



EL CONTROL ADAPTATIVO EN INSTALACIONES EXISTENTES Y SU POTENCIAL EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO.

ADAPTIVE CONTROL IN EXISTING FACILITIES AND ITS POTENTIAL IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

DANIEL SÁNCHEZ-GARCÍA
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
sangardaniel@gmail.com

CARLOS RUBIO-BELLIDO
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
carlos.rubio.bellido@gmail.com

MADELYN MARRERO MELÉNDEZ
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
madelyn@us.es

FRANCISCO JAVIER GUEVARA-GARCÍA
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
guevara@us.es

JACINTO CANIVELL
Universidad de Sevilla
Sevilla, España
jacanivell@us.es

RESUMEN

En la actualidad, la mayoría de los edificios de oficinas tienen un elevado consumo energético provocado principalmente por el uso de los sistemas de HVAC, en los que se logra el confort térmico sin considerar las implicaciones energéticas. El objetivo de la investigación que aquí se expone es reducir la demanda y consumo energético, manteniendo altos niveles de confort térmico adaptativo, en base a la aplicación de temperaturas de consigna adaptativas calculadas según la norma EN 15251, como también identificar el potencial de estos procedimientos en el contexto del cambio climático de los años 2020, 2050 y 2080.

Para ello, se desarrolla una metodología que contempla fases de (1) recopilación de datos; (2) trabajo de campo –monitoreo de las temperaturas del edificio y realización de encuestas de confort térmico–; (3) validación del modelo de simulación, en base a temperatura, voto medio predictivo (PMV) y consumo energético; (4) simulaciones; y (5) obtención de resultados. Como aplicación del método se selecciona un edificio de reciente construcción en Sevilla (España) que cumple la normativa vigente. Los resultados muestran reducciones muy importantes en la demanda y consumo energético, con valores entre 52% y 63% y entre 51% y 61%, respectivamente, dependiendo del escenario climático analizado.

Palabras clave

confort adaptativo, cambio climático, demanda energética, temperatura de consigna

ABSTRACT

Currently, energy consumption is high in most office buildings mainly due to the use of HVAC systems, which achieve thermal comfort without considering the energy implications. The objectives of this research are to reduce energy demand and consumption while maintaining high levels of adaptive thermal comfort, based on the application of adaptive setpoint temperatures calculated according to CEN Standard EN 15251, and to identify the potential of these procedures for the years 2020, 2050 and 2080, in the context of climate change. To that end, a five-stage methodology was carried out, which consisted of: (1) data collection; (2) field work involving monitoring building temperature and conducting thermal comfort surveys; (3) validation of the simulation model, according to temperature, Predicted Mean Vote (PMV), and energy consumption; (4) simulations; and (5) results. The method was implemented in a recently constructed building in Seville (Spain) that complies with current regulations. The results reveal important reductions in energy demand and consumption, with values between 52% and 63%, and between 51% and 61%, respectively, depending on the climate scenario analyzed.

Keywords

adaptive comfort, climate change, energy demand, setpoint temperature

INTRODUCCIÓN

En el año 2010, los edificios usaron el 32% de la energía primaria global final y, a la vez, generaron el 19% de las emisiones globales, contabilizando las emisiones originadas por la energía producida para su consumo en dicho sector (Lucon *et al.*, 2014). Es de conocimiento general que existe una necesidad de reducir las emisiones de CO₂ al ambiente de forma global, cuya urgencia se acentúa al aproximarnos al año 2020, cuando finaliza el plazo para la consecución de los objetivos establecidos en el Paquete de medidas sobre energía y clima hasta 2020 (European Commission, 2008), ampliados en enero de 2014 en valor y plazo en base al Marco sobre energía y clima para 2030 (European Commission, 2014).

Por otra parte, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) (Gobierno de España, 2007) establece unas temperaturas de consigna muy restrictivas (21-23°C en invierno y 23-25°C en verano), que aseguran el confort térmico sin considerar los altos consumos energéticos, mientras que no existe normativa nacional que regule el confort en edificios sin medios mecánicos.

Según datos extraídos del Instituto Nacional de Estadística español, el 30% de los edificios de oficinas fue construido tras la entrada en vigor del RITE y el 55%, tras el Código Técnico de la Edificación (CTE) (Gobierno de España, 2006). De esta forma, se puede observar que una gran proporción de edificios de oficinas no necesitan rehabilitación energética y disponen de unas instalaciones relativamente recientes. Así, para reducir la demanda energética, una de las soluciones factibles es intervenir sobre las instalaciones existentes mediante la variación de las temperaturas de consigna.

Existen estudios en los que se cuantificó la reducción en la demanda por la simple variación de las temperaturas de consigna de calefacción y refrigeración: al ajustarlas a 20°C y 26°C, respectivamente, se obtuvo una reducción en el consumo energético del 45% (Spyropoulos y Balaras, 2011), y al hacerlo a 18.3 y 27.8°C, respectivamente, se consiguió una reducción en el consumo de entre el 32 y 73% en función de la zona analizada (Hoyt, Arens y Zhang, 2014). También se han llevado a cabo investigaciones que aplican modelos de confort adaptativo, entre las que se ha utilizado como temperatura de consigna de calefacción el límite inferior de confort de un modelo desarrollado para los Países Bajos (Van Der Linden *et al.*, 2006), establecido en la norma ISSO 74 (ISSO, 2004), lográndose una reducción del consumo de un 74% (Kramer *et al.*, 2015). Otro estudio aplicó el modelo de ASHRAE Standard 55-2013, obteniendo un valor máximo de reducción en demanda de calefacción y refrigeración de 20% y 80%, respectivamente, (Sánchez-Guevara, Mavrogianni y Neila González, 2016) y considerando que los límites variaban cada 30 días, por lo que se establecieron 12 consignas, una para cada mes del año.

El presente trabajo establece un modelo mucho más ajustado, en el que la temperatura promedio exterior de funcionamiento varía diariamente en base a los 7 días previos. Este método se contempla en ASHRAE 55-2013 y EN 15251 (CEN, 2007).

El edificio analizado se encuentra ubicado en la provincia de Sevilla, que posee clima de categoría Csa, según la clasificación de Koppen-Geiger, caracterizado por inviernos húmedos y suaves, y veranos secos y muy cálidos, producto de lo cual resulta de especial interés el efecto del calentamiento global sobre este clima. De esta forma, se estudian los escenarios climáticos de los años 2020, 2050 y 2080 con el objeto de analizar las implicaciones del modelo de confort adaptativo en el contexto del cambio climático para profundizar en la capacidad de aplicabilidad y ahorro energético, considerando este modelo. Existe la necesidad de estudiar la resiliencia del confort térmico de las personas al calentamiento global, el que podría incrementar los niveles de confort en climas y estaciones frías (Rubio-Bellido, Pulido-Arcas y Ureta-Gragera, 2015), aunque estos efectos no se pueden considerar beneficiosos, ya que conllevan perjuicios más severos en otros ámbitos, entre ellos, el impacto en los ecosistemas. Asimismo, es preciso adoptar medidas para mitigar los efectos del cambio climático, desde la consideración del calentamiento global en la fase de diseño (Rubio-Bellido, Pérez-Fargallo, y Pulido-Arcas, 2016) hasta la implementación de espacios verdes (Tumini y Rubio-Bellido, 2016).

OBJETIVO

El objetivo principal de esta investigación consiste en la cuantificación del ahorro energético mediante el establecimiento de temperaturas de consigna adaptativas, en la actualidad y su proyección futura, considerando el cambio climático. Estas temperaturas se consignan de forma diaria según los criterios de confort adaptativo de la norma EN 15251. Este estudio pretende introducir el concepto de demanda y consumo energético adaptativo (Medida de Ahorro Energético 1, en adelante MAE1), frente al de demanda y consumo energético tradicional, denominado como Medida de Ahorro Energético 0 (en adelante MAE0), basado en modelos de confort con consignas estáticas.

CONFORT TÉRMICO

El confort térmico presenta fundamentalmente dos enfoques: los modelos de confort con consignas estáticas, basados en estudios de Fanger (1970), cuyo referente es la norma ISO 7730 (ISO, 2005), y los modelos de confort adaptativos, donde se destacan las normas ASHRAE Standard 55-2013 y las EN 15251. La principal diferencia entre ellos reside en que en los modelos de confort con

consignas estáticas el ambiente térmico se diseña para su acondicionamiento mediante medios mecánicos, con independencia del ambiente exterior, tomando al ocupante como un receptor de estímulos térmicos; mientras que los modelos de confort adaptativos tienen en cuenta la adaptación del sujeto a las variaciones de temperaturas mediante la ventilación natural y los cambios en su conducta, índice metabólico y arropamiento.

El modelo establecido por la norma EN 15251 se ha desarrollado a partir del proyecto Smart control and thermal comfort (SCATs). A través de ese proyecto, fue posible desarrollar el algoritmo de confort adaptativo (McCartney y Nicol, 2002). Este modelo se puede aplicar en edificios de viviendas, oficinas u otros similares utilizados para ocupación humana, con actividades sedentarias, correspondiendo a valores entre 1 y 1,3 met, con ventanas operables, en los que los ocupantes puedan adaptar su vestimenta a las condiciones térmicas exteriores y/o interiores, para valores entre 0,5 y 1 clo.

En la Figura 1 se representan los límites superiores e inferiores para cada categoría, en función de la temperatura interior operativa ($\theta_{i,o}$) y de la temperatura exterior promedio de funcionamiento (θ_{rm}), de forma que se establecen las categorías I, II y III, en función de las necesidades de los ocupantes. Este modelo es de aplicación cuando la temperatura ponderada exterior de funcionamiento está entre 10°C y 30°C para el límite superior, y entre 15°C y 30°C para el límite inferior. En aquellos momentos en los que dicha temperatura ha superado los límites, se ha tomado la temperatura marcada por tales límites, correspondiente a la más restrictiva dentro de la aplicabilidad.

En este estudio se aplica la categoría III, cuyas fórmulas

para el cálculo de los límites de confort se muestran a continuación:

$$\theta_{i,máx} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 4$$

$$\theta_{i,mín} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 4$$

Donde $\theta_{i,máx}$ es el límite superior, $\theta_{i,mín}$ es el límite inferior, y θ_{rm} es la temperatura exterior promedio de funcionamiento del día para la cual se calculan los límites de confort, mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

θ_{rm-1} es la temperatura exterior promedio de funcionamiento del día anterior

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

θ_{ed-2} es la temperatura promedio exterior diaria de dos días antes, y así sucesivamente;

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

La propuesta aquí expuesta se basa sustancialmente en dos estudios previos. En el primero de ellos, se calcularon los niveles de confort térmico según ASHRAE Standard 55-2013 y EN 15251, en una vivienda que no incluía aislamiento térmico en su envolvente (Sánchez-García, Sánchez-Guevara y Rubio-Bellido, 2016), y se concluyó que, a pesar de que las temperaturas de verano de Sevilla son muy severas, la mayoría de las horas de malestar térmico tenían lugar en el periodo invernal. En el segundo estudio, se continuó la investigación evaluando el efecto que tendría el cambio climático sobre el confort adaptativo (Sánchez-García et al., 2017), y se mostró que las temperaturas eran capaces de aumentar tanto que podían exceder en gran proporción los límites superiores de confort y de aplicabilidad, por lo que la ventilación natural no era suficiente para alcanzar el confort térmico. En consecuencia, tanto la actual aplicabilidad como la potencialidad del modelo de confort adaptativo EN 15251 son limitadas.

METODOLOGÍA

Con el fin de cumplir el objetivo señalado, se ha llevado a cabo una metodología (Figura 2) basada en las etapas que se muestran, de forma pormenorizada, en los siguientes apartados.

RECOPIACIÓN DE DATOS.

En esta etapa se recogen datos acerca de las propiedades de los sistemas constructivos, de la hipótesis de operación y del sistema de climatización. La fachada, compuesta por piezas prefabricadas de GRC, una cámara de aire sin ventilar, aislamiento térmico de lana de roca y

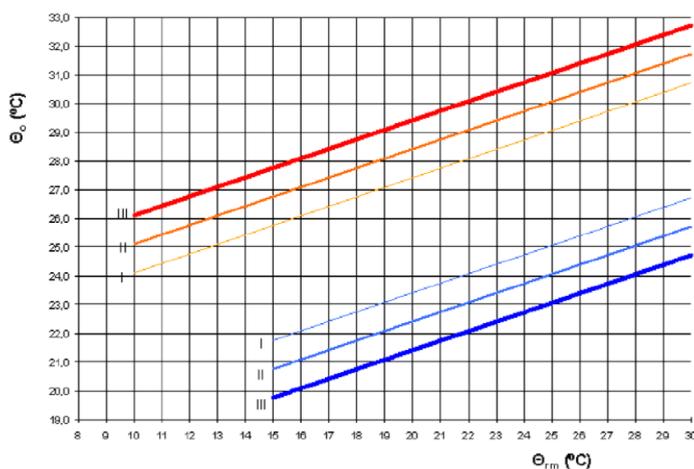


Figura 1. Límites de confort de categorías I, II y III. Fuente: EN 15251.

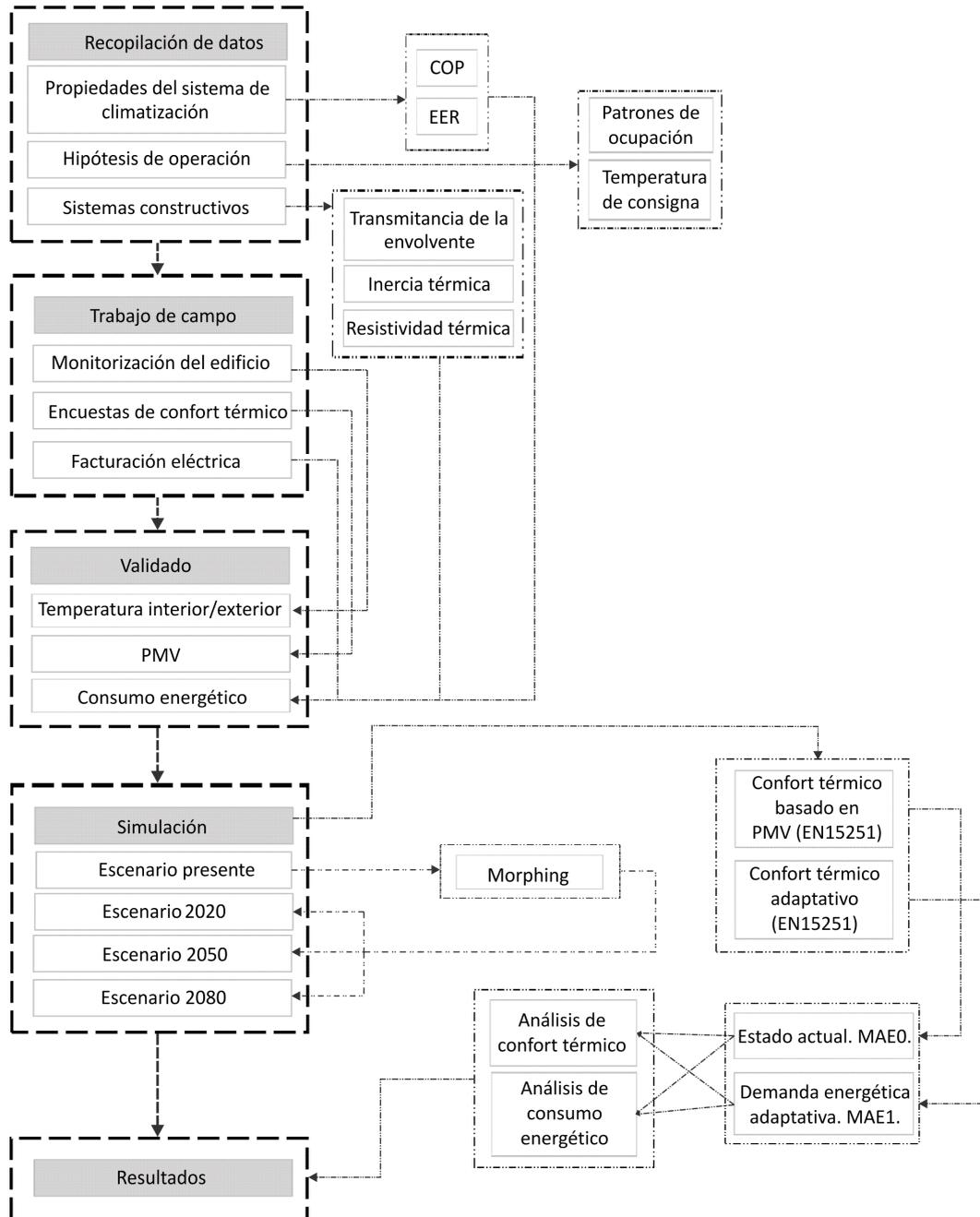


Figura 2. Procesos y subprocesos llevados a cabo en la metodología. Fuente: Elaboración los autores.



Figura 3. Sensor exterior (izquierda), interior en planta acondicionada (centro) y no acondicionada (derecha). Fuente: Elaboración los autores.

revestimiento interior con panel de yeso laminado, tiene una transmitancia térmica de $0.76 \text{ W/m}^2\text{K}$; las ventanas tienen vidrios 6+12+6, de $2.82 \text{ W/m}^2\text{K}$ y con marcos de aluminio de $4.72 \text{ W/m}^2\text{K}$. El horario de trabajo es de 9:00 a 14:00 y de 16:00 a 19:00, durante el cual las instalaciones permanecen en funcionamiento, y las temperaturas de consigna de calefacción y refrigeración son, respectivamente, 23°C y 25°C . Las cargas internas para la planta ocupada son constantes durante todo el horario de funcionamiento, siendo éstas: iluminación $16,00 \text{ W/m}^2$, ocupación $6,00 \text{ W/m}^2$ y equipamiento $4,5 \text{ W/m}^2$. El sistema de climatización es un sistema VRV, con valores de EER y COP de 4.42 y 4.95, respectivamente.

TRABAJO DE CAMPO

En esa fase se llevó a cabo la monitorización de las temperaturas horarias del edificio, desde el día 29/11/2016 al 20/06/2017, con un total de 14616 registros. Estas temperaturas fueron recogidas por sensores térmicos, colocados en el exterior y en el interior en plantas acondicionada y no acondicionada (no ocupada) (Figura 3). Para conocer la sensación térmica de los ocupantes, se llevó a cabo una encuesta de confort térmico, tomando como base el modelo de encuesta de ASHRAE Standard

55-2013, realizado en sesiones en invierno, primavera y verano a través de Google Formularios, con un total de 27 encuestas realizadas. Además, se obtuvieron datos reales del consumo energético del edificio mediante facturas eléctricas proporcionadas por los ocupantes. Estos datos fueron recogidos para que, en la siguiente fase de validado, pudieran ser contrastados con los datos simulados, los cuales se obtuvieron de forma provisional para poder llevar a cabo el validado, y no en concepto de resultado de la simulación energética, que tiene lugar en la fase (4).

VALIDADO

El validado, que se muestra en la Tabla 1, en base a las temperaturas exterior e interior, se ha llevado a cabo siguiendo las recomendaciones de la norma ASHRAE Guideline 14-2014 (ANSI/ASHRAE), y habiendo comprobado que todos los errores quedan dentro de los márgenes establecidos por dicha normativa (Mean Bias Error (MBE) $< \pm 10\%$; Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV(RMSE)) $< 30\%$). Además, en la misma tabla se muestran los resultados de la validación en base al PMV y al consumo energético anual.

Temperatura	Temperatura	MBE	CV(RMSE)
	Exterior	7.40%	21.88%
	Interior acondicionada	-3.17%	8.71%
PMV	Interior no acondicionada	1.42%	8.99%
	PMV	Medido	Simulado
	Invierno	-0.27	0.03
	Primavera	-0.09	0.35
Consumo energético	Verano	0.4	0.5
	Consumo energético	Medido (kWh/año)	Simulado (kWh/año)
	Año 2015	365,683	334,408
	Año 2016	356,086	

Tabla 1. Validación del modelo de simulación. Fuente: Elaboración los autores.

	Escenario	MAE	Refrigeración	Calefacción	Climatización			
	Demanda energética (kWh/m ² -año)	Presente	0	55,80	-	26,68	-	82,48
	Presente	1	23,53	-58%	6,88	-74%	30,41	-63%
		2020	0	65,71	-	21,58	-	87,29
	2020	1	29,13	-56%	4,51	-79%	33,64	-61%
		2050	0	79,37	-	14,57	-	93,94
	2050	1	37,67	-53%	2,19	-85%	39,86	-58%
		2080	0	96,77	-	8,78	-	-
	2080	1	49,82	-49%	1,24	-86%	51,06	-52%
		Escenario	MAE	Refrigeración	Calefacción	Climatización		
	Presente	0	15,01	-	3,02	-	18,03	-
		1	6,03	-60%	1,04	-66%	7,07	-61%
	2020	0	17,10	-	2,49	-	19,59	-
		1	7,25	-58%	0,73	-71%	7,98	-59%
	2050	0	20,26	-	1,71	-	21,97	-
		1	9,27	-54%	0,42	-75%	9,69	-56%
	2080	0	24,42	-	1,06	-	25,48	-
		1	12,31	-50%	0,29	-73%	12,60	-51%

Tabla 2. Resultados de la simulación energética. Fuente: Elaboración de los autores.

SIMULACIÓN

Las simulaciones se realizaron mediante el software Designbuilder, con motor de cálculo Energy Plus, efectuando cálculos horarios a lo largo del año. Con la finalidad de simular en los escenarios futuros, se llevó a cabo un proceso de *morphing* mediante el software CCWorldWeatherGen, desarrollado por Jentsch et al. (2013), en base a los estudios de Belcher, Hacker y Powell (2005). Este software transforma el archivo EPW presente, procedente del Departamento de Energía de los Estados Unidos, para proyecciones futuras del escenario de gases de efecto invernadero A2, estimado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) como "medium-high". El programa contempla la combinación de las pautas de predicción A2a, A2b y A2c del Met Office Hadley Centre Coupled Model 3, considerando los desvíos. Los datos de salida son 3 archivos EPW con los climas transformados para los años 2020, 2050 y 2080, bajo el escenario de emisiones A2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 y Figura 4, se grafican los resultados de demanda y consumo de refrigeración, calefacción y climatización (correspondiente a la suma aritmética de calefacción y refrigeración). En éstas se puede observar la Medida de Ahorro Energético 0 (MAE0), correspondiente al estado actual de edificio, con las temperaturas de consigna que utiliza actualmente, y la Medida de Ahorro Energético 1 (MAE1), tras establecer las temperaturas de consigna adaptativas. Se muestran en negativo los porcentajes de reducción respecto al valor de referencia y en positivo los porcentajes de incremento. Como se puede observar, con la aplicación de la MAE1 se consiguen reducciones significativas de demanda energética y el consecuente consumo, sin modificar más que la programación de los sistemas. En el presente, se dan las reducciones más drásticas, de 82,48 a 30,41 kWh/m²-año de demanda de climatización, que supone un ahorro del 63%. Éste va decreciendo, considerando el calentamiento global, hasta el 52% en 2080. El patrón en el consumo es algo menor debido a que los sistemas contemplados son algo más eficientes en calefacción que en refrigeración, siendo este último el consumo más acusado, con un aumento de la temperatura exterior.

REDUCCIÓN EN DEMANDA Y CONSUMO ENERGÉTICO

El estudio permitió observar, de igual modo, reducciones importantes en la demanda energética de la MAE1 frente a la MAE0 (Tabla 2, Figura 4), con valores de entre el 58% y 49% en refrigeración, y el 74% y 86% en calefacción, entre el presente y el año 2080. La reducción en la demanda de refrigeración decrece con el desarrollo de los escenarios, mientras que la reducción en la demanda de calefacción crece, puesto que es favorecida por el incremento de temperatura. Sin embargo, también se determina que el incremento en demanda de

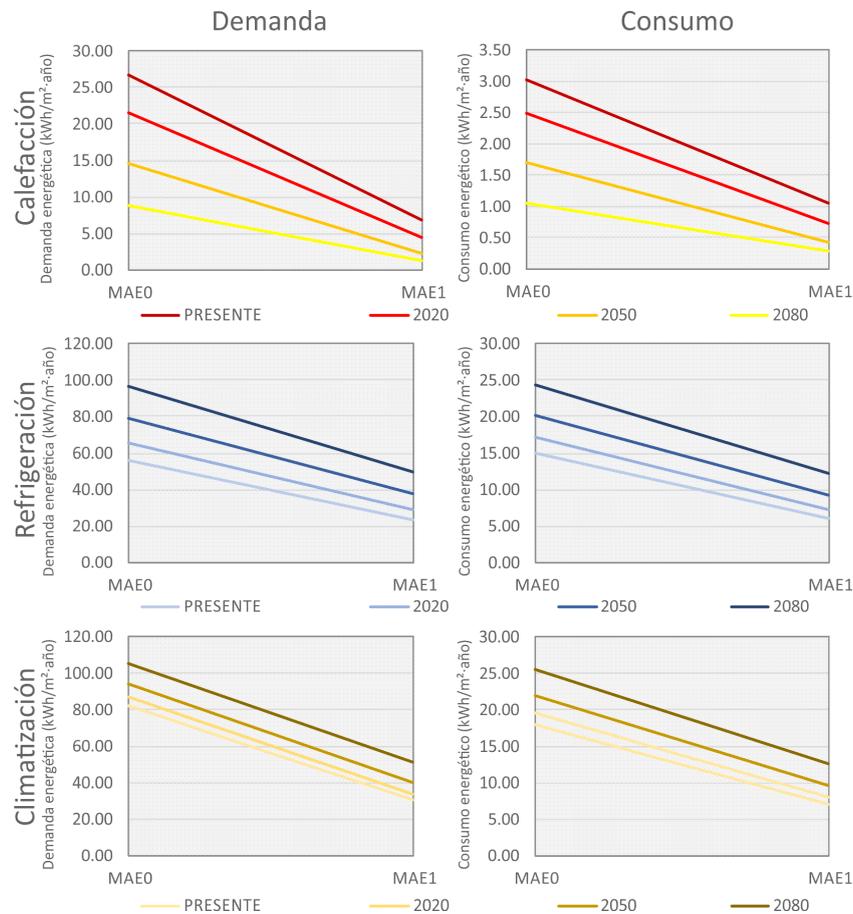


Figura 4. Resultados de la simulación energética. Fuente: Elaboración de los autores.

refrigeración es mayor que el decremento en demanda de calefacción, lo cual tiene como consecuencia que la reducción en la demanda total de climatización es menor a medida que se desarrollan los escenarios, oscilando entre el 63% y 52% entre la actualidad y 2080. Respecto a los valores de consumo, se puede apreciar que siguen una tendencia similar a los valores de demanda, fluctuando el consumo total de climatización de la MAE1 entre el 61% y 51%.

INCREMENTO EN LA DEMANDA POR EL CALENTAMIENTO GLOBAL

En la Figura 5 se exhibe la variación de la demanda energética de refrigeración, calefacción y total de climatización resultantes en el desarrollo de los escenarios climáticos, y las correspondientes líneas de tendencia. En la gráfica de demanda de refrigeración, la MAE1 tiene una pendiente más suave que la MAE0 y en la gráfica de demanda de calefacción, el decremento de la MAE1 es igualmente más suave. Dichas tendencias de la MAE0 se contrarrestan en la demanda total de climatización, haciendo que sea prácticamente paralela a la de la MAE1, por lo que, de forma global, se aprecia que el incremento de temperaturas podría tener un efecto similar en las tendencias de ambas MAEs, aunque la MAE1 permanece alrededor de 2 kWh/m²·año por debajo.

Sin embargo, este efecto no es proporcional, ya que las MAEs tienen distintos porcentajes de variación en el desarrollo de los escenarios climáticos. Mientras que la demanda de refrigeración en la MAE0 se incrementa entre el 18% y 73%, en la MAE1 lo hace entre el 24% y 112%, para los años 2020 y 2080, respectivamente. En el caso de la demanda de calefacción, en la MAE0 decrece del 19% al 67%, mientras que en la MAE1, del 34% al 82%. Se puede constatar que la demanda total de climatización incrementa en la MAE0 entre el 6% y 28%, mientras que en la MAE1, entre el 11% y 68%, por lo que la MAE1 tiene un incremento mayor respecto del escenario presente que la MAE0. Por consiguiente, la influencia del cambio climático tiene un efecto mayor en la MAE1, como cabe esperar en un sistema basado en la adaptación; aun así esta propuesta siempre brinda una reducción significativa en la demanda en todos los escenarios temporales con respecto al MAE0.

NIVELES DE CONFORT TÉRMICO

En el análisis de confort de la MAE1, es necesario tener en cuenta que la demanda y consumo energético adaptativo implica la variación del modelo de confort adaptativo de EN 15251, por lo que es posible que dicha aplicabilidad quede desvirtuada de su concepto original, basado en

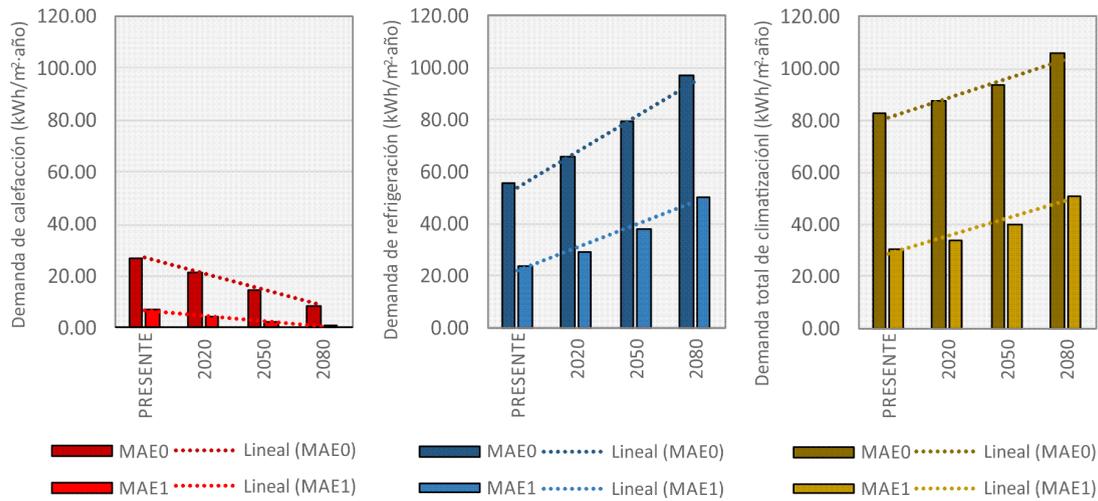


Figura 5. Variación en demanda en el desarrollo de los escenarios. Fuente: Elaboración de los autores.

que por encima de dichos límites de aplicabilidad, el ser humano sentirá malestar térmico, y al no tener en consideración los valores de la temperatura interior, se asume que no serán aceptables para el confort humano, ya que el edificio tiene ventilación natural y, por lo tanto, una estrecha relación con el ambiente exterior. Es necesario recalcar que dicho malestar térmico corresponde a las horas en las que la temperatura operativa quedaría fuera de la zona de confort de la norma EN15251, y no al porcentaje predictivo de insatisfechos (PPD), concepto perteneciente al modelo de confort basado en el PMV, desarrollado por Fanger. No obstante, en el cálculo del consumo energético adaptativo se activan los sistemas de climatización, y, por ende, en determinadas circunstancias, se rompe la relación con el ambiente exterior. Por ello, se han calculado los porcentajes de confort sin considerar los límites de aplicabilidad y, consecuentemente, con la única condición de que la temperatura operativa interior esté dentro de los límites de confort (Tabla 4).

Las reducciones en la demanda y consumo energético mostradas con anterioridad no han sido logradas en base al perjuicio del confort térmico, ya que se observa que prácticamente todas las horas quedan dentro de la zona de confort, siendo el mínimo un 94%.

El análisis de confort se ha realizado con valores de temperatura horarios, extraídos de los resultados de la simulación de DesignBuilder. Estas temperaturas horarias son calculadas realizando el promedio de cada simulación en cada intervalo de tiempo, es decir, en nuestro caso, cada seis minutos. De esta forma, y teniendo en cuenta que el programa necesita tres iteraciones para alcanzar la temperatura de consigna, la temperatura de la primera hora tras activar los sistemas de acondicionamiento no queda dentro de la zona de confort, porque la temperatura operativa interior promedio durante dicha hora excede ligeramente el límite de confort adaptativo. Esta es la causa de que haya algunas horas de malestar térmico en

MAE	Demanda	Incremento o decremento respecto presente		
		2020	2050	2080
MAE0	Refrigeración	18%	42%	73%
	Calefacción	-19%	-45%	-67%
	Climatización	6%	14%	28%
MAE1	Refrigeración	24%	60%	112%
	Calefacción	-34%	-68%	-82%
	Climatización	11%	31%	68%

Tabla 3. Porcentajes de incremento o decremento de demanda respecto del presente. Fuente: Elaboración de los autores.

	Horas por encima, dentro, o por debajo de la zona de confort	MAE1	
		Horas	%
Presente	Por encima	3.00	0.14%
	Dentro	2,077.00	99.86%
	Por debajo	0.00	0.00%
2020	Por encima	29.00	1.39%
	Dentro	2,051.00	98.61%
	Por debajo	0.00	0.00%
2050	Por encima	49.00	2.36%
	Dentro	2,031.00	97.64%
	Por debajo	0.00	0.00%
2080	Por encima	125.00	6.01%
	Dentro	1,955.00	93.99%
	Por debajo	0.00	0.00%

Tabla 4. Niveles de bienestar y malestar térmico en el desarrollo de los escenarios en la MAE1. Fuente: Elaboración de los autores.

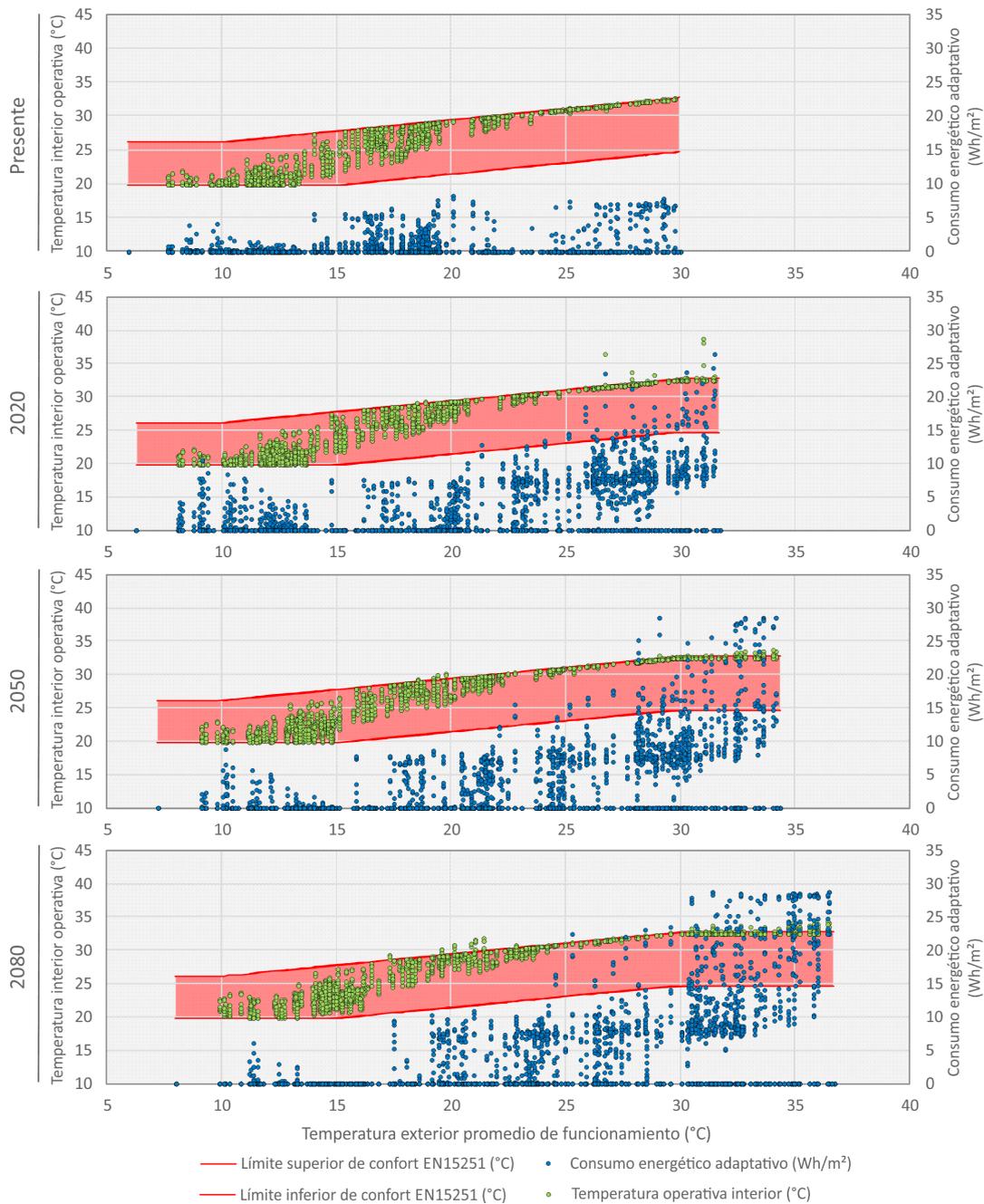


Figura 6. Dispersión de puntos de temperatura y demanda en el desarrollo de los escenarios en la MAE1.
Fuente: Elaboración de los autores.

el análisis de confort, que realmente representan escasos minutos, por lo que el balance de malestar térmico debería ser mucho menor.

Dichos porcentajes de confort se corroboran al observar que la mayoría de las temperaturas horarias (puntos verdes) quedan dentro de los límites de confort (Figura 6). En la misma figura, se expresan además los valores horarios de consumo energético adaptativo (puntos azules), ambos representados sobre la temperatura exterior promedio de funcionamiento, por lo que existe una correlación

entre ellos. Toda aquella temperatura operativa interior sin medios mecánicos que excede los límites de confort, genera un valor horario de consumo energético adaptativo.

Con todo, se reconoce que, en todos los escenarios climáticos, en torno a los 15°C de temperatura exterior promedio de funcionamiento, existen valores de temperaturas sin sus valores correlativos de consumo adaptativo. Este es el punto de inflexión entre la demanda de calefacción, a la izquierda, y la demanda de refrigeración, a la derecha. Esto se debe a que la temperatura operativa

interior permanece dentro de los límites sin medios de acondicionamiento y, por tanto, no se generan los correspondientes valores de consumo adaptativo.

Por otra parte, con el desarrollo de los escenarios climáticos, la nube de puntos correspondientes al consumo de calefacción y refrigeración, respectivamente, decrece y crece en densidad y valor, debido al efecto del calentamiento global.

CONCLUSIONES

En la investigación aquí presentada se ha estudiado la cuantificación de la demanda y el consumo energético debido al establecimiento de temperaturas de consigna adaptativas, así como de los niveles de confort térmico adaptativo correspondientes a dicha reducción y su potencialidad en escenarios simulados para los años 2020, 2050 y 2080, en el contexto del cambio climático. En ese sentido, los resultados que se proporcionan de reducción de la demanda y consumo son orientativos para edificios que cumplan el CTE en el clima del arco mediterráneo. La metodología es extrapolable a cualquier edificio en cualquier clima, contemplando, desde luego, las respectivas variaciones de temperatura exterior y operativa interior, los límites de confort adaptativos y, por lo tanto, el consumo y la demanda adaptativa. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, se puede destacar las siguientes conclusiones:

-La MAE1 estudiada permite reducir la demanda y consumo total de climatización entre un 63% y 52% y 61% y 51%, respectivamente, dependiendo del escenario climático analizado, únicamente con el ajuste diario de las temperaturas de consigna de los sistemas de acondicionamiento, el cual puede ser llevado a cabo de forma manual por personal de mantenimiento o los propios ocupantes. Esta medida de ahorro energético solo tiene efecto en el control de las instalaciones existentes, por lo que no supone coste alguno.

- El incremento de temperatura provocado por el cambio climático tiene un efecto similar en la demanda total de climatización en la MAE0 y en la MAE1, haciendo que las líneas de tendencia sean prácticamente paralelas, aunque la MAE1 permanece alrededor de 2000 Wh/m²·año por debajo. Si se observa pormenorizadamente dicha demanda de climatización, se puede advertir que la demanda de calefacción decrece y que, por el contrario, la demanda de refrigeración se incrementa.

- Las reducciones en la demanda y consumo no se han logrado en detrimento del confort térmico, puesto que, en cualquier escenario o MAE, más de un 90% de las horas de funcionamiento del edificio están en zona de confort y, como se ha comentado antes, el porcentaje restante corresponde en parte a promedios de la simulación. Se ha comprobado que, en la totalidad de los escenarios climáticos, los sistemas de acondicionamiento

se activan en el horario de trabajo, aunque no alcancen instantáneamente la temperatura de consigna. Esto provoca que existan algunas horas de malestar térmico, en las que los sistemas se van ajustando a las consignas, que realmente representan escasos minutos. Por ello, el balance de malestar térmico debería ser mucho menor.

No obstante, existen limitaciones respecto al confort térmico adaptativo, ya que al ser este un modelo estadístico estandarizado carece de las particularidades de adaptabilidad propias de las personas y los contextos geográficos, culturales y socioeconómicos concretos. Además de estos contextos y entendimientos del medio, se plantea como una gran incertidumbre la adaptabilidad de las personas a las temperaturas en escenarios venideros, que bien puede variar debido a múltiples factores. La última edición de la norma EN 15251 data del año 2007, por lo que su aplicación es vigente en el escenario actual, pero se desconoce la adaptabilidad del ser humano a las temperaturas futuras, especialmente en los años 2050 y 2080. De este modo, los diferentes modelos de confort deben ser renovados y revisados en próximas investigaciones y marcos normativos, con el objeto de ser conscientes con los requerimientos energéticos en base a la adaptación climática de los usuarios.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE. *ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*, 2014.

ASHRAE. *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2013*, 2013.

BELCHER, Stephen; HACKER, Jacob y POWELL, Diana. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology* [en línea], 2005, vol. 1, pp. 49–61. DOI: 10.1191/0143624405bt112oa.

CEN. *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: European Committee for Standardization, 2007.

EUROPEAN COMMISSION. *20 20 by 2020 - Europe's climate change opportunity* [en línea]. Brussels, 2008. [Consultado 20 octubre 2017]. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52008DC0030&from=EN>.

EUROPEAN COMMISSION. *A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030*. Brussels, 2014.

FANGER, Povel Ole. *Thermal Comfort*. New York: McGraw Hill, 1970.

GOBIERNO DE ESPAÑA. *Royal Decree 314/2006 approving the Technical Building Code (Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación*. Madrid, España: Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado, 2006.

GOBIERNO DE ESPAÑA. *Royal Decree 1027/2007 approving the Spanish Thermal Building Regulations (Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios)*. Madrid, España: Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado, 2007.

HOYT, Tyler; ARENS, Edward y ZHANG, Hui. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment* [en línea], 2014, n.º 88, pp. 89–96. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.09.010.

ISO. *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Geneve: International Organization for Standardization, 2005.

ISSO. *ISSO-publicatie 74: Thermische Behaaglijkheid; eisen voor de binnentemperatuur in gebouwen*, Rotterdam: ISSO, 2004.

JENTSCH, Mark; JAMES, Patrick; BOURIKAS, Leonidas y BAHAJ, AbuBakr. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renewable Energy* [en línea], 2013, vol. 55, pp. 514–524. DOI: 10.1016/j.renene.2012.12.049.

KRAMER, Rick; MAAS, Marco; MARTENS, Marco; VAN SCHIJNDEL, Jos y SCHELLEN, Henk. Energy conservation in museums using different setpoint strategies: A case study for a state-of-the-art museum using building simulations. *Applied Energy* [en línea], 2015, vol. 158, pp. 446–458. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.044.

LUCON, Oswaldo; ÜRGE-VORSATZ, Diana; ZAIN AHMED, Azni; AKBARI, Hashem; BERTOLDI, Paolo; CABEZA, Luisa; EYRE, Nicholas; GADGIL, Ashok; HARVEY, Danny; JIANG, Yi; LIPHOTO, Enoch; MIRASGEDIS, Sevastianos; MURAKAMI, Shuzo; PARIKH, Jyoti; PYKE, Christopher y VILARIÑO, Maria Virginia. Buildings. En: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [en línea]. Brussels: European Commission, 2014, pp. 1–66. DOI: 10.2753/JES1097-203X330403.

MCCARTNEY, Kathryn y NICOL, Fergus. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, pp. 623–635.

RUBIO-BELLIDO, Carlos; PÉREZ-FARGALLO, Alexis y PULIDO-ARCAS, Jesús Alberto. Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile. *Energy* [en línea], 2016, vol. 114, pp. 569–585. DOI: 10.1016/j.energy.2016.08.021.

RUBIO-BELLIDO, Carlos; PULIDO-ARCAS, Jesús Alberto y URETAGRAGERA, María. Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Hábitat Sustentable*, 2015, vol. 5 n.º 2, pp. 32–41.

SÁNCHEZ-GARCÍA, Daniel; RUBIO-BELLIDO, Carlos; GUEVARA-GARCÍA, Francisco Javier y CANIVELL, Jacinto. The influence of climate change in extant dwellings through adaptive comfort point of view. En: *Proceedings of the 3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017, pp. 532–544.

SÁNCHEZ-GARCÍA, Daniel; SÁNCHEZ-GUEVARA, Carmen y RUBIO-BELLIDO, Carlos. El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla = The adaptive approach to thermal comfort in Seville. *Anales de Edificación* [en línea], 2016, vol. 2 n.º 1, p. 38–48. DOI: 10.20868/ade.2016.3197.

SÁNCHEZ-GUEVARA, Carmen; MAVROGIANNI, Anna y NEILA GONZÁLEZ, Francisco Javier. On the minimal thermal habitability conditions in low income dwellings in Spain for a new definition of fuel poverty. *Building and Environment* [en línea], 2016, vol. 114, pp. 344–356. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.029.

SPYROPOULOS, Giorgios y BALARAS, Constantinos. Energy consumption and the potential of energy savings in Hellenic office buildings used as bank branches - A case study', *Energy and Buildings* [en línea], 2011, vol. 43, n.º 4, pp. 770–778. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.015.

TUMINI, Irina y RUBIO-BELLIDO, Carlos. Measuring Climate Change Impact on Urban Microclimate: A Case Study of Concepción. *Procedia Engineering* [en línea], 2016, vol. 161, pp. 2290–2296. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.830.

VAN DER LINDEN, Kees; BOERSTRA, Atze; RAUE, Arjen; KURVERS, Stanley y DE DEAR, Richard. 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 and Buildings* [en línea], 2006, vol. 38, n.º 1, pp. 8–17. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.02.008.