica.



CARPINTERÍA:

Las carpinterías están formadas por marcos de PVC que constan de tres divisores verticales y doble acristalamiento 4/6/4.

Ilustración 13: Características de la envolvente del edificio

Por otra parte, la tasa de infiltración se ha establecido en 0.739 ren/h para la zona B4 y 0.907 ren/h para las zonas D3 y E1, cálculos realizados en base a los documentos “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” (Ministerio de Industria Energía y Turismo 2015) y la Tabla 2.3 del Documento Básico HE Ahorro de Energía (Código técnico de la Edificación 2013) en función de la zona climática (Tabla 9).

Tabla 9: Permeabilidad al aire de huecos. Fuente: Documento Básico HE Ahorro de Energía

Parámetro	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Permeabilidad al aire de huecos (m ³ /h*m ²)	<50	<50	<50	<27	<27	<27

Las cargas internas se establecen para un régimen de uso de 8 horas de actividad en oficina distribuidas de 7:00 a 15:00 y para una densidad media de fuentes internas conforme al Apéndice C del DB HE-1 del CTE; con una carga de ocupación de 9.79 W/m², una carga de iluminación de 9 W/m², una carga de equipo de 4.5 W/m² y 4.04 W/m² de ventilación (Ilustración 14).

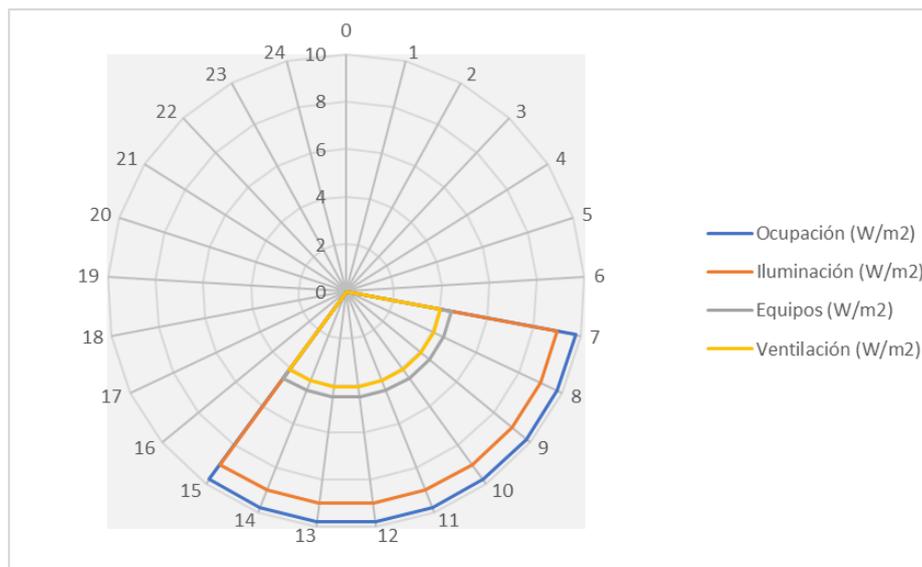


Ilustración 14: Calendario cargas internas

Según la NTP 211: Iluminación de los centros de trabajo, el nivel mínimo de luminancia para trabajos en oficina es de 300 lux (Chavarria Cosar 1989).

En cuanto a la categoría de calidad de aire interior (IAQ), el uso oficina se corresponde con IDA 2 (aire de buena calidad). Para esta categoría el caudal mínimo de aire exterior de ventilación debe ser 12,5 l/s persona (Tabla 1.4.2.1 del Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios) (Ministerio de la Presidencia 2007).

7.2.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

Para la climatización se ha implantado un sistema de aire acondicionado VRV con unos rendimientos en refrigeración (EER) de 3.3 y en calefacción (COP) de 3.4, programado para funcionar en el horario de oficina establecido de 7:00 a 15:00. Este sistema cuenta con recuperador de calor y condensador enfriado por aire y está dotado, además, de un termostato para el control de la temperatura de consigna.

7.3. CASO DE ESTUDIO REAL

En este estudio se ha evaluado la aplicación del modelo adaptativo en un edificio real. El edificio en cuestión es un edificio de oficina denominado Madrid Río, cuyos datos han sido aportados por los responsables del contrato de investigación 68/83 con referencia 3266/0923 mediante el cual, se realizó el proyecto denominado “Análisis térmico dinámico, gestión energética e iluminación natural de edificios de oficinas aplicado en Madrid Río”.

Madrid Río lo conforman dos edificios en forma de “L”, situados en Madrid capital junto al río Manzanares. Para nuestro estudio hemos tomado el edificio sur. Este, se distribuye en:

- Planta baja: uso comercial y recepción de oficinas.
- Seis plantas tipo para uso de oficinas y planta séptima para uso de terraza, en los lados de los edificios perpendiculares al río.
- Seis plantas tipo para uso de oficinas y planta séptima con uso de oficinas, en los lados que dan al Paseo de Los Melancólicos.
- Plantas técnicas en las cubiertas
- Dos niveles de sótano.



Ilustración 15: Localización en el mapa. Fuente: Google Earth

Los datos relativos a la envolvente y sistemas han sido extraídos del proyecto arquitectónico.

El edificio (Ilustración 16) se plantea con estructura de hormigón armado, con losas macizas y pilares sobre rasante y cimentado sobre losa maciza de hormigón y muros pantalla y muro de sótano para contención de tierras para la excavación. Se proyectan dos núcleos verticales que comunican todas las plantas del edificio y que recogen ascensores, patinillos y escaleras. Los cerramientos de fachadas se plantean, por un lado, con paños enteros de vidrio mediante muro cortina en las fachadas que dan al río y a la urbanización interior y, por otro lado, una combinación de paños ciegos y transparentes en una proporción del 50% en las fachadas que miran al Paseo de Los Melancólicos. En cerramiento de cubierta se proyecta un sistema de cubierta plana invertida.



Ilustración 16: Edificio Madrid-Río. Fuente: Proyecto arquitectónico

Para simplificar los cálculos de las simulaciones energéticas, se ha decidido estudiar una sola planta siendo esta la planta nº 5 destinada a uso oficina (Ilustración 17). Se trata de una planta diáfana en cuyo núcleo alberga el vestíbulo de ascensores, aseos, patinillos de instalaciones, una escalera de evacuación en el núcleo perpendicular al río y dos escaleras en el núcleo paralelo al río. La planta tiene una superficie total construida de 1853,64 m² y una superficie destinada a uso oficina de 1585,90 m².

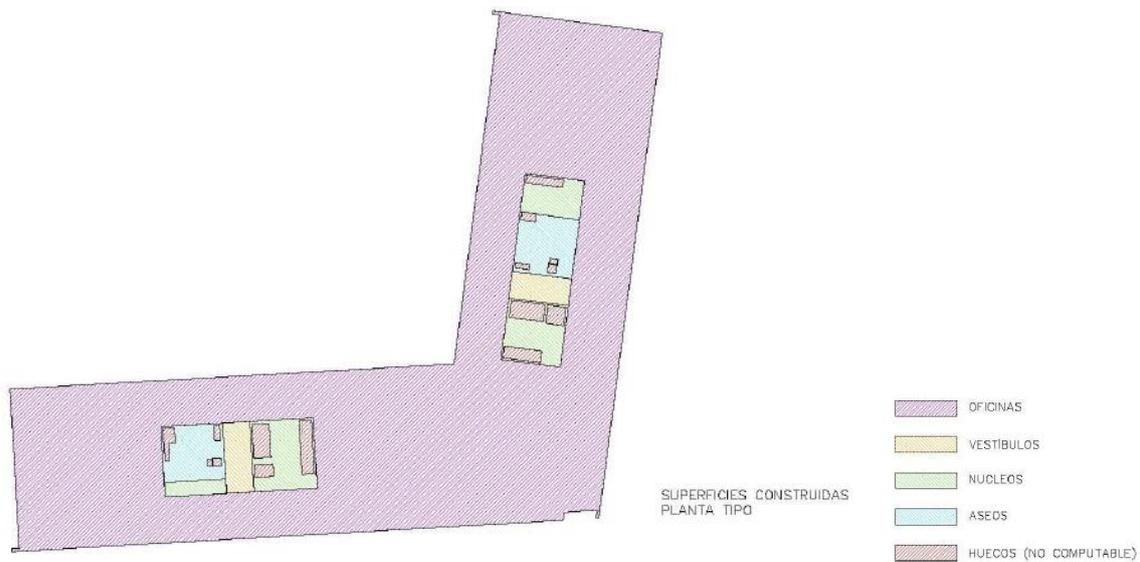


Ilustración 17: Planta tipo edificio Madrid Río. Fuente: proyecto arquitectónico

FUNCIONAMIENTO DEL EDIFICIO

El horario de funcionamiento del edificio se establece en 8 horas durante todos los días del año a excepción de domingos.

OCUPACIÓN DEL EDIFICIO

El régimen de ocupación ha sido establecido conforme al CTE para una densidad media siendo esta de 0,2390 pers/m².

SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

Se proyecta un sistema VRF con recuperador de calor cuya una unidad exterior que se ubicará en la zona técnica de las cubiertas y las unidades interiores se situarán en los falsos techos de las oficinas. El equipo presenta un rendimiento de 3,30 en refrigeración (EER) y de 3,40 en calefacción (COP).

La ventilación se realizará mediante una Unidad de Tratamiento de Aire (UTA) con baterías de expansión directa acopladas a una máquina exterior. La UTA dispone de sección de filtros, recuperador de calor rotativo, batería de expansión, ventiladores de impulsión y de retorno, humectación y silenciadores.

7.4. RECOPIACIÓN DE DATOS

En el modelo estático, las temperaturas de consignas se establecen conforme al CTE, que fija los límites de temperaturas interiores a partir de los cuales los sistemas de climatización del edificio empiezan a operar, siendo la temperatura alta de consigna para un local de uso no residencial de 25°C y la temperatura baja de consigna de 20°C durante todo el año, independientemente de la zona climática, del ambiente exterior, o de la carga térmica debida a la ocupación de los espacios.

Sin embargo, en el modelo adaptativo, el procedimiento para obtener las temperaturas de consignas adaptativas es más complejo y se determinan conforme a los límites de la norma EN 15251 (CEN 2007). Estos límites se determinan en función de la temperatura media exterior de funcionamiento para cuyo cálculo son necesarias las temperaturas medias exteriores de los 7 días anteriores y cuya fórmula es la siguiente:

$$\theta_{rm} = (\theta_{ed-1} + 0.8 * \theta_{ed-2} + 0.6 * \theta_{ed-3} + 0.5 * \theta_{ed-4} + 0.4 * \theta_{ed-5} + 0.3 * \theta_{ed-6} + 0.2 * \theta_{ed-7})/3.8$$

Donde:

θ_{Ed-1} es la temperatura media diaria del aire del día anterior

θ_{Ed-2} es la temperatura media al aire libre diaria dos días antes, y así sucesivamente.

Para la obtención de los límites es necesario obtener, por un lado, las temperaturas operativas interiores (θ_i) para los 365 días del año mediante la siguiente fórmula:

$$\theta_i = 0.33 * \theta_{rm} + 18.8$$

Y, por otro, evaluar estas temperaturas operativas interiores dentro de los límites de las categorías I, II y III y cuya relación establecerá la zona de confort (Ilustración 18).

La norma En 15251 establece unos límites de aplicabilidad entre 10°C y 30°C para el límite superior y entre 15°C y 30°C para el límite inferior. Fuera de estos límites, se ha considerado utilizar las temperaturas operativas interiores recomendadas por la norma, las cuales aparecen reflejadas en la Tabla 10.

Tabla 10: Rangos de temperatura de confort por categoría con respecto a la temperatura media del aire exterior (θ_{rm}).

Category – Limit	Prevailing mean outdoor air temperature θ_{rm} - Comfort temperature				
	$\theta_{rm} < 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{rm} < 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	$15\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_{rm} \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\theta_{rm} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$	
I	Upper comfort limit θ_{imax} (UI)	23.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 2$	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 2$	25.5
	Lower comfort limit θ_{imin} (LI)	21.0	21.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 - 2$	23.5
II	Upper comfort limit θ_{imax} (UII)	24.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 3$	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 3$	26.0
	Lower comfort limit θ_{imin} (LII)	20.0	20.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 - 3$	23.0
III	Upper comfort limit θ_{imax} (UIII)	25.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 4$	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 + 4$	27.0
	Lower comfort limit θ_{imin} (LIII)	19.0	19.0	$0.33 * \theta_{rm} + 18.8 - 4$	22.0

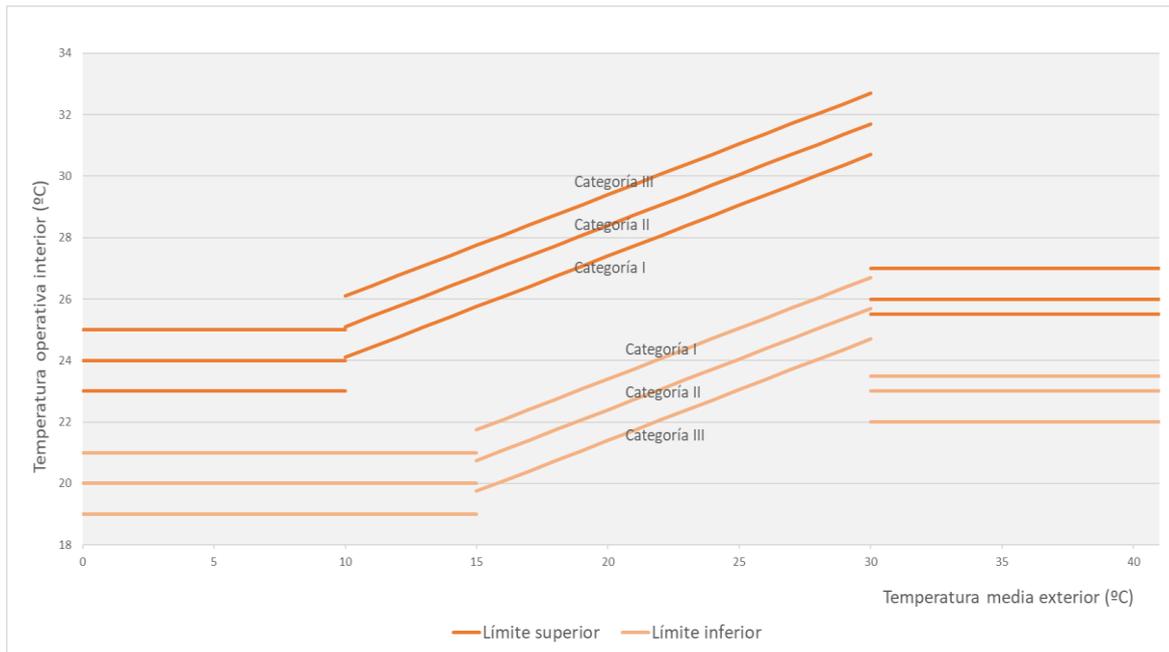


Ilustración 18: Definición de la zona de confort según los límites establecidos en cada categoría.

7.5. SIMULACIONES

7.5.1. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

El objetivo de este trabajo es evaluar la demanda energética con el uso del modelo de confort estático y adaptativo mediante el empleo del software DesignBuilder de simulación energética de edificios, que integra el motor de cálculo de EnergyPlus que es el más extendido a nivel internacional para la ejecución de simulaciones dinámicas.

EnergyPlus es un programa muy potente y complejo de simulación de energía de edificios que requiere de un alto grado de conocimiento para su manejo y el cual, se utiliza para modelar el consumo de energía para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación, enchufes o incluso el uso de agua en los edificios. Sin embargo, DesignBuilder es una interfaz que aprovecha las funciones en EnergyPlus a un nivel de complejidad menor y es de fácil manejo.

Simplemente definiendo el edificio (características constructivas, ubicación, orientación, clima, cargas internas, sistemas mecánicos, instalaciones renovables...) calcula las cargas necesarias para mantener la consigna de control térmico de la calefacción y refrigeración, el consumo de energía de los equipos, las emisiones de carbono, etc.

Mediante este software, además, es posible desarrollar simulaciones dinámicas avanzadas en intervalos de tiempo de una hora, empleando archivos de datos climáticos horario, así como cálculos de dimensionamiento de los sistemas HVAC. El programa permite obtener los resultados en intervalos anuales, mensuales, horario y sub-horario. Los sistemas de climatización se pueden modelar mediante la opción "simple" o

“detallada” permitiendo esta última modelar explícitamente los sistemas de climatización. Se puede habilitar el modo mixto (empleo de los sistemas de climatización junto con ventilación natural). Permite asimismo modelar la ventilación natural, incluyendo el control de la apertura de ventanas, rejillas y puertas.

En este trabajo se plantea realizar un total de 48 simulaciones correspondiéndose con simulaciones realizadas en el escenario actual, escenarios futuros y aquellas realizadas en un caso real:

1. SIMULACIONES EN EL ESCENARIO ACTUAL

De cada simulación se extraerán los datos de demanda energética relativos a calefacción y refrigeración. En total se realizarán 12 simulaciones (3 zonas climáticas * 1 escenario climático * 4 categorías).

2. SIMULACIONES EN ESCENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

Se realizará un total de 24 simulaciones [3 zonas climáticas * 2 escenarios climáticos (2050 y 2080) * 4 categorías].

3. SIMULACIONES CASO REAL

Se plantean un total de 12 simulaciones para el caso real [1 zona climática (D3) * 3 escenarios climáticos (actual, 2050 y 2080) * 4 categorías].

7.5.2. TRATAMIENTO DE LAS CONSIGNAS PARA SIMULACIÓN DINÁMICA

La herramienta DesignBuilder trabaja con consignas estáticas por lo que ha sido necesario la modificación de éstas a consignas adaptativas y en base diaria. Las consignas de calefacción y refrigeración adaptativas obtenidas para cada uno de los 365 días, para las diferentes categorías y, además, para distintos escenarios climáticos han tenido que ser programadas manualmente para su introducción en el programa de simulación.

La opción “Programa compacto” de la herramienta permite definir programaciones de manera más flexible, mediante un código de texto que emplea el formato “Schedule:compact” de EnergyPlus, el cual, es descrito a continuación:

El campo “Through” contiene la fecha de finalización del período de programación en formato mm/dd. El campo “For” debe contener los días aplicables y permite combinar múltiples opciones (Weekdays, Weekends, Holidays, Alldays, SummerDesignDay, Sunday, Monday, etc.). El campo “Until” contiene la hora de finalización del día definido y la programación de la temperatura para ese día. Los datos deben representar la hora del reloj de 24 horas en el formato HH:MM. seguida de una coma y a continuación de esta, el valor de la programación hasta la hora indicada (Tabla 11).

Tabla 11: Formato de consignas para simulación dinámica.

	COOLING SETPOINT	HEATING SETPOINT
HEADING	Schedule:Compact, prueba_adaptC, Any Number,	Schedule:Compact, prueba_adaptH, Any Number,
1	Through: 01/01, For: Alldays, Until: 24:00, 23,	Through: 01/01, For: Alldays, Until: 24:00, 21,
2	Through: 01/02, For: Alldays, Until: 24:00, 24,38,	Through: 01/02, For: Alldays, Until: 24:00, 21,
3	Through: 01/03, For: Alldays, Until: 24:00, 24,64,	Through: 01/03, For: Alldays, Until: 24:00, 21,
4	Through: 01/04, For: Alldays, Until: 24:00, 24,88,	Through: 01/04, For: Alldays, Until: 24:00, 21,
5	Through: 01/05, For: Alldays, Until: 24:00, 24,87,	Through: 01/05, For: Alldays, Until: 24:00, 21,
6	Through: 01/06, For: Alldays, Until: 24:00, 50,	Through: 01/06, For: Alldays, Until: 24:00, 1,
7	Through: 01/07, For: Alldays, Until: 24:00, 24,62,	Through: 01/07, For: Alldays, Until: 24:00, 21,

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. EVALUACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

En primer lugar, se va a llevar a cabo una evaluación de la demanda energética total del caso de estudio (calefacción más refrigeración) en las diferentes zonas climáticas (B4, D3, E1), considerando los límites de temperaturas de consigna establecidos en el modelo estático (CTE) y en el modelo adaptativo (Cat. I, Cat. II, Cat. III) y los escenarios climáticos actual, 2050 y 2080. Todos estos datos han sido representados en la Ilustración 19.

Por un lado, se puede observar una reducción para la actualidad del modelo EN 15251 en todas las categorías respecto al CTE para las zonas B4 y D3; sin embargo, para la zona E1 se produce un aumento en la Cat. I respecto al CTE de 13.66 kWh/m²*año debido a que la temperatura de consigna de calefacción correspondiente a la Cat. I es de 21°C, superior a la temperatura de consigna de calefacción de 20°C del CTE y teniendo en cuenta que en la zona E1 predomina mayormente la demanda de calefacción.

En base a los resultados obtenidos sobre la influencia del cambio climático, se puede observar que el aumento de la demanda es más abrupto en el modelo estático que en el de la EN 15251. La tendencia general es un incremento de la demanda total debido al aumento significativo de la demanda de refrigeración que origina el cambio climático. Para la zona E1, concretamente en el periodo 2050, se aprecia una disminución en la demanda total. Esto se debe a que el incremento de las temperaturas provocadas por el cambio climático tiene un efecto aparente y temporalmente favorecedor debido a que se registra un mayor número de horas dentro de los límites de confort y horas que no requieren demasiada demanda energética para alcanzar la temperatura de consigna. Esta tendencia ocurre temporalmente desde el escenario actual hasta el 2050, ya que en el 2080 las temperaturas comienzan a exceder el límite superior de aplicabilidad, por lo que se activan los sistemas de acondicionamiento, y en consecuencia crece la demanda energética. Este carácter favorecedor es únicamente local, correspondiente a la zona E1, y su beneficio es muy reducido en comparación con el resto de los efectos perjudiciales que el cambio climático tiene sobre el medio ambiente, como el mayor riesgo de incendios, la falta de agua potable o las inundaciones.

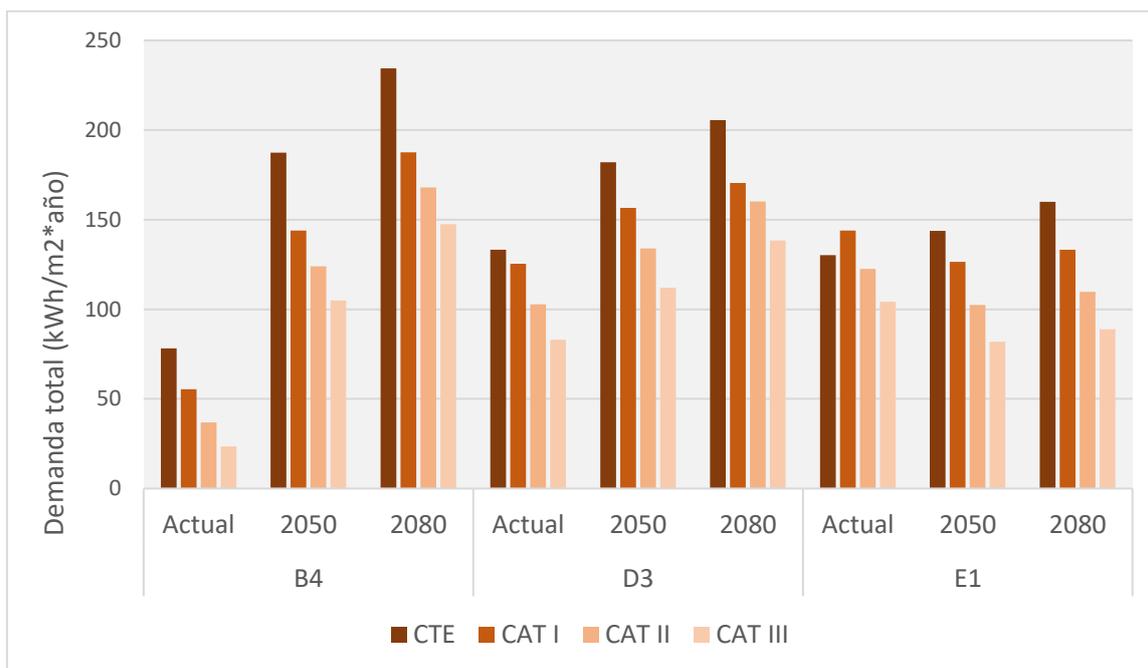


Ilustración 19: Variación de la demanda total en contexto de cambio climático considerando las tres zonas climáticas de estudio

En segundo lugar, se ha realizado el análisis comparativo de los datos de demanda energética anual de refrigeración y calefacción en ambos modelos (CTE y adaptativo), mostrados en la Ilustración 20, y que indican una considerable reducción en la demanda de refrigeración en las tres zonas climáticas de estudio a través del establecimiento de consignas adaptativas siendo, además, resilientes al cambio climático. Sin embargo, en cuanto a la demanda anual de calefacción, no se logra esa reducción en la categoría I con respecto al modelo estático en ninguna de las zonas climáticas, debido principalmente al alto nivel de exigencia que presenta esta categoría.

En la Tabla 12 se muestran los valores de demanda anual de calefacción y refrigeración, representándose en negativo los porcentajes de reducción respecto al modelo estático y en positivo los porcentajes de incremento. En la demanda de calefacción encontramos que la zona B4 para la categoría I presenta el valor más alto de aumento respecto a la demanda obtenida con el CTE de 47% en el escenario actual y 127% en 2080.

En el contexto de cambio climático, la demanda de refrigeración presenta una tendencia incremental debido al aumento de las temperaturas, en las tres zonas climáticas siendo más notable en la zona E1. Por el contrario, se aprecia una disminución en la demanda de calefacción en las tres zonas, alcanzándose en la zona B4 hasta un 95% de reducción para la categoría III entre la actualidad y 2080.

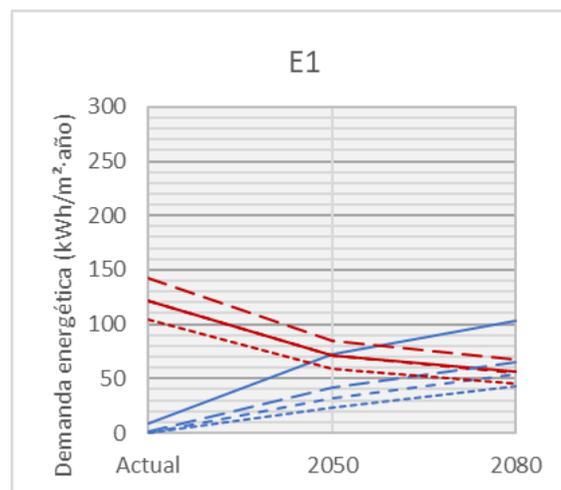
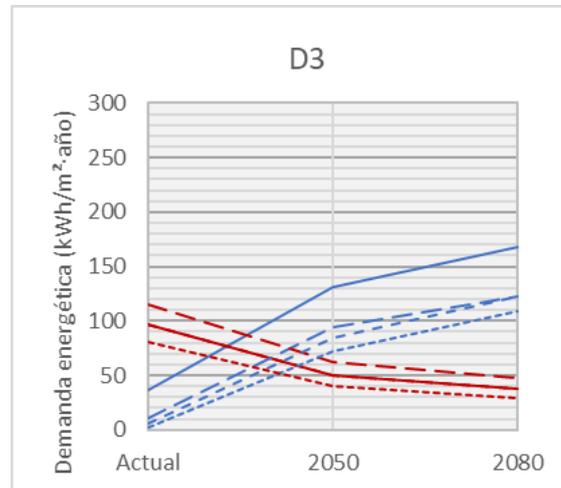
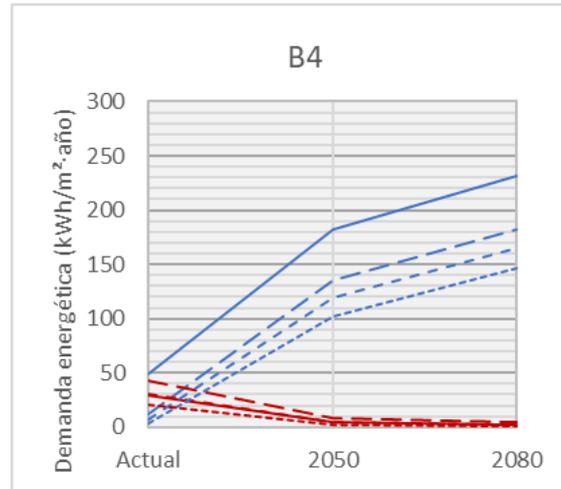


Ilustración 20: Variación de la demanda de calefacción y refrigeración en contexto de cambio climático.

Tabla 12: Porcentaje de variación de demanda de calefacción y refrigeración respecto al CTE

B4	CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN		
	Actual	2050	2080	Actual	2050	2080
CAT I	47%	85%	127%	-75%	-26%	-21%
CAT II	4%	1%	5%	-86%	-35%	-29%
CAT III	-31%	-51%	-58%	-93%	-44%	-37%

D3	CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN		
	Actual	2050	2080	Actual	2050	2080
CAT I	19%	23%	26%	-71%	-28%	-27%
CAT II	0%	-1%	0%	-84%	-36%	-27%
CAT III	-17%	-22%	-23%	-93%	-45%	-35%

E1	CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN		
	Actual	2050	2080	Actual	2050	2080
CAT I	17%	19%	20%	-81%	-42%	-37%
CAT II	0%	0%	-1%	-95%	-57%	-48%
CAT III	-15%	-17%	-19%	-99%	-68%	-58%

8.2. ANÁLISIS DEL CONFORT TÉRMICO A TRAVÉS DE DATOS DE TEMPERATURAS HORARIOS

El programa de simulación DesignBuilder permite extraer datos de temperaturas horarios para el análisis del confort térmico, y en base a estos, se han creado los siguientes gráficos de dispersión. A continuación, procedemos a describir cada uno de los datos que aparecen en la Ilustración 21 y que son clave para su comprensión:

En el eje de ordenadas izquierdo aparece la temperatura interior operativa y, en el eje de abscisas, la temperatura media ponderada exterior. La nube de puntos de color gris muestra la temperatura operativa interior para cada hora de año en base a la temperatura exterior. Las líneas de color naranja representan los límites de confort superior e inferior. En el gráfico inferior, el eje de ordenadas derecho muestra la demanda energética que aparece representada por puntos rojos o azules, dependiendo de si el requerimiento es de calefacción o refrigeración. Dichos puntos se corresponden con aquellas temperaturas interiores que sobrepasan los límites de confort y que por tanto suscitan esa demanda energética para alcanzar la temperatura interior deseada.

Se toma como ejemplo la zona climática B4 en el escenario climático actual. En la parte superior se muestran las temperaturas operativas interiores en oscilación libre tanto para el modelo estático como para el modelo adaptativo con la Cat. II. Por otro lado, los gráficos inferiores representan la demanda de calefacción y refrigeración que se produce al activar

los sistemas de climatización para que la temperatura operativa interior se encuentre dentro de la zona de confort, observando, como ya se expuso en el anterior apartado, una clara reducción de la demanda con el modelo adaptativo.

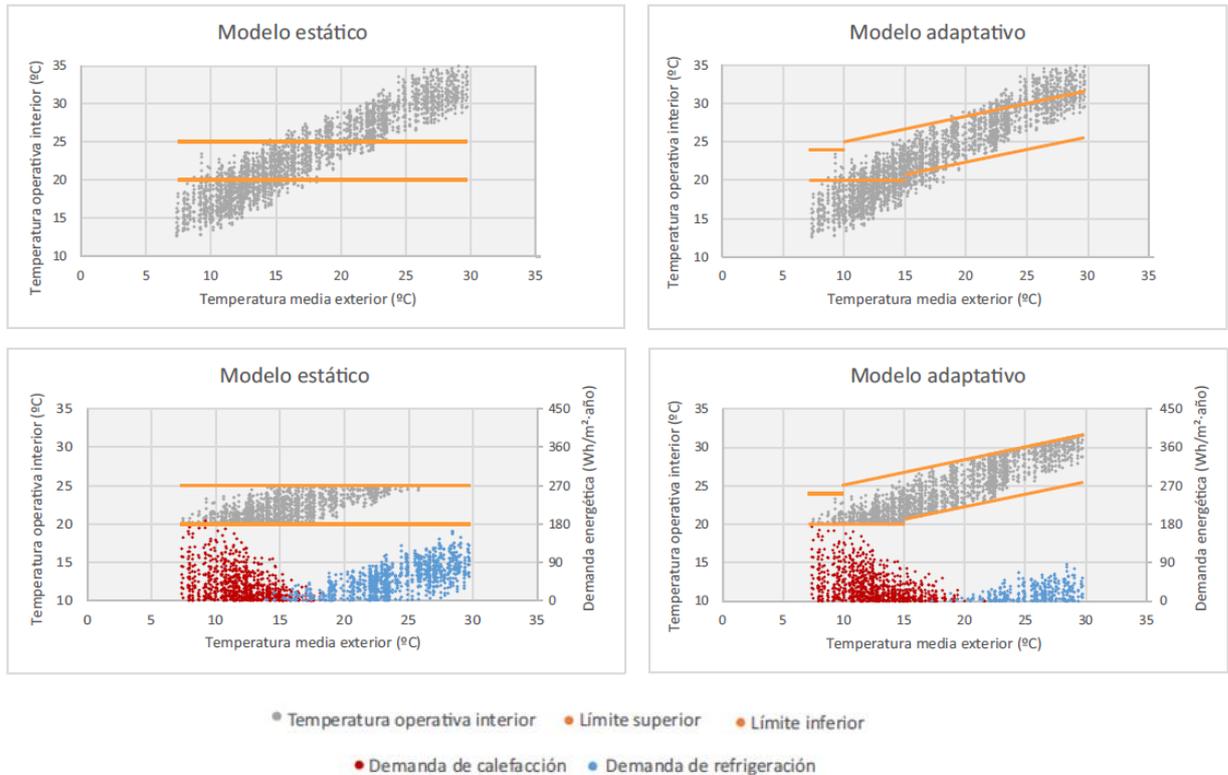


Ilustración 21: Diagrama de dispersión de temperaturas operativas (Oscilación libre - Sistemas de climatización)

Estos mismos gráficos se han elaborado de forma más extendida con el modelo adaptativo para las tres zonas climáticas de estudio en el periodo actual y en el contexto de cambio climático tomándose como escenarios 2050 y 2080 (Ilustraciones 22, 23 y 24). En ellas se grafican los datos de demanda adaptativa de refrigeración y calefacción, así como las temperaturas operativas interiores en base a la temperatura media exterior, además de los límites de aplicabilidad y límites de confort conforme a la norma EN 15251 para la Categoría II, correspondiente a edificios nuevos o renovados. En ellos se hace visible el aumento de la demanda de refrigeración y decremento de la demanda de calefacción para los escenarios climáticos futuros como consecuencia del calentamiento global.

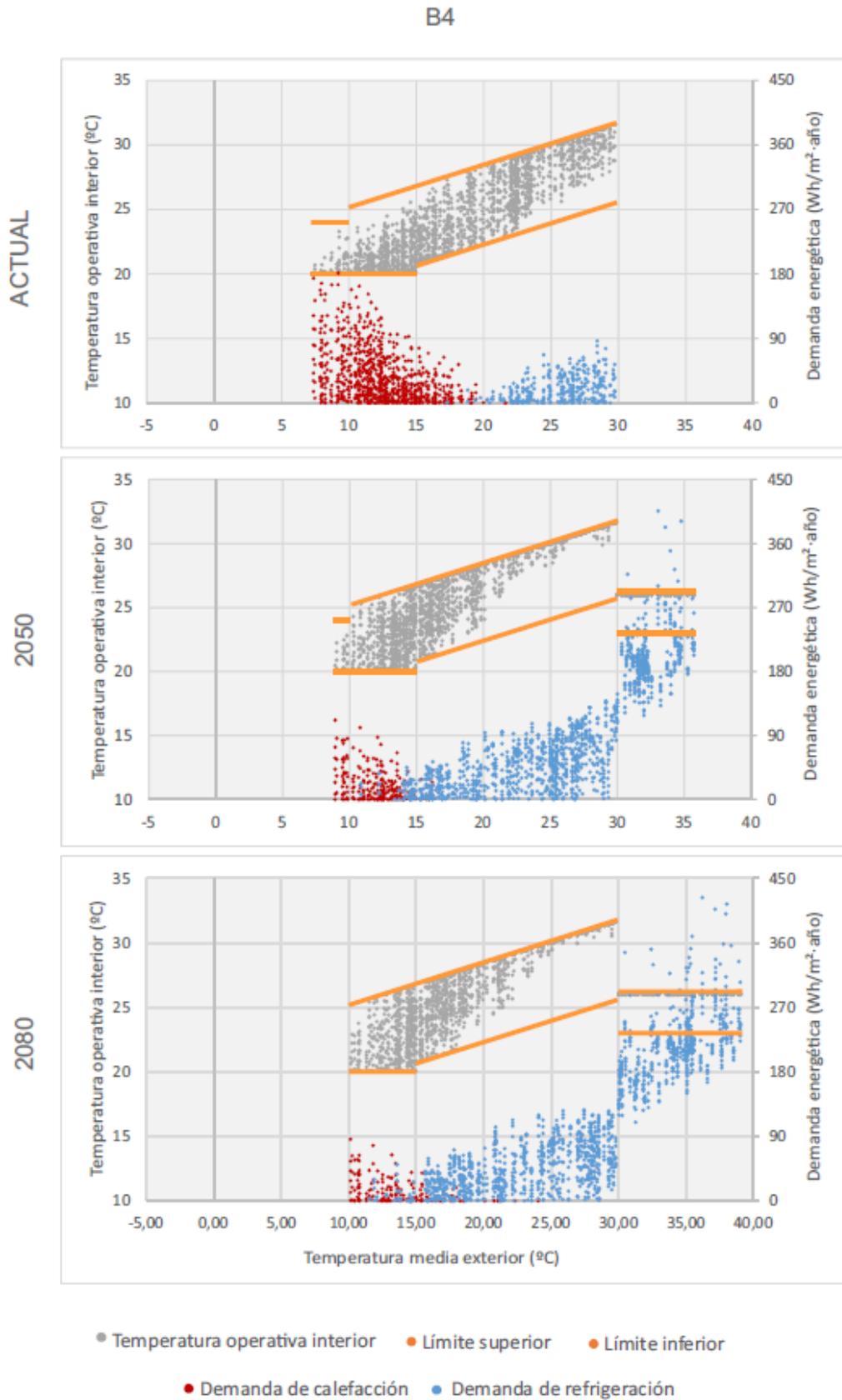


Ilustración 22: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática B4 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.

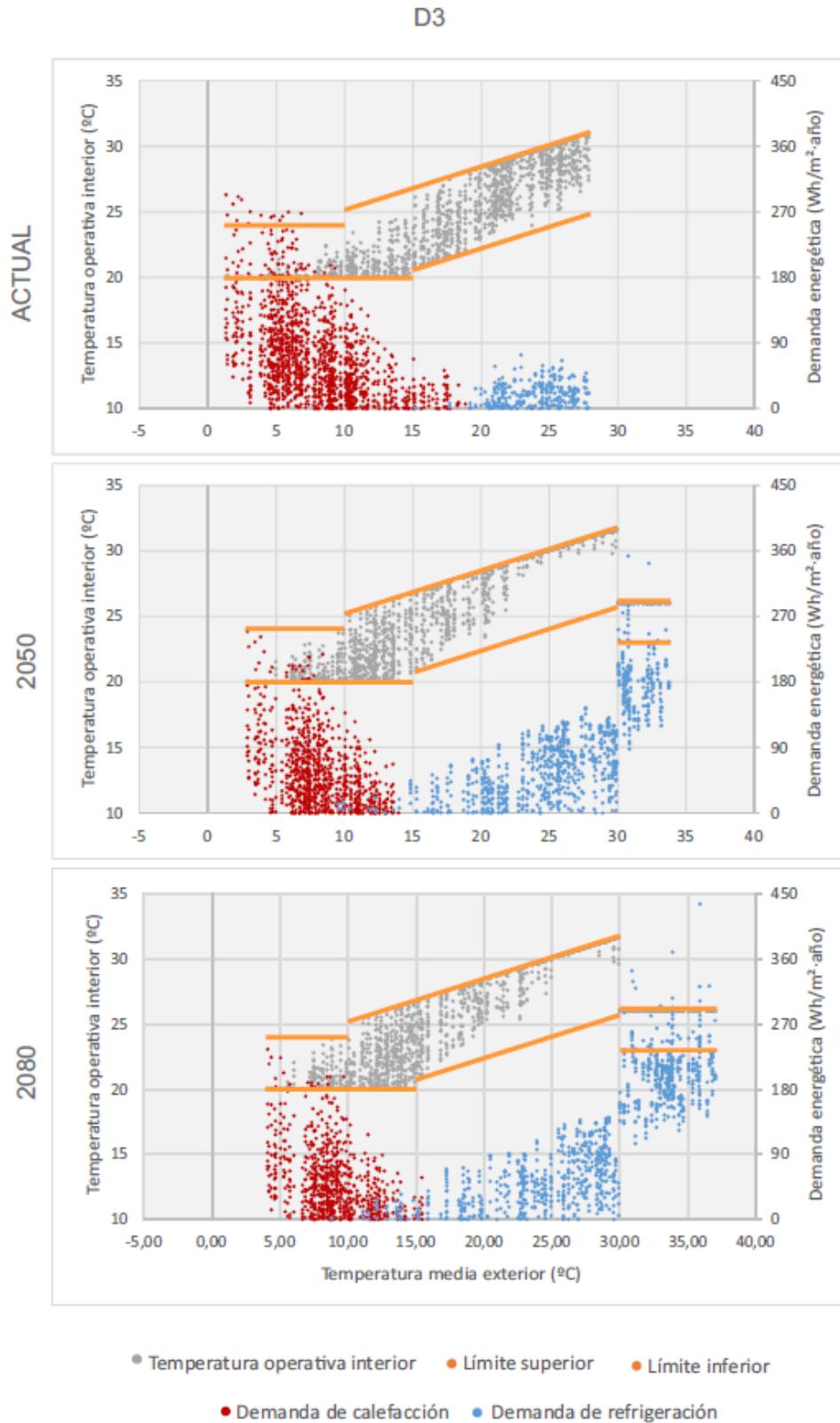


Ilustración 23: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática D3 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.

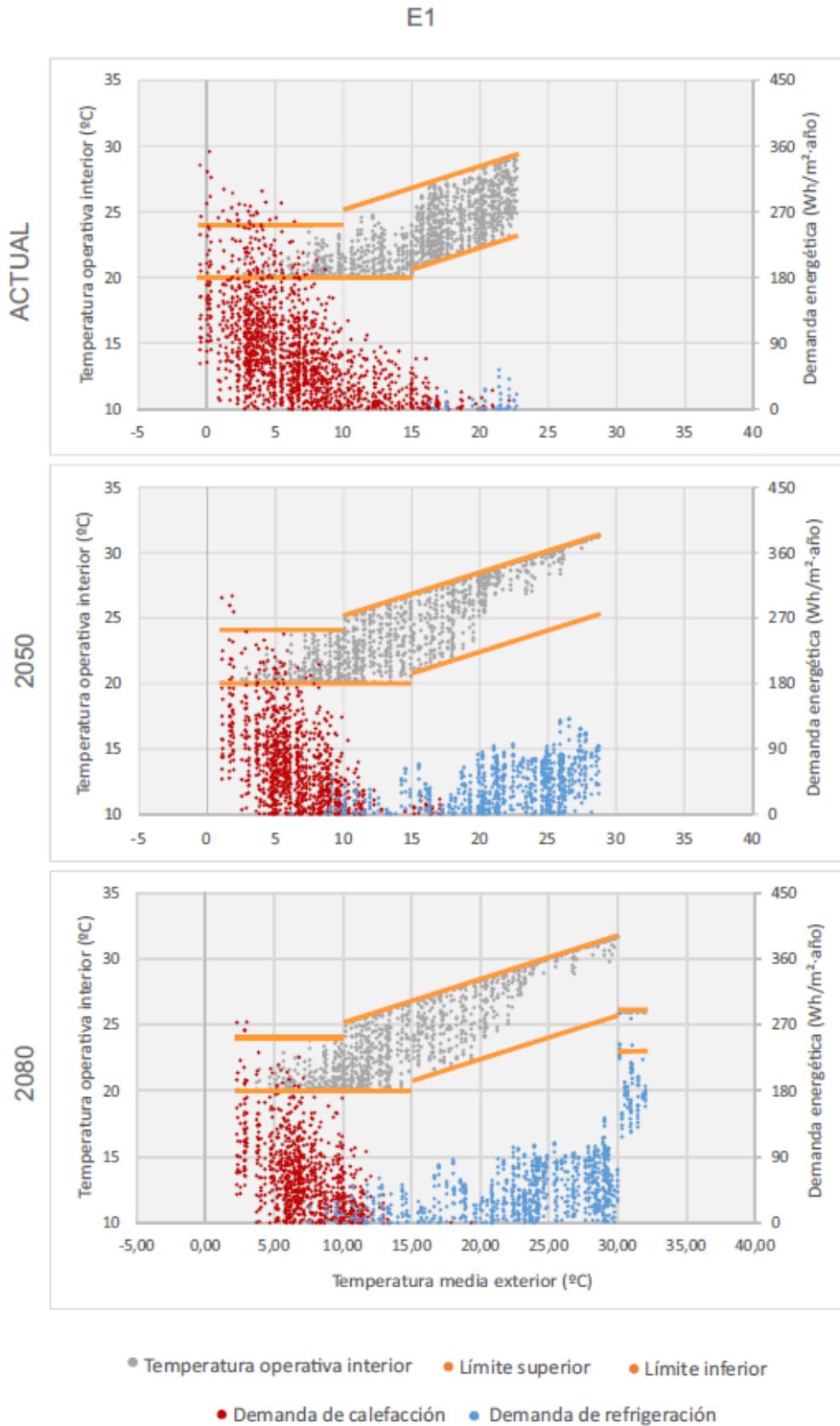


Ilustración 24: Dispersión de puntos de temperatura y demanda para la zona climática E1 en escenario actual y 2050 según EN 15251 Cat. II.

En relación a los gráficos anteriores, se han obtenido los datos relativos a la cantidad de horas de requerimiento o no requerimiento de climatización (Tabla 13) obteniendo así, que la zona climática B4 es la que cuenta con un mayor porcentaje de horas que no requieren climatización.

En el periodo actual, la mayor parte de la demanda se atribuye a calefacción; esto es debido a que existe un alto índice de horas fuera del límite de aplicabilidad, en las que las temperaturas exteriores son inferiores a 10°C. Además, no se alcanza el límite de temperatura operativa interior establecida en 20°C para la Cat.II, siendo la temperatura operativa interior de la zona B4 la que más se acerca a este límite.

La zona D3 es la que presenta un mayor número de horas de requerimiento de climatización por su clima árido-seco con veranos calurosos e inviernos fríos en la que nos encontramos con temperaturas operativas interiores que sobrepasan las temperaturas de consigna superiores en época de refrigeración y que no alcanzan las temperaturas de consigna inferiores en época de calefacción.

Por otro lado, en la Tabla 13, vemos que tendrá mucho más peso el aumento del número de horas de refrigeración que se producirá en 2080, que la reducción del número de horas de calefacción que se producirá en ese periodo.

Tabla 13: Comparación del número de horas de funcionamiento del edificio con requerimiento de calefacción y refrigeración para el escenario actual, 2050 y 2080 según EN 15251 Cat. II.

		B4			D3			E1		
		Horas	%	kWh/m ² *año	Horas	%	kWh/m ² *año	Horas	%	kWh/m ² *año
Actual	Calefacción	807	27.64%	30.17	1338	45.82%	97.00	1488	50.96%	122.07
	No requerimiento	1789	61.27%	--	1288	44.11%	--	1394	47.74%	--
	Refrigeración	324	11.10%	6.77	294	10.07%	5.80	38	1.30%	0.45
2050	Calefacción	228	7.81%	4.87	872	29.86%	49.97	1031	35.31%	70.91
	No requerimiento	1429	48.94%	--	1120	38.36%	--	1150	39.38%	--
	Refrigeración	1263	43.25%	119.09	928	31.78%	83.93	739	25.31%	31.44
2080	Calefacción	170	5.82%	2.39	722	24.73%	38.07	863	29.55%	55.86
	No requerimiento	1310	44.86%	--	1161	39.76%	--	1148	39.32%	--
	Refrigeración	1440	49.32%	165.52	1037	35.51%	121.95	909	31.13%	53.85

8.3. APLICACIÓN A UN CASO REAL: ANÁLISIS DE LA DEMANDA ENERGÉTICA E INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones llevadas a cabo en el modelo real y se compararán con los datos obtenidos con el modelo teórico.

En el estudio realizado con la herramienta de simulación DesignBuilder en el modelo real, hemos obtenido también reducciones en la demanda energética con el establecimiento de temperaturas de consigna adaptativas respecto al modelo estático. Esta reducción es mucho más pronunciada que en el modelo teórico debido a que éste, presenta diferentes cargas internas y diferentes características de la envolvente, siendo la transmitancia del muro de fachada en el modelo real de $0,39 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ frente a los $0,653 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ que presenta el modelo teórico. Además, el modelo real simulado se corresponde con la planta intermedia de un edificio de oficina a diferencia del modelo teórico de una sola planta cuyo suelo se encuentra en contacto con el terreno y la cubierta es adyacente a la estancia objeto de simulación. La reducción que se obtiene en la demanda total en el escenario actual con el modelo real frente al modelo teórico se encuentra entre el 57% y 71%, dependiendo de la categoría.

Centrándonos en el caso real y observando los resultados de demanda energética, se obtiene una reducción del 25%, 44% y 59% para las categorías I, II y III respectivamente con respecto al modelo estático.

A pesar de la diferencia de valores en la demanda, ambos modelos (real y teórico) siguen una tendencia similar atendiendo, además, al calentamiento global como muestra la Ilustración 15.

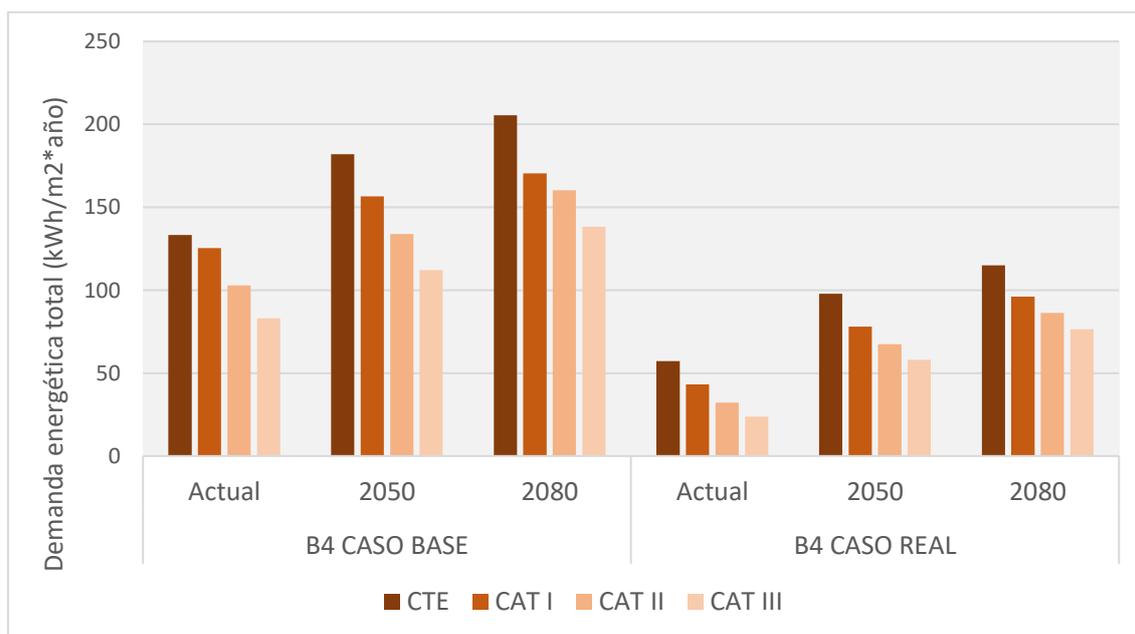


Ilustración 25: Demanda energética total resultado del estudio del caso real y el caso base

Cuando estudiamos por separado la demanda de refrigeración y calefacción en el modelo real, los resultados que se obtienen para el escenario climático actual en particular revelan una reducción respecto al modelo estático en cuanto a la demanda de refrigeración del 33% para la Cat. I, del 49% para la Cat. II y del 61% en la Cat. III. Pero, por otra parte, en la demanda de calefacción solo se consiguen reducciones con respecto al modelo estático para las categorías I y II del 3% y 36% respectivamente y se obtiene un aumento del 44% con la categoría I, debido a que el límite inferior para esta categoría está establecido en 21°C frente a los 20°C que establece el CTE. A continuación, podemos observar estos datos expresados de dos formas: numérica (Tabla 14) y gráfica (Ilustración 26).

Tabla 14: Porcentaje de variación de la demanda de calefacción y refrigeración en el caso real

CASO REAL		CALEFACCIÓN			REFRIGERACIÓN		
		Actual	2050	2080	Actual	2050	2080
Demanda energética (kWh/m ² *año)	CTE	6,35	2,03	1,22	50,92	95,76	113,86
	CAT I	9,13	3,81	2,16	33,99	74,30	94,04
		44%	87%	77%	-33%	-22%	-17%
	CAT II	6,14	2,02	1,10	26,01	65,41	85,26
		-3%	0%	-10%	-49%	-32%	-25%
	CAT III	4,08	1,11	0,53	19,64	56,84	75,92
-36%		-45%	-56%	-61%	-41%	-33%	

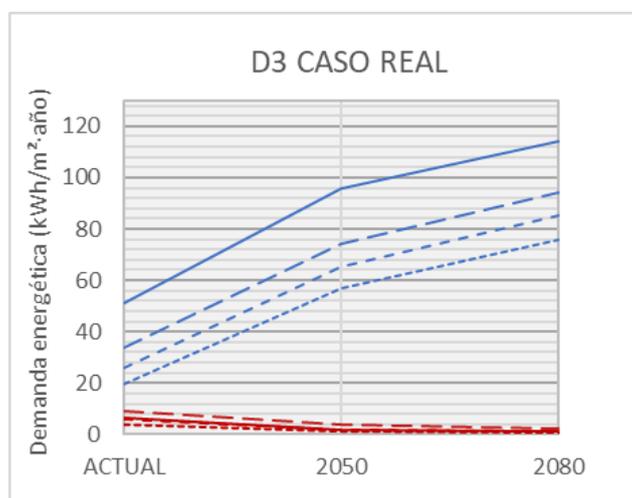


Ilustración 26: Evolución de la demanda de calefacción y refrigeración en el contexto de cambio climático en el caso real

Si realizamos la evaluación para futuros escenarios climáticos, encontramos un aumento de la demanda de refrigeración y una disminución de la demanda de calefacción siendo estas, resilientes al cambio climático. En la categoría II en concreto, se produce una disminución en la demanda de calefacción pronosticada para 2050 respecto al escenario actual del 67% y de un 82% para 2080. El aumento de la demanda de refrigeración alcanza una reducción en esta categoría del 60% en 2050 y del 69% en 2080. Por lo tanto, la reducción en la demanda que se obtiene en calefacción va a ser más notable que el aumento de la demanda necesaria para refrigeración.

Estos resultados demuestran la similitud existente entre ambos casos puesto que, tanto el modelo teórico como el real, siguen la misma tendencia. Por esta razón, consideramos que el modelo teórico puede proporcionar resultados fiables en su aplicación en casos reales.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se muestran los resultados derivados del estudio de la demanda energética en los modelos CTE y EN 15251 realizados en un modelo teórico que representa un edificio de oficinas el cual, ha sido simulado en diferentes zonas climáticas de España (B4, D3 y E1). Además, se ha considerado la influencia del cambio climático, así como el comportamiento de este modelo teórico en un caso real.

Se han obtenidos resultados interesantes ya que se ha logrado probar la aplicabilidad del algoritmo de confort adaptativo y sus considerables reducciones con respecto al modelo basado en consignas estáticas.

Con el modelo adaptativo basado en la norma EN 15251 para la categoría II, se obtiene una reducción de la demanda total con respecto al modelo estático de 5.91% en la zona E1, 22.86% para la zona D3, alcanzando un 52.78% de reducción en la categoría B4 en el período actual. Los resultados, además, muestran que entre un 38% y 62% de las horas de funcionamiento del edificio, no requieren climatización.

Tras el análisis en un contexto de cambio climático, observamos que la demanda total resultante de la aplicación de consignas adaptativas también se reduce con respecto al modelo estático. Por otra parte, si comparamos la evolución de la demanda del periodo actual con escenarios futuros, vemos que existe una tendencia creciente de esta demanda, producto del calentamiento global, por lo que se requieren estudios adicionales con el objeto de conseguir una reducción de la demanda en escenarios futuros. A pesar de la necesidad en esta investigación de la utilización de un modelo simplificado debido a la amplitud de volumen de estudio, se ha conseguido también probar la aceptabilidad en un modelo real, alcanzándose resultados satisfactorios que impulsa la continuación del estudio centrado en perseguir el descenso de la demanda energética.

A pesar de que este trabajo incluye el análisis de escenarios climáticos futuros, hay que tener en consideración que la norma EN 15251 fue elaborada en 2007 y que la base de datos para el uso de este modelo en climas cálidos es limitada. En contraste, se desconoce la adaptabilidad que desarrollará el ser humano a las temperaturas de los años 2050 y 2080. Así, las futuras investigaciones deben buscar la generación de modelos de confort para cada tipo clima en particular para conseguir edificios energéticamente eficientes que se verán influenciadas, entre otros factores, por la adaptabilidad de los ocupantes, las condiciones cambiantes del medio y la eficiencia de los equipos de climatización.

10. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Este trabajo se presenta como un avance de la tesis doctoral. La línea que se plantea parte de la base de que las condiciones climáticas expuestas para la obtención de los límites de confort del estándar EN 15251 aplicado en este estudio corresponden a climas fríos, no habiéndose definido aún ningún estándar que se adecue a condiciones climáticas cálidas. Partiendo de recientes investigaciones, en las que se compararan la influencia del uso de diferentes modelos de confort térmico para edificios de energía zero en climas cálidos (Attia and Carlucci 2015), se pretende crear un nuevo estándar de confort para climas cálidos.

El planteamiento de la norma EN 15251 de que los gráficos del estándar de confort se basan en una base de datos limitadas para temperaturas exteriores superiores a 25°C, se fundamenta en base a los resultados del proyecto SCATs. De todos los países intervinientes en este proyecto, sólo hay datos con estas condiciones para los edificios de Grecia, siendo la mayor parte de la muestra en países con climas más fríos (Ej. Reino unido, Suecia o Francia). Diversos estudios confirman que la aplicabilidad actual de este modelo es limitada y que esta situación se verá agravada en el futuro con el efecto del cambio climático (Sánchez-García et al. 2018).

La línea de temperatura neutra, resultante de la media de las líneas de temperatura de confort ideal de cada país participante en el proyecto SCATs, no resulta objetiva puesto que solo uno de los cinco países sobrepasa la temperatura exterior de 25°C, no ajustándose a la condición de clima frío y el cual, ha sido incluido en esta media como muestra la siguiente ilustración.

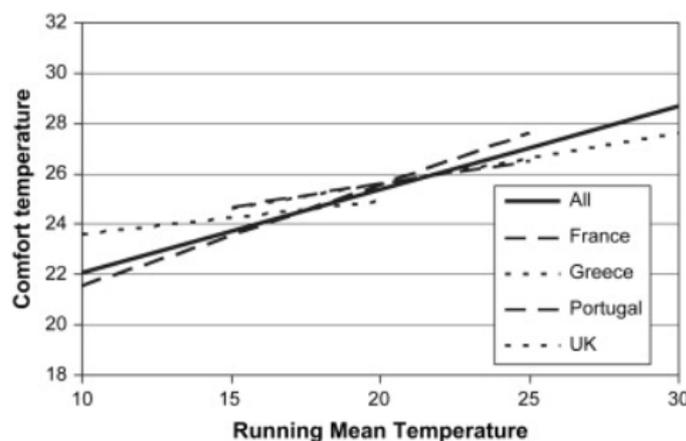


Ilustración 27: Valores de temperaturas neutras de los países del caso de estudio (líneas discontinuas) y valor de temperatura media del proyecto SCATs (línea continua), frente a la temperatura exterior.

En base a lo expuesto anteriormente, se plantea la creación de un nuevo modelo de confort adaptativo en climas cálidos y su estudio en escenarios climáticos futuros teniendo en cuenta que las temperaturas tienden a incrementar por el efecto del cambio climático.

11. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DURANTE EL DESARROLLO DEL TRABAJO

ARTÍCULOS

Sánchez-García, D.; Bienvenido-Huertas, D.; Tristancho-Carvajal, M.; Rubio-Bellido, C. Adaptive Comfort Control Implemented Model (ACCIM) for Energy Consumption Predictions in Dwellings under Current and Future Climate Conditions: A Case Study Located in Spain. *Energies* 2019, 12, 1498. JCR Q2

Sánchez-García, D.; Rubio-Bellido, C.; Tristancho-Carvajal, M.; Marrero Meléndez, M. A comparative study on energy demand through the adaptive thermal comfort approach considering climate change in office buildings of Spain. *JCR Q2 Building Simulation*. Aceptado el 16/05/2019.

Póster de comunicación en el X Congreso Ibérico de Gestión y Planificación de Agua. Coimbra, 6-8 septiembre 2018.

Capítulo de libro "Carbon Footprint- Case Studies". En revisión

PONENCIA

I Jornada Internacional de Eficiencia Energética y Sostenibilidad. Technical Seminary Westminster University & Universidad Sevilla. 29 de abril de 2019

BECAS DE INVESTIGACIÓN

Contrato de iniciación a la investigación en el marco del programa de Garantía Juvenil en apoyo a la I+D+I de la Universidad de Sevilla adjudicado bajo concurso público y financiado por el Fondo Social Europeo.

ASISTENCIA A SEMINARIOS Y CONGRESOS

- Seminario internacional 'Herramienta Interactiva OERCO2: metodologías de cálculo de emisiones de CO2'
- International Symposium on Digital Technologies for Architecture and Construction que tuvo lugar los días 6 y 7 de noviembre de 2018.
- Jornada internacional de eficiencia energética y sostenibilidad. Technical seminary Westminster – Seville universities.
- Jornadas "Integración Educativa Innovadora de la Planificación Urbana Basada en Tecnologías BIM-GIS y Enfocada en los Desafíos de la Economía Circular"

12. REFERENCIAS

- Alexander L, Allen S (2013) IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC
- Anónimo (2014) Consumos, medidas y potenciales ahorros en edificios
- Aparicio-Ruiz P, Barbadilla-Martín E, Salmerón-Lissén JM, Guadix-Martín J (2018) Building automation system with adaptive comfort in mixed mode buildings. *Sustain Cities Soc*. doi: 10.1016/j.scs.2018.07.028
- Araujo C, Bestratén M, Carreras E, et al (2007a) Confort térmico
- Araujo C, Bestratén M, Carreras E, et al (2007b) Confort térmico
- Arets MJP (2004a) Thermische behaaglijkheid: eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen: een nieuwe richtlijn voor thermische behaaglijkheid in (kantoor)gebouwen. ISSO
- Arets MJP (2004b) Thermische behaaglijkheid: eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen: een nieuwe richtlijn voor thermische behaaglijkheid in (kantoor)gebouwen. ISSO
- ASHRAE 55 (2013) ASHRAE Standard 55-2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta GA
- ASHRAE 55 (2017) ANSI/ASHRAE 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Stand 55-2017. doi: 10.1007/s11926-011-0203-9
- Attia S, Carlucci S (2015) Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy Build* 102:117–128. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.05.017
- Attia S, Eleftheriou P, Xeni F, et al (2017) Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy Build*. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.043
- Auliciems A, Szokolay S V. (2007) PLEA Handbook - Thermal comfort. *PLEA Int*. doi: 10.1007/s00484-010-0393-2
- Barbadilla-Martín E, Guadix Martín J, Salmerón Lissén JM, et al (2017a) Assessment of thermal comfort and energy savings in a field study on adaptive comfort with application for mixed mode offices. *Submitt to Energy Build In revisio*: doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.033
- Barbadilla-Martín E, Guadix Martín J, Salmerón Lissén JM, et al (2018) Assessment of thermal comfort and energy savings in a field study on adaptive comfort with application for mixed mode offices. *Energy Build* 167:281–289. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.033
- Barbadilla-Martín E, Salmerón Lissén JM, Martín JG, et al (2017b) Field study on adaptive thermal comfort in mixed mode office buildings in southwestern area of Spain. *Build Environ* 123:. doi: 10.1016/j.buildenv.2017.06.042
- Belcher SE, Hacker JN, Powell DS (2005) Constructing design weather data for future climates. *Build Serv Eng Res Technol*. doi: 10.1191/0143624405bt1120a

- Castejón E (1983) Documentación NTP 74 : Confort térmico - Método de Fanger para su evaluación. Notas Técnicas de Prevención INSHT
- CEN (2007) EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings- addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Eur Comm Stand 3:1–52. doi: 10.1520/E2019-03R13.Copyright
- Chavarria Cosar R (1989) NTP 211: Iluminación de los centros de trabajo. Inst Nac Segur e Hig en el Trab
- Código técnico de la Edificación (2013) Documento básico HE ahorro de energía. In: Doc. básico HE Ahorr. energía
- Colclough S, Griffiths P, Hewitt NJ (2018) Winter Performance of Certified Passive Houses in a Temperate Maritime Climate: nZEB Compliant?
- Crawley DB (2008) Estimating the impacts of climate change and urbanization on building performance. J Build Perform Simul. doi: 10.1080/19401490802182079
- Damiati SA, Zaki SA, Rijal HB, Wonorahardjo S (2016) Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season. Build Environ 109:208–223. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.09.024
- de Dear R, Brager GS (2002) Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision to ASHRAE standards 55,. J Energy Build 34:549–561
- de Dear RJ, Brager GS (1998) Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. In: ASHRAE Transactions
- Diego-Mas JA (2015) Estimación de la tasa metabólica. <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/tasamet/tasamet.php>. Accessed 6 May 2019
- Dino IG, Meral Akgül C (2019) Impact of climate change on the existing residential building stock in Turkey: An analysis on energy use, greenhouse gas emissions and occupant comfort. Renew Energy 141:828–846. doi: 10.1016/j.renene.2019.03.150
- European Commission (2002) Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. Off J Eur Union. doi: 10.1039/ap9842100196
- European Committee for Standardization (2007) EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Brussels, Belgium
- Fanger PO (1967) Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation. ASHRAE Trans 73(2):
- Feist W, Schnieders J, Dorer V, Haas A (2005) Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. Energy Build. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.06.020
- Gálvez Huerta MA, Huerta MAG, Alt. E (2013) Instalaciones y Servicios Técnicos. Madrid: Sección de Instalaciones de Edificios
- Godoy Muñoz A (2012) El confort térmico adaptativo. Aplicación en la edificación en

España

- Guan L (2012) Energy use, indoor temperature and possible adaptation strategies for air-conditioned office buildings in face of global warming. *Build Environ.* doi: 10.1016/j.buildenv.2011.11.013
- Gupta R, Gregg M (2012) Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. *Build Environ.* doi: 10.1016/j.buildenv.2012.01.014
- Holmes MJ, Hacker JN (2007) Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century. *Energy Build* 39:802–814. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.009
- Houghton FC, Yagloglou C (1923) Determination of the comfort zone. *ASHVE Trans* 29
- Hoyt T, Arens E, Zhang H (2014) Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Build Environ.* doi: 10.1016/j.buildenv.2014.09.010
- ISO (2005) ISO 7730:2007 Ergonomics of the thermal environment. English
- Jentsch MF, Bahaj AS, James PAB (2013) CCWorldWeatherGen, Climate change world weather file generator, Version 1.8. *Sustain Energy Res Gr*
- Kolokotsa D, Tsiavos D, Stavrakakis GS, et al (2001) Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings' occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction. *Energy Build.* doi: 10.1016/S0378-7788(00)00098-0
- Kramer RP, Maas MPE, Martens MHJ, et al (2015a) Energy conservation in museums using different setpoint strategies: A case study for a state-of-the-art museum using building simulations. *Appl Energy* 158:446–458. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.044
- Kramer RP, Maas MPE, Martens MHJ, et al (2015b) Energy conservation in museums using different setpoint strategies: A case study for a state-of-the-art museum using building simulations. *Appl Energy* 158:446–458. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.044
- Kwong QJ, Adam NM, Sahari BB (2014) Thermal comfort assessment and potential for energy efficiency enhancement in modern tropical buildings: A review. *Energy Build.*
- Luna P (1999) NTP 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT. *Inst Nac Segur e Hig en el Trab*
- Luo M, Wang Z, Brager G, et al (2018) Indoor climate experience, migration, and thermal comfort expectation in buildings. *Build Environ* 141:262–272. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.05.047
- Ministerio de Industria Energía y Turismo (2015) Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios
- Ministerio de la Presidencia (2007) RITE 2007. Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios. *Bol Of del estado.* doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Mondelo PR, Gregori Torada E, Comas Úriz S (2000) Ergonomía 2: confort y estrés térmico. *Universitat Politècnica de Catalunya*
- Morgan CA, de Dear R (2002) Climate Clothing and adaptation in the built environment. *Indoor Air* 98–103
- Nicol F, Humphreys M (2010) Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in

- free-running buildings in European standard EN15251. *Build Environ* 45:11–17. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2008.12.013
- Nicol JF, Humphreys MA (1973) THERMAL COMFORT AS PART OF A SELF-REGULATING SYSTEM. *Build Res Pr*. doi: 10.1080/09613217308550237
- Nikolopoulou M, Steemers K (2003) Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. In: *Energy and Buildings*
- Parsons KC (2002) The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy Build* 34:593–599. doi: 10.1016/S0378-7788(02)00009-9
- Pérez-Fargallo A, Rubio-Bellido C, Pulido-Arcas JA, Javier Guevara-García F (2018a) Fuel Poverty Potential Risk Index in the context of climate change in Chile. *Energy Policy* 113:157–170. doi: 10.1016/j.enpol.2017.10.054
- Pérez-Fargallo A, Rubio-Bellido C, Pulido-Arcas JA, Javier Guevara-García F (2018b) Fuel Poverty Potential Risk Index in the context of climate change in Chile. *Energy Policy*. doi: 10.1016/j.enpol.2017.10.054
- Pérez-Fargallo A, Rubio-Bellido C, Pulido-Arcas JA, Trebilcock M (2017) Development policy in social housing allocation: Fuel poverty potential risk index. *Indoor Built Environ* 26:. doi: 10.1177/1420326X17713071
- RD 314/2006 (2006) Proyecto de Real Decreto por el que se modifica el RD 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación Versión para trámite de audiencia e información pública. 1. 1–43
- Rijal HB, Tuohy P, Humphreys MA, et al (2007) Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. *Energy Build* 39:823–836. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.02.003
- Robert A, Kummert M (2012) Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Build Environ*. doi: 10.1016/j.buildenv.2011.12.014
- Roshan GR, Oji R, Attia S (2019) Projecting the impact of climate change on design recommendations for residential buildings in Iran. *Build Environ*. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.053
- Rubio-Bellido C, Pérez-Fargallo A, Pulido-Arcas JA (2016) Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile. *Energy*. doi: 10.1016/j.energy.2016.08.021
- Sánchez-García D, Rubio-Bellido C, del Río JJM, Pérez-Fargallo A (2019) Towards the quantification of energy demand and consumption through the adaptive comfort approach in mixed mode office buildings considering climate change. *Energy Build*. doi: 10.1016/j.enbuild.2019.02.002
- Sánchez-García D, Rubio-Bellido C, Marrero Meléndez M, et al (2017) El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Hábitat Sustentable* 7:06-17
- Sánchez-García D, Rubio-Bellido C, Pulido-Arcas JA, et al (2018) Adaptive comfort models applied to existing Dwellings in Mediterranean climate considering globalwarming. *Sustain*. doi: 10.3390/su10103507
- Sánchez-Guevara Sánchez C, Mavrogianni A, Neila González FJ (2016) On the minimal

- thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty. *Build Environ* 114:344–356. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.029
- Sánchez-Guevara Sánchez C, Mavrogianni A, Neila González FJ (2017) On the minimal thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty. *Build Environ* 114:344–356. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.029
- Sánchez CS-G, González FJN, Aja AH (2018) Energy poverty methodology based on minimal thermal habitability conditions for low income housing in Spain. *Energy Build*. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.03.038
- Spyropoulos GN, Balaras CA (2011) Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches - A case study. *Energy Build* 43:770–778. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.015
- The United Nations Environment Programme (UNEP) (2012) *Building Design and Construction: Forging Resource Efficiency and Sustainable*. Nairobi, Kenya
- UE (2010) Directiva 2010/31/UE. Ue. doi: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:PT:PDF>
- van der Linden AC, Boerstra AC, Raue AK, et al (2006) Adaptive temperature limits: A new guideline in the Netherlands: A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy Build* 38:8–17. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.02.008
- Van Der Linden AC, Boerstra AC, Raue AK, et al (2006) Adaptive temperature limits: A new guideline in the Netherlands: A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy Build* 38:8–17. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.02.008
- Wan KKW, Li DHW, Lam JC (2011) Assessment of climate change impact on building energy use and mitigation measures in subtropical climates. *Energy* 36:1404–1414. doi: 10.1016/j.energy.2011.01.033
- Yun GY, Lee JH, Steemers K (2016) Extending the applicability of the adaptive comfort model to the control of air-conditioning systems. *Build Environ* 105:13–23. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.027

