



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Caracterización de equipos evaporativos
portátiles y diseño de prototipo de
acondicionamiento de terrazas en verano.**

Autor:

Viñas Malillos, Sara

Tutora:

**Tejero González, Ana
Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica.**

Valladolid, julio 2021

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de fin de grado no hubiera sido posible sin la ayuda de mi tutora, Ana Tejero González, que me ha guiado y acompañado hasta el final del camino. Siempre agradecida por su disposición, cooperación y ánimos incondicionales.

A mis padres, siempre cuidándome y apoyándome. No tengo manera de devolver todo lo que me han dado.

A Elena, que prendió una luz en medio de una gran oscuridad para mostrarme la salida.

A mis amigos. Los viejos, que han reído y llorado siempre a mi lado. Y los nuevos, que me dieron aire cuando me faltaba el aliento.

Agradecer, por último, el apoyo de los siguientes proyectos que han permitido desarrollar este trabajo de fin de grado:

Análisis de tecnologías energéticamente eficientes para la sostenibilidad de los edificios (VA272P18), a través del Programa de la Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León de Apoyo a proyectos de investigación cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Programa Prometeo para el desarrollo de prototipos orientados al mercado de la Fundación General de la Universidad de Valladolid (Funge).

RESUMEN

El acondicionamiento de los espacios debido a la calefacción y refrigeración es responsable de un elevado consumo de energía dentro de la Unión Europea. Aunque la proporción de uso final total de energía para la refrigeración, en comparación con la calefacción, es bastante pequeña en toda la Unión Europea, la demanda de esta necesidad de refrigeración aumenta de manera muy notoria durante los meses de verano y se ve cada vez más afectada por los efectos del cambio climático. Además, el uso de los equipos convencionales de aire acondicionado supone demandas punta de energía eléctrica que pueden saturar la red, y muchos de estos sistemas trabajan con fluidos refrigerantes perjudiciales para el medio ambiente. Por ello es de vital importancia encontrar alternativas de climatización que nos permitan reducir el consumo energético. El enfriamiento evaporativo se presenta como una opción muy interesante ya que puede mejorar las condiciones de confort térmico y la calidad del aire interior, todo ello con un reducido consumo energético.

En el presente trabajo se estudiará cómo un equipo de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido y portátil influye en las condiciones de confort de dos casos de estudio en interiores, con entornos desiguales, y si unos modos de uso del equipo son más recomendables sobre otros.

También se presentarán los datos de un ensayo en exteriores con un equipo de enfriamiento evaporativo desde superficie húmeda textil y derivado de sus resultados la concepción de un prototipo que permita la humectación del medio textil de manera automática.

Palabras clave

Enfriamiento evaporativo directo; enfriamiento adiabático; confort térmico; ventilación cruzada; climatización residencial; climatización de terrazas.

ABSTRACT

The conditioning of spaces due to heating and cooling is responsible for high energy consumption within the European Union. Although the share of total energy end-use for cooling, compared to heating, is quite small across the European Union, the demand for this cooling need increases dramatically during the summer months and is increasingly seen most affected by the effects of climate change. In addition, the use of conventional air conditioning equipment places peak demands on electrical energy that can saturate the grid, and many of these systems work with refrigerant fluids that are harmful to the environment. For this reason, it is vitally important to find air conditioning alternatives that allow us to reduce energy consumption. Evaporative cooling is presented as a very interesting option since it can improve thermal comfort conditions and indoor air quality, all with reduced energy consumption.

In this project we will study how and portable direct evaporative cooling equipment with rigid pads influences the comfort conditions of two case studies indoors, with unequal environments, and if some modes of use of the equipment are more recommended over others.

The data of an outdoor study with an evaporative cooling equipment from a textile wet surface will also be presented and derived from its results, the conception of a prototype that allows the moistening of the textile medium automatically.

Key words

Direct evaporative cooling; adiabatic cooling; thermal comfort; cross ventilation; residential air conditioning; outdoors cooling.

CONTENIDO

Agradecimientos	3
Resumen	5
Abstract	7
Contenido	9
Índice de tablas	11
Índice de figuras	13
1. Introducción.	17
1.1. Problemática energética actual.	17
1.2. Legislación europea y contextualización a la legislación española.....	21
1.3. Objetivos del trabajo de fin de grado.....	26
2. Enfriamiento evaporativo.	27
2.1. Enfriamiento evaporativo en la historia.	27
2.2. Fundamentos del enfriamiento evaporativo.	29
2.3. Estado de la técnica.	32
2.3.1. Sistemas de enfriamiento evaporativo directos.	32
2.3.2. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirectos.	35
2.3.3. Sistemas de enfriamiento evaporativo mixtos.....	36
3. Confort térmico en edificios.	37
4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales.	43
4.1. Metodología.	43
4.2. Resultados y discusión.	54
4.2.1. Ensayos día 0.	55
4.2.2. Ensayos día 1.	56
4.2.2.1. Primera puesta en funcionamiento del equipo.	58
4.2.2.2. Segunda puesta en funcionamiento del equipo.	60
4.2.2.3. Tercera puesta en funcionamiento del equipo.....	62
4.2.2.4. Medidas del equipo de confort térmico.	63
4.2.2.5. Conclusiones al finalizar los ensayos del día 1.....	65
4.2.3. Ensayos día 2.	69
4.2.3.1. Primera puesta en funcionamiento del equipo.	70
4.2.3.2. Segunda puesta en funcionamiento del equipo.	73
4.2.3.3. Tercera puesta en funcionamiento del equipo.....	75
4.2.3.4. Medidas del equipo de confort térmico.	76
4.2.3.5. Conclusiones al finalizar los ensayos del día 2.....	77
4.2.4. Ensayos día 3.	81

4.2.4.1.	Primera puesta en funcionamiento del equipo	82
4.2.4.2.	Segunda puesta en funcionamiento del equipo.	83
4.2.4.3.	Tercera puesta en funcionamiento del equipo.....	85
4.2.4.4.	Cuarta puesta en funcionamiento del equipo.	86
4.2.4.5.	Quinta puesta en funcionamiento del equipo.	87
4.2.4.6.	Sexta puesta en funcionamiento del equipo.	88
4.2.4.7.	Séptima puesta en funcionamiento del equipo.....	89
4.2.4.8.	Medidas del equipo de confort térmico.	90
4.2.4.9.	Conclusiones al finalizar los ensayos del día 3.	91
5.	<i>Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores.....</i>	99
5.1.	Ensayos previos.	100
5.2.	Ensayo en exterior.	100
5.2.1.	Metodología.	100
5.2.2.	Ensayo día 1.....	102
5.2.3.	Ensayo día 2.....	104
5.2.4.	Ensayo día 3.....	106
5.2.5.	Conclusiones del ensayo en exterior.....	108
5.3.	Diseño del prototipo.	108
6.	<i>Conclusiones.....</i>	119
7.	<i>Propuestas futuras de investigación.....</i>	121
	<i>Referencias bibliográficas.....</i>	123
	<i>Anexo A: Calibraciones de las sondas Testo 175H1.</i>	125
	Caso A.	125
	Caso B.	125
	<i>Anexo B: Temperaturas de saturación adiabática.</i>	127
	Día 1.....	128
	Día 2.....	129
	Día 3.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Principal legislación europea y su adaptación a la legislación española. (Elaboración propia).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2 - Resultados del ensayo realizado con un equipo comercial de relleno rígido [16].</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 3 – Rangos de variación de los factores que influyen sobre el balance térmico del cuerpo humano con el ambiente.</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 4 – Categorías del ambiente térmico en función del VMP y el PPI. [21]</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 5 - Condiciones interiores de diseño según RITE*.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 6 – Categorías de ambiente térmico teniendo en cuenta causa de malestar térmico local.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 7 – Características de los equipos de medida.</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 8 – Condiciones de toma de datos del día 0.</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9 - Condiciones de toma de datos del día 1.</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 10 - Condiciones de toma de datos del día 2.</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 11 - Condiciones de toma de datos del día 3.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 12 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del primer ensayo del día 1.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 13 – Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el primer ensayo del día 1.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 14 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del segundo ensayo del día 1.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 15 – Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el segundo ensayo del día 1.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 16 - Resumen de las condiciones iniciales y finales de la zona ocupada del tercer ensayo del día 1.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 17 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el tercer ensayo del día 1.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 18 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del primer ensayo del día 2.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 19 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el primer ensayo del día 2.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 20 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del segundo ensayo del día 2.</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 21 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el segundo ensayo del día 2.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 22 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del tercer ensayo del día 2.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 23 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el tercer ensayo del día 2.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 24 – Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el primer ensayo del día 3.</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 25 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del primer ensayo del día 3.....</i>	<i>83</i>

<i>Tabla 26 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el segundo ensayo del día 3.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 27 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del segundo ensayo del día 3.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 28 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el tercer ensayo del día 3.</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 29 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del tercer ensayo del día 3.</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 30 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el cuarto ensayo del día 3.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 31 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del cuarto ensayo del día 3.</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 32 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el quinto ensayo del día 3.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 33 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del quinto ensayo del día 3.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 34 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el sexto ensayo del día 3.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 35 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del sexto ensayo del día 3.</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 36 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el séptimo ensayo del día 3.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 37 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del séptimo ensayo del día 3.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 38 - Calibraciones de las sondas utilizadas en el caso A.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 39 - Calibraciones de las sondas utilizadas en el caso B.</i>	<i>125</i>
<i>Tabla 40 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 1 según diferentes condiciones de entrada.</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 41 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 1.</i>	<i>128</i>
<i>Tabla 42 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 2 según diferentes condiciones de entrada.</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 43 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 2.</i>	<i>129</i>
<i>Tabla 44 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 3 según diferentes condiciones de entrada.</i>	<i>130</i>
<i>Tabla 45 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 3.</i>	<i>130</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Reparto del consumo final de energía en los hogares de la Unión Europea en el 2018. [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2 - Evolución de los grados día de calefacción en la Unión Europea desde 1979 hasta la actualidad [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3 - Evolución de los grados día de refrigeración en la Unión Europea desde 1979 hasta la actualidad [4].....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4 - Consumo de energía final en los hogares para refrigeración del espacio [5].....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5 - Evolución de los precios de electricidad y gas en la Unión Europea [7].....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6 - Esquema de las principales acciones sobre el sector edificación para la reducción del consumo energético.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7 - (a) Impluvium en la Casa del Fauno, Pompeya, Italia [9] y (b) Casa dos Repuxos, Conímbriga, Portugal. (Fuente propia).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8 - (a) Patio de la Acequia y (b) Patio del Ciprés de la Sultana, ambos en el Palacio del Generalife en Granada [11].</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9 - Esquema de la evolución psicrométrica del aire al ser tratado en un equipo de enfriamiento adiabático directo [15].....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 10 - Esquema de los sistemas evaporativos directos [15].....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 11 - Parte posterior de un equipo de enfriamiento evaporativo de relleno rígido. (Fuente propia).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 12 - Sistemas de micropulverización de agua de la línea Mist&Fog de la empresa Termigo [17].</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13 - Diferentes formas de integrar el enfriamiento evaporativo indirecto: (a) antes del intercambiador y (b) en el mismo intercambiador [15].</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14 - Esquema de la evolución psicrométrica del aire al ser tratado en un equipo de enfriamiento adiabático indirecto [15].....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15 - Esquema de la evolución psicrométrica del aire al ser tratado en un equipo de enfriamiento mixto (indirecto-directo) [15].</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16 - Conceptos asociados a la calidad del ambiente en interiores.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 17 - Equipo portátil de enfriamiento evaporativo directo, Biocool modelo EOLUS Mini [23].</i>	<i>43</i>
<i>Figura 18 - Plantas de las estancias estudiadas: Caso A con ventilación cruzada, caso B sin ventilación cruzada.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 19 - Disposición de los equipos en: (a) caso de estudio A y (b) caso de estudio B. ..</i>	<i>44</i>
<i>Figura 20 - Sonda de temperatura seca y humedad relativa Testo 175H1.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 21 - Equipos usados en la calibración de las sondas Testo 175H1: (a) Horno de calibración Fluke 9103 y (b) Vaisala Humidity Calibrator HMK15.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 22 - Elementos que conforman el equipo de medición de confort térmico Vivo Comfort: (a) Sonda de humedad relativa, (b) Sonda de velocidad del aire (omnidireccional) y (c) Sonda de temperatura operativa.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 23 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 0.</i>	<i>55</i>

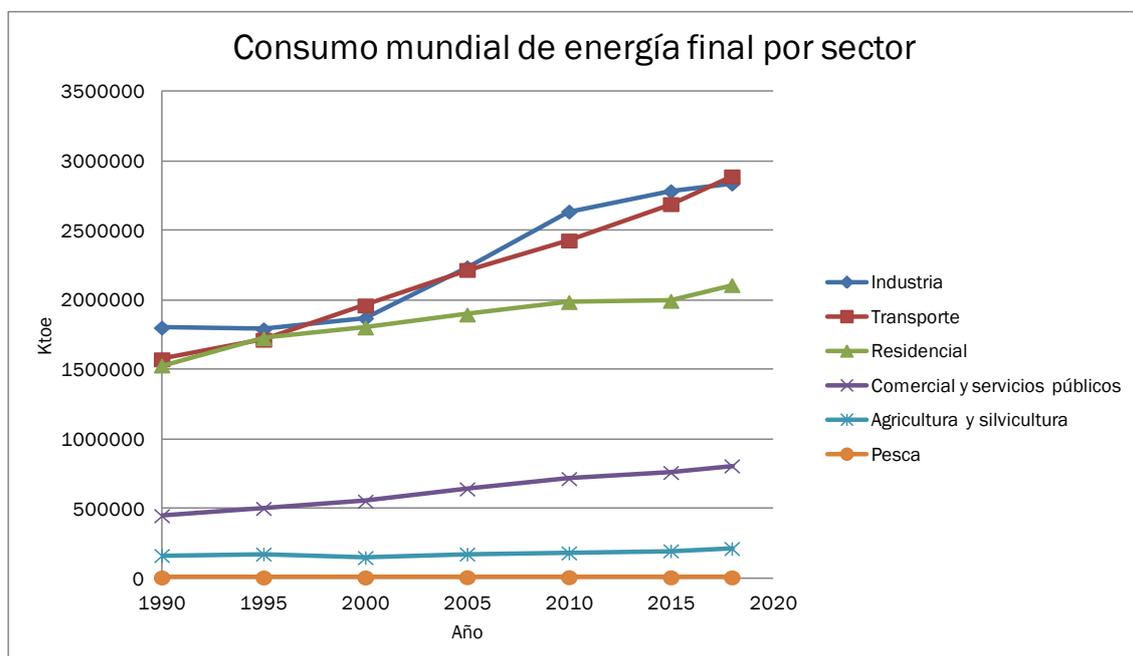
Figura 24 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 1.	57
Figura 25 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 1.	64
Figura 26 - Velocidad media del aire, en el día 1, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.	65
Figura 27 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 1.	67
Figura 28 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 1.	68
Figura 29 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 1.	68
Figura 30 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 2.	69
Figura 31 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 2.	77
Figura 32 - Velocidad media del aire, en el día 1 y 2, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.	78
Figura 33 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 2.	79
Figura 34 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 2.	80
Figura 35 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 2.	80
Figura 36 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 3.	81
Figura 37 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 3.	91
Figura 38 - Velocidad media del aire, en el día 1,2 y 3, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.	92
Figura 39 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 3.	93
Figura 40 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 3.	94
Figura 41 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 3.	94
Figura 42 - Evolución diaria de la temperatura en la zona ocupada del caso A.	95
Figura 43 - Evolución diaria de la temperatura en la zona ocupada del caso B.	96
Figura 44 - Rangos de temperaturas alcanzados durante el funcionamiento de los equipos.	96
Figura 45 - Rangos de humedades relativas alcanzados durante el funcionamiento de los equipos.	97
Figura 46 - Estructura portante y equipo de medida de confort térmico en el interior.	101
Figura 47 - Estructura portante cubierta por telas: (a) vista desde el exterior y (b) vista desde el interior.	101
Figura 48 - Piranómetro y sonda de molinillo Testo 435.	102
Figura 49 - Estructura portante con telas humedecidas por agua.	103
Figura 50 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 1.	104

<i>Figura 51 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 1: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.</i>	104
<i>Figura 52 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 2.</i>	105
<i>Figura 53 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 2: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.</i>	106
<i>Figura 54 - Sistemas de humectación mediante un tubo alrededor de la estructura portante.</i>	106
<i>Figura 55 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 3.</i>	107
<i>Figura 56 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 3: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.</i>	108
<i>Figura 57 - Prototipo de acondicionamiento: (a) Soporte superior/Distribuidor de agua, (b) Soporte inferior/Evacuación de agua (opcional) y (c) Medio de humectación.</i>	109
<i>Figura 58 - Prototipo de acondicionamiento: Soporte superior/Distribuidor de agua con el medio de humectación.</i>	110
<i>Figura 59 - Prototipo de acondicionamiento: Sistema modular mediante la unión de varios distribuidores.</i>	111
<i>Figura 60 - Diferentes vistas del distribuidor para configuración modular.</i>	112
<i>Figura 61 - Vista superior y corte frontal del distribuidor.</i>	113
<i>Figura 62 - Prototipo de acondicionamiento: Soporte superior/Distribuidor de agua y su posible integración en un elemento de mobiliario verde.</i>	114
<i>Figura 63 - Vista de un distribuidor de cierre o terminal.</i>	115
<i>Figura 64 - Prototipo impreso en 3D.</i>	116
<i>Figura 65 - Prototipo impreso en 3D.</i>	116
<i>Figura 66 - Prototipo impreso en 3D.</i>	117
<i>Figura 67 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 1 según diferentes condiciones de entrada.</i>	128
<i>Figura 68 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 2 según diferentes condiciones de entrada.</i>	129
<i>Figura 69 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 3 según diferentes condiciones de entrada.</i>	130

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. *Problemática energética actual.*

Para el desarrollo de una sociedad, tanto socialmente como económicamente, la energía es el principal elemento impulsor. Este desarrollo trae consigo mejoras en las industrias ya existentes, creación de otras nuevas y un crecimiento de la población que viene acompañado del crecimiento del nivel de confort demandado por la sociedad, lo que hace que el incremento en el consumo de energía final (la energía que llega a la puerta del consumidor final excluyendo la que utiliza el propio sector energético) siga una tendencia al alza (Gráfica 1).



Gráfica 1 - Consumo mundial de energía final por sector hasta el año 2018 [1].

Analizar por completo el panorama energético mundial es una vasta tarea para la que no se tiene capacidad de realización en este trabajo, por lo que acotaremos el campo de observación a lo más directamente relacionado con el tema que se va a tratar posteriormente en este trabajo: el acondicionamiento de los espacios interiores en edificios.

Aproximadamente la mitad del consumo energético en la Unión Europea viene dado por la calefacción y refrigeración en edificios y en la industria; convirtiéndose así en el mayor sector de uso final de la energía, por delante del transporte y la electricidad, además de contribuir en una alta proporción de emisiones de CO₂ [2]. En 2018, los hogares por sí solos representaron el 26,1% del consumo final de energía en la Unión Europea y cuyos principales usos, de esta energía final en los hogares, se reparten de la siguiente manera [3]:

1. Introducción

- 63,6% para calefacción del espacio.
- 14,8% para agua caliente.
- 14,1% para iluminación y aparatos eléctricos.
- 6,1% para cocinar.
- 1% para otros usos no especificados.
- 0,4% para refrigeración del espacio.

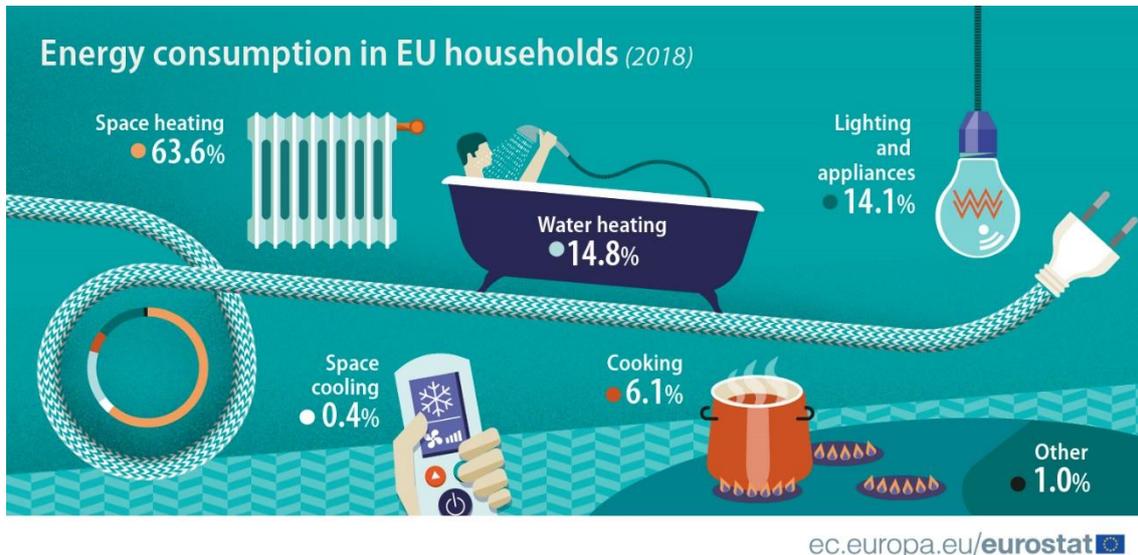
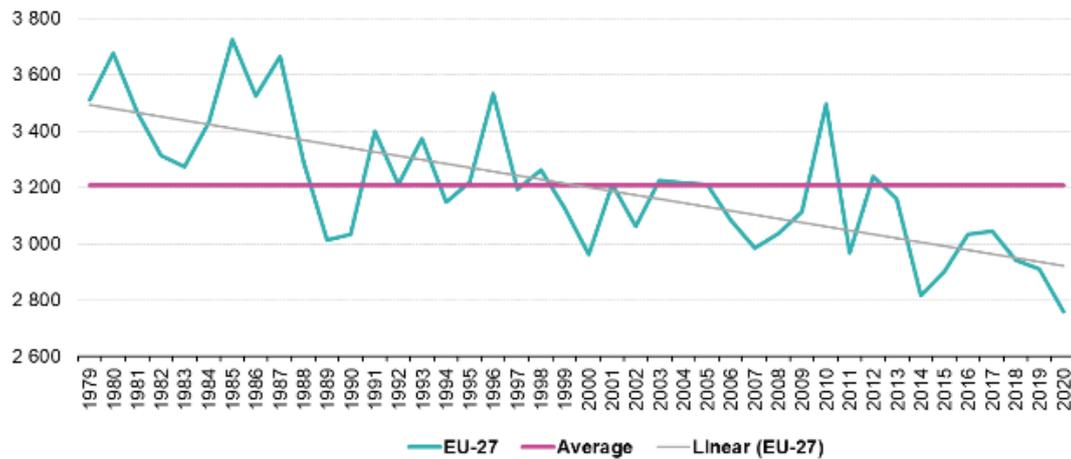


Figura 1 - Reparto del consumo final de energía en los hogares de la Unión Europea en el 2018. [3]

La mayoría de este consumo de energía final en los hogares está cubierto por el gas natural (32,1%) y electricidad (24,7%), siguiendo por las energías renovables que cubren un 19,5%, los derivados del petróleo (11,6%), calor residual (8,7%) y, por último, un 3,4% cubierto por los productos del carbón [3].

Como podemos observar, la proporción de uso final total de energía para la refrigeración, en comparación con la usada para calefacción y agua caliente, es bastante pequeña, pero la demanda de refrigeración aumenta notablemente en los hogares y empresas, así como en la industria alimentaria, durante los meses de verano, concretamente en la zona mediterránea el incremento que se produce es muy relevante; además, esta demanda también se ve afectada por el cambio climático y el aumento de la temperatura global. Las necesidades de calefacción en edificios han disminuido a lo largo del tiempo: los grados día de calefacción se han visto reducidos un 21% desde 1979 hasta 2020 en los 27 países de la Unión Europea (Figura 2), mientras que los grados día de refrigeración han aumentado más del doble en el mismo periodo de tiempo (Figura 3) [4]. Los grados día de calefacción y refrigeración son unos índices técnicos que se basan en el clima (relacionando temperatura media, en época invernal o estival, con la temperatura de confort en interiores) para describir los requisitos de energía de los edificios en términos de calefacción y refrigeración.

Heating degree days in EU-27, 1979-2020

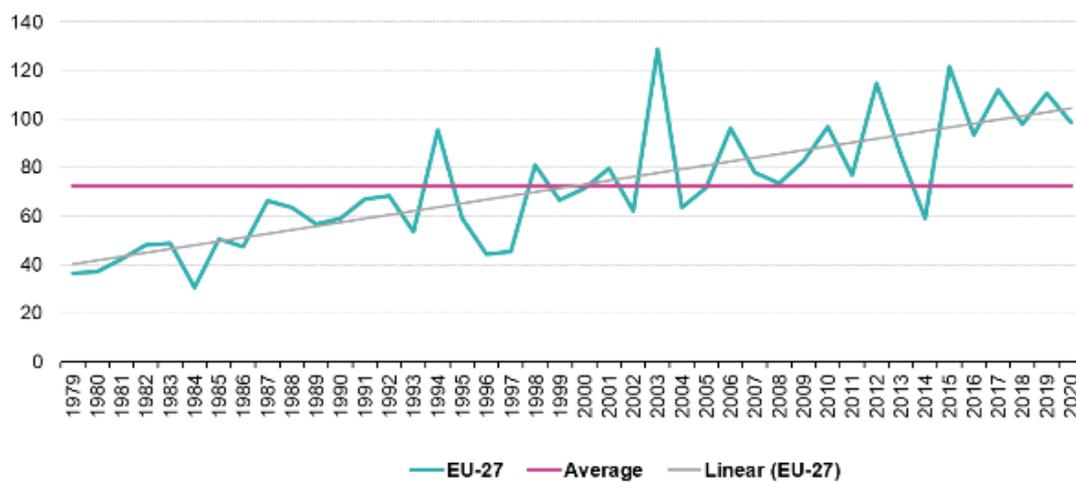


Source: Eurostat (nrg_chdd_a)



Figura 2 - Evolución de los grados día de calefacción en la Unión Europea desde 1979 hasta la actualidad [4].

Cooling degree days in EU-27, 1979-2020



Source: Eurostat (nrg_chdd_a)



Figura 3 - Evolución de los grados día de refrigeración en la Unión Europea desde 1979 hasta la actualidad [4].

1. Introducción

Este incremento en los grados día de refrigeración se ve reflejado en el aumento de consumo energía final en los hogares para la refrigeración del espacio (Figura 4).

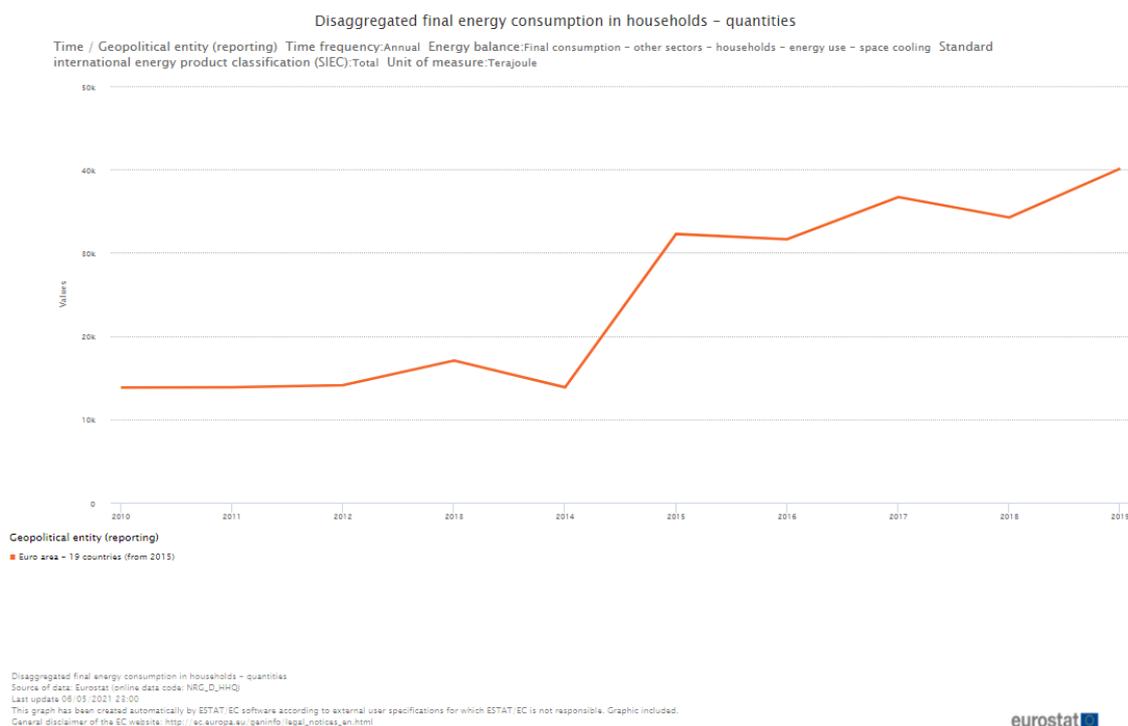


Figura 4 - Consumo de energía final en los hogares para refrigeración del espacio [5].

Gran parte de esta demanda de refrigeración es cubierta por equipos de aire acondicionado, que en los periodos más calurosos pueden suponer picos de demanda de energía eléctrica llegando incluso a saturar la red. Estos sistemas, además, afectan de una manera muy importante al cambio climático debido al gran consumo energético que presentan y las posibles emisiones de gases con mayor potencial de efecto invernadero que el CO₂ en el caso de que se produzcan fugas de refrigerantes fluorados. También afectan de manera negativa al efecto de isla de calor urbana, debido al calor que se disipa en las unidades condensadoras de estos sistemas.

Otro problema que nos encontramos es que, en torno al 35% de los edificios en la Unión Europea tienen más de 50 años y casi un 75% del parque inmobiliario es ineficiente energéticamente hablando; sólo entre un 0,4-1,2% (según el país) de las construcciones se van renovando cada año [6]. Por lo tanto, mejorar la eficiencia energética de los edificios (renovación de edificios existentes y soluciones eficientes en nuevas construcciones) puede conducir a importantes ahorros de energía, entre un 5% y 6%, y a una disminución de las emisiones de CO₂: alrededor de un 5% [6]. Además de generar otros beneficios económicos, sociales y ambientales. Los edificios de mejor rendimiento proporcionan mayores niveles de confort y bienestar para sus ocupantes y mejoran la salud al reducir las enfermedades y las muertes causadas por un clima interior deficiente.

Añadido al incremento de demanda y a la ineficiencia de los edificios nos encontramos, también, que los precios del gas y de la electricidad (principales fuentes que cubren el consumo de energía final en los hogares) han ido aumentando en los 27 países de la Unión Europea en los últimos años; en concreto un 1,3% en el precio de la electricidad desde la segunda mitad del 2018 hasta la segunda mitad el 2019 y un 1,7% de media en cuanto al precio del gas para el mismo periodo de tiempo, según el último artículo publicado por la Oficina Europea de Estadística (Eurostat) [7].

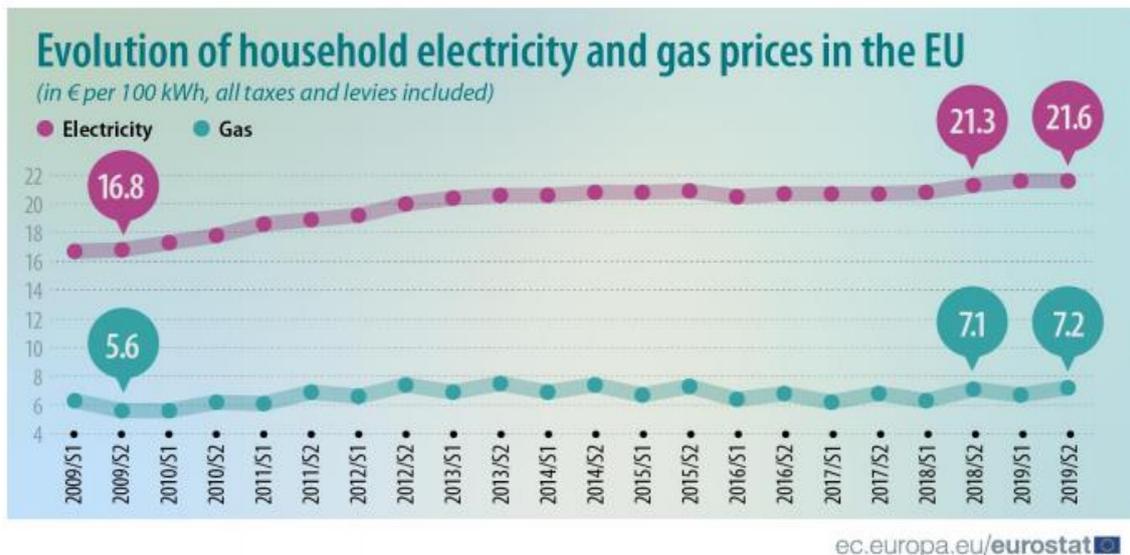


Figura 5 - Evolución de los precios de electricidad y gas en la Unión Europea [7].

A la vista de todos los datos anteriores, podemos decir que el sector de los edificios, y en particular lo referido a la calefacción y la refrigeración, es decisivo para acercarnos al cumplimiento de los objetivos climáticos y energéticos que se han fijado desde la Unión Europea, a la vez que mejores edificios y más eficientes, desde el punto de vista energético, mejorarán la calidad de vida de los ciudadanos aportando así beneficios adicionales a la sociedad y a la economía.

1.2. Legislación europea y contextualización a la legislación española.

Como hemos dicho anteriormente, la energía es una herramienta de desarrollo tanto social como económico y se ha vuelto indispensable por lo que necesario garantizar su suministro de una manera sostenible y segura mientras se lidia con las consecuencias del cambio climático.

Aunque en el apartado anterior, al hablar de la problemática energética nos hayamos centrado en la época actual, el uso y ahorro de energía es un tema al que se le ha venido prestando atención desde hace bastantes años como muestran las

1. Introducción

diferentes actuaciones sobre la política energética que la Unión Europea ha ido desarrollando y que se han ido adaptando a la legislación de cada nación.

A continuación, se recoge un listado con algunas de las principales normativas sobre eficiencia energética en el sector de la edificación dadas por la Unión Europea y su adaptación a la normativa española. Nos centramos en este sector porque, a la vista de los datos comentados en el apartado anterior, está en el centro de las políticas y estrategias de la Unión Europea que van destinadas a aumentar el uso eficiente de la energía, además de promover el uso de energías renovables y alcanzar una sociedad de bajas emisiones de carbono para el 2050.

*Tabla 1 - Principal legislación europea y su adaptación a la legislación española.
(Elaboración propia).*

Año	Ámbito	Normativa	Estado	Comentarios
1976	Europa	Recomendación 04/05/1976	Derogada	Aunque centrada solo en sistemas de calefacción establece una primera muestra de concienciación sobre el consumo energético en edificios.
1980	España	Real Decreto 1618/1980, de 4 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones de Calefacción, Climatización y Agua Caliente Sanitaria, con el fin de racionalizar su consumo energético.	Derogado	Conocido como RICACS. Recogía las condiciones que se exigían a las instalaciones térmicas no industriales desde el punto de vista de confort, calidad, seguridad y medio ambiente buscando racionalizar también su consumo de energía
1993	Europa	Directiva 93/76/CEE del Consejo de 13 de septiembre de 1993 relativa a la limitación de las emisiones de dióxido de carbono mediante la mejora de la eficiencia energética (SAVE).	Derogada	Introduce la preocupación por las emisiones de CO ₂ .
1998	España	Real Decreto 1751/1998, de 31 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) y sus Instrucciones Técnicas Complementarias (ITE) y se crea la Comisión Asesora para las Instalaciones Térmicas de los Edificios.	Derogado	Se trataría del "primer RITE" y fue conocido como RITE98. Traspone la Directiva 93/76/CEE.

Tabla 1 - Principal legislación europea y su adaptación a la legislación española.
(Elaboración propia). (Continuación)

Año	Ámbito	Normativa	Estado	Comentarios
2002	Europa	Directiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002 relativa al rendimiento energético de los edificios.	Derogada	Hace hincapié en la necesidad de proteger el medio ambiente y de hacer un uso racional de las fuentes de energía. Esta directiva es el antecedente de la Directiva 2010/31/EU “Energy Performance of Buildings Directive” (EPBD)
2006	España	Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.	Modificado	Traspone parcialmente la Directiva Europea 2002/91/CE, pero también nace con el objetivo de establecer los requisitos básicos de los edificios. Consta de seis documentos básicos. Tras la aprobación de la posterior Directiva 2010/31/UE, el documento básico de “Ahorro de energía” (HE) se actualizó a través de la orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, y la posterior orden FOM/588/2017, de 15 de junio. Modificado por El Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el CTE, aprobado por RD 3/2006, de 17 de marzo
2007	España	Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios	Modificado	Conocido como RITE07 que derogaba al RITE98. Traspone parcialmente la Directiva Europea 2002/91/CE. Modificado por el Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del RITE, aprobado por RD 1027/2007, de 20 de julio. Modificado por el Real Decreto 178/2021, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del RITE, aprobado por RD 1027/2007, de 20 de julio.

1. Introducción

Tabla 1 - Principal legislación europea y su adaptación a la legislación española.
(Elaboración propia). (Continuación)

Año	Ámbito	Normativa	Estado	Comentarios
2007	España	Real decreto 47/2007, de 19 de enero, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.	Derogado	Traspone parcialmente la Directiva Europea 2002/91/CE. Para dar respuesta a la exigencia de proporcionar un certificado de eficiencia energética a los compradores o usuarios de los edificios.
2010	Europa	Directiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de mayo de 2010, relativa a la eficiencia energética de los edificios	Modificada	Modificada por la Directiva 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética
2012	Europa	Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, por la que se modifican las Directivas 2009/125/CE y 2010/30/UE, y por la que se derogan las Directivas 2004/8/CE y 2006/32/CE	Modificada	Modificada por la Directiva 2013/12/UE del Consejo de 13 de mayo de 2013 por la que se adapta la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la eficiencia energética, con motivo de la adhesión de la República de Croacia.
2013		Real Decreto 238/2013, de 5 de abril, por el que se modifican determinados artículos e instrucciones técnicas del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, aprobado por RD 1027/2007, de 20 de julio		Surge para adaptar el RITE de 2007 a las nuevas exigencias introducidas por la Directiva 2010/31/UE. dos modificaciones anteriores para dar respuesta a exigencias alejadas de la eficiencia energética, a través del RD 1826/2009, de 27 de noviembre, y por el RD 249/2010, de 5 de marzo
2018	Europa	Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética	Vigor	Se trata de una enmienda de la Directiva 2010/31/UE.

Tabla 1 - Principal legislación europea y su adaptación a la legislación española.
(Elaboración propia). (Continuación)

Año	Ámbito	Normativa	Estado	Comentarios
2019	España	Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el RD 314/2006, de 17 de marzo.	Vigor	Este RD modifica el Código Técnico de la Edificación aprobado por el anterior RD 314/2006, de 17 de marzo.
2021	España	Real Decreto 178/2021, de 23 de marzo, por el que se modifica el RD 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios.	Vigor	Modifica el RD 1027/2007 para trasponer parcialmente la Directiva (UE) 2018/844 y adapta también varios puntos de la Directiva (UE) 2018/2001.

Gracias a toda esta diversa normativa, centrada en el sector edificación por el gran potencial de ahorro energético que tiene, podemos justificar todas aquellas actuaciones destinadas a la reducción de la demanda energética en edificios, a la mejora de la eficiencia energética y a la sustitución de fuentes de energía. Todas las medidas de ahorro energético llevadas a cabo sobre los edificios irán en una de estas actuaciones anteriores o combinarán varias de ellas (Figura 6). Sin olvidar la necesidad de creación o de mantenimiento de un nivel de confort adecuado para los ocupantes de los diferentes espacios mejorando su bienestar y su salud.

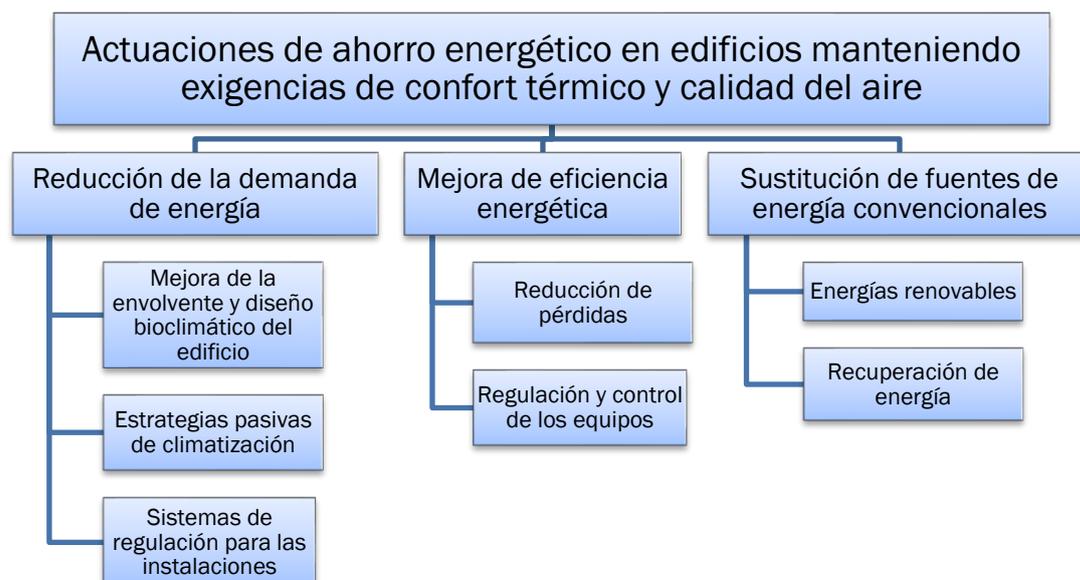


Figura 6 - Esquema de las principales acciones sobre el sector edificación para la reducción del consumo energético.

1.3. Objetivos del trabajo de fin de grado.

- Familiarización con el funcionamiento y el uso de equipos de enfriamiento evaporativo directo, tanto de relleno rígido como desde superficie húmeda textil
- Comprensión de cómo estos equipos modifican las condiciones ambientales y su influencia sobre el confort térmico, tanto en los espacios interiores como en los espacios exteriores.
- Estudiar de qué manera diferentes configuraciones de los espacios interiores afectan a las condiciones ambientales de las zonas acondicionadas y no acondicionadas.
- Comprobar si entre diversos modos de uso alguno de ellos maximiza los beneficios que se pueden conseguir con este tipo de equipos.

Todos estos objetivos tienen como última meta la potenciación del enfriamiento evaporativo para mejorar la eficiencia del uso de la energía en climatización.

2. ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO.

A tenor de la problemática energética ya planteada, es innegable que es necesario plantear alternativas que aúnen la integración de los aspectos medioambientales con un desarrollo sostenible en lo relativo a la política energética. Los equipos de enfriamiento evaporativo replican un fenómeno que se da de manera natural utilizando mínimos recursos energéticos, por ello este proceso se convierte en una opción muy interesante dentro de la situación de potenciación de la eficiencia energética y ahorro de energía que se está impulsando actualmente.

2.1. Enfriamiento evaporativo en la historia.

El enfriamiento evaporativo es un fenómeno que se da de manera natural cuando una corriente de aire y otra de agua entran en contacto y se consigue una disminución en la temperatura del aire. Es un proceso que ocurre en la naturaleza, cerca de corrientes de agua como pueden ser ríos, lagos, cascadas, mares y océanos. También en zonas de abundante vegetación: el agua que se filtra por las raíces de las plantas y árboles se evapora posteriormente en las hojas, lo que proporciona esa sensación de frescor en el ambiente. El enfriamiento evaporativo es también el mecanismo natural de los seres humanos para regular la temperatura. La evaporación del sudor desde la piel es capaz de refrescar esta y hacer que se pueda compensar la temperatura corporal.

Por ser un proceso que se da de forma original en la naturaleza ha sido ampliamente observado por los humanos y a lo largo de toda la historia de la humanidad diferentes civilizaciones han tratado de replicar este efecto para acondicionar espacios y conseguir mejorar el confort térmico. Por lo tanto, el enfriamiento evaporativo ha sido la primera forma de climatización utilizada por los seres humanos. Uno de los primeros indicios de la utilización de este principio lo encontramos en el Antiguo Egipto, alrededor del 2500 A.C., donde se llenaban vasijas de barro, un material poroso, con agua y mediante ventilación, manual o natural, se conseguía el acondicionamiento del espacio en el que estaban colocadas [8]. Las antiguas civilizaciones griega y romana, colocando fardos de paja humedecida en las ventanas, conseguían disminuir la temperatura de las estancias, además de utilizar pequeños estanques o impluvium (Figura 7.a), o pequeños jardines por los que hacían correr agua (Figura 7.b) y que actuaban todos ellos como reguladores de la temperatura.

2. Enfriamiento evaporativo



(a)



(b)

Figura 7 - (a) Impluvium en la Casa del Fauno, Pompeya, Italia [9] y (b) Casa dos Repuxos, Conímbriga, Portugal. (Fuente propia).

Seguimos encontrando ejemplos de esta técnica en algunos indios americanos o en los antiguos persas, que cubrían sus tiendas con un material textil que mantenían húmedo para proporcionarles un ambiente más fresco [8]. Estos últimos también fueron muy prolíficos en el uso de jardines, estanques y fuentes en sus edificaciones. Los árabes se fijaron en los persas y aprendieron de ellos el uso de los jardines y del agua para disminuir la temperatura de los espacios [10]. El ejemplo más notable lo encontramos materializado en los múltiples patios y jardines con los que cuenta el complejo monumental de La Alhambra en Granada (Figura 8.a y 8.b).



(a)



(b)

Figura 8 - (a) Patio de la Acequia y (b) Patio del Ciprés de la Sultana, ambos en el Palacio del Generalife en Granada [11].

El primer enfriador mecánico de aire, probablemente, fue construido por Leonardo da Vinci y estaba formado por una rueda hueca en la que el aire, que era impulsado axialmente a través de agua que caía en las diferentes cámaras de la rueda, era enfriado y purificado. [8].

En Estados Unidos, a principios del siglo XX, el enfriamiento evaporativo surge con dos orígenes diferentes, uno proveniente del este y otro del oeste. En el este, se desarrollaron lavadores de agua (donde se hacía circular una corriente de

aire a través de una cortina de agua) y molinos textiles de enfriamiento, que se convirtieron en las herramientas de limpieza y tratamiento de aire por excelencia de las industrias y poco utilizados para refrigeración; mientras que en el oeste, el origen del enfriamiento evaporativo fueron las torres de enfriamiento (que se utilizaban de manera industrial para enfriar agua y utilizarla en otros procesos) y las telas húmedas colgadas en puertas y ventanas (que eran una visión familiar en el paisaje de Arizona y el sur de California), e inspiraron nuevos sistemas enfocados, principalmente, a dispositivos de refrigeración de casas y edificios. [8]

Como ha quedado patente, la técnica del enfriamiento evaporativo es bien conocida y en la industria se ha venido utilizando desde hace más de un siglo, aunque el primer análisis riguroso de los sistemas evaporativos directos e indirectos no llegó hasta 1963 cuando el Dr. John R. Watt publicó su texto “Evaporative air conditioning handbook” [8], donde comentaba las ventajas y desventajas de estos sistemas, sus aplicaciones y establecía unas consideraciones sobre su diseño. Unos años más adelante, el Dr. Donald Pescod realiza diversos estudios sobre enfriadores evaporativos indirectos de placas, siendo pionero en utilizar placas de materiales plásticos y probar diversas técnicas sobre las corrientes del aire [12]. Pero las herramientas que han sido de gran utilidad para comprender la técnica del enfriamiento evaporativo han venido de la mano del Dr. Willis H. Carrier, quien estableció la teoría de la saturación adiabática y desarrolló su diagrama psicrométrico. [12]

El interés por este tipo de sistemas crece de manera notoria en la década de los años 80, como puede verse por el número de artículos y comunicaciones que van apareciendo en las publicaciones científicas y llegándose a desarrollar diversas aplicaciones de esta técnica. [12], aunque años después, los sistemas de enfriamiento evaporativo sufren una bajada en la demanda de uso debido a una injustificada vinculación de estos equipos con diferentes brotes de legionelosis [13] y por lo que se favoreció el uso de sistemas de producción de frío por condensación por aire, siendo estos mucho menos eficientes.

En la actualidad se está haciendo una reconsideración de los sistemas de enfriamiento evaporativo debido a las ventajas que presentan en el ahorro y uso eficiente de la energía.

2.2. Fundamentos del enfriamiento evaporativo.

El intercambio de energía que se produce entre el ser humano y su entorno, de una manera ideal, se repartiría de la siguiente manera [14]:

- 50% por radiación.
- 30% por evaporación.
- 15% por convección.

2. Enfriamiento evaporativo

- 5% por conducción.

Aunque el mayor intercambio se produce por radiación, la utilización de sistemas de climatización para modificar las condiciones de confort térmico basados en la evaporación se convierte en una opción muy interesante para el acondicionamiento térmico de espacios, ya que son sistemas de muy fácil instalación, que requieren una relativamente baja inversión económica y presentan grandes ventajas en cuanto a un uso eficiente de la energía.

Como ya hemos comentado, el enfriamiento evaporativo es un fenómeno que se da de manera natural cuando entran en contacto una corriente de aire y otra de agua. El agua se evapora en el seno del aire que lo rodea absorbiendo energía que saca de este último, lo que hace que la temperatura seca del aire disminuya a la vez que su humedad relativa aumenta (si el proceso es ideal, es decir, ocurre en condiciones adiabáticas), por tanto, es un proceso de transferencia de calor y masa [12], en el que tenemos una conversión de calor sensible (que afecta a la temperatura) en calor latente (utilizado en la evaporación del agua). Esta transferencia ocurrirá hasta que saturemos el aire y las temperaturas del aire y del agua coincidan y alcancen un valor nombrado “temperatura de saturación adiabática”, siendo entonces este proceso llamado “saturación adiabática” [12] y será el que rijan el funcionamiento de la mayoría de los sistemas de enfriamiento evaporativo, o, dicho de otra manera, el enfriamiento logrado en el ambiente tratado está intrínsecamente relacionado con la cantidad de agua que se evapora en el mismo.

Conceptualmente la temperatura de saturación adiabática y la temperatura de bulbo húmedo son diferentes, pero en los intervalos habitualmente utilizados en los sistemas de climatización son muy próximas entre sí, por lo que se suele hablar o utilizar la temperatura de bulbo húmedo por ser muy fácil su medida, ya que solo se necesita un termómetro en el que el bulbo se mantenga envuelto en un paño de algodón empapado en agua y esté expuesto a una corriente de aire.

En cualquier proceso en el que pongamos aire en contacto con agua, que es recirculada de forma continua y sin que reciba un aporte externo de energía, es decir, que el agua no se esté enfriando o calentando porque sufra un proceso intermedio en vez de recircularse directamente, el resultado será el de una evolución prácticamente adiabática del aire hacia condiciones próximas a saturación (Figura 9).

2. Enfriamiento evaporativo

Dadas las características ya descritas del fenómeno, no solo es válido para la climatización y acondicionamiento de espacios, sino que también el enfriamiento evaporativo se puede aplicar en la mejora de muchos procesos industriales, ya que resulta más fácil enfriar con agua o aire frío que con aire caliente. En particular, en las instalaciones de climatización y acondicionamiento de aire se suele utilizar para reducir o eliminar la demanda energética de adecuación térmica en edificios. Asimismo, es adecuado en aplicaciones en las que se requieren tanto enfriamiento como humidificación en verano.

En la actualidad existe una gran variedad de equipos basados en este fenómeno, por lo que en el apartado siguiente se procederá a realizar una breve revisión del estado actual de las tecnologías de este tipo de sistemas.

2.3. Estado de la técnica.

En este apartado abordaremos los diferentes sistemas de enfriamiento evaporativo que podemos encontrar en la actualidad orientados al enfriamiento del aire. La clasificación, que podemos encontrar a continuación, divide estos sistemas según sea la corriente de aire en la cual tiene lugar la evaporación del agua:

- Sistemas directos: el proceso de evaporación se da en la corriente de aire primaria o de impulsión.
- Sistemas indirectos: el proceso de evaporación se da en una corriente de aire secundaria.
- Sistemas mixtos: una combinación de los dos sistemas anteriores.

2.3.1. Sistemas de enfriamiento evaporativo directos.

Como hemos dicho antes, los sistemas de enfriamiento evaporativo directo se caracterizan porque el fenómeno sucede en la propia corriente de aire a acondicionar, que será tratada en cuanto a temperatura y también verá modificada su humedad relativa. Como se puede observar en la Figura 10, el aire del espacio a acondicionar (aire primario sin tratar) pasa directamente por el equipo de enfriamiento evaporativo poniéndose en contacto con el agua (donde se produce el intercambio de calor sensible a calor latente) y a la salida del sistema obtenemos esa misma corriente de aire primario ya tratada, todo ello siguiendo un proceso adiabático (Figura 9) según se ha descrito en los fundamentos del enfriamiento evaporativo.

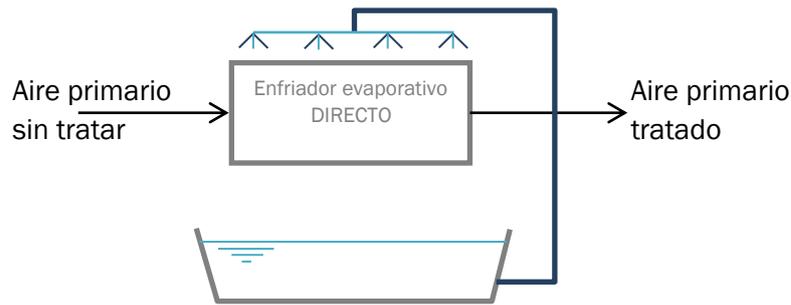


Figura 10 - Esquema de los sistemas evaporativos directos [15].

En este tipo de sistemas es interesante aumentar, en lo posible, la superficie de contacto donde se produce el intercambio de calor y masa, puesto que este intercambio necesario para el fenómeno de enfriamiento evaporativo es proporcional a esa superficie de contacto.

Una de las limitaciones de funcionamiento en estos equipos, como ya se ha comentado en el apartado de los fundamentos del enfriamiento evaporativo, viene dada por la temperatura de saturación adiabática. La temperatura de saturación adiabática es la mínima temperatura que obtendríamos con un equipo de enfriamiento evaporativo directo con un 100% de eficiencia y dependerá de las condiciones de entrada de aire al equipo. Si el aire que entra al equipo ya contiene una humedad relativa alta y, en consecuencia, su temperatura estará más cerca de la temperatura de saturación adiabática, no será posible evaporar gran cantidad de agua en esa corriente de aire y no se alcanzará una disminución notable de la temperatura. Otra de las limitaciones de estos equipos es que si para el espacio que se necesita acondicionar no es admisible un aumento de la humedad relativa, entonces el uso de este tipo de equipos queda anulado.

Según el medio de humectación, los sistemas de enfriamiento evaporativo directos pueden atender a la siguiente clasificación [12]:

- De paneles evaporativos: Generalmente fabricados en fibras tratadas de manera química contra el crecimiento de microorganismos. Suelen instalarse sobre marcos de metal o plástico.
- De relleno rígido: Constituidos por placas rígidas y corrugadas que pueden estar fabricadas en una gran variedad de materiales, como, por ejemplo: plástico, celulosa, fibra de vidrio, etc. Es en estas placas donde se ponen en contacto las corrientes de agua y de aire a tratar en forma de flujo cruzado, los canales horizontales serían usados para el aire y los verticales para el agua (Figura 11).
- Rotativos: El medio de humectación es en forma de rueda rotativa accionada por un motor y cuya parte inferior se sumerge en un depósito de agua.

2. Enfriamiento evaporativo

- Pulverización directa: Se pulveriza el agua directamente en la corriente de aire primario (Figura 12.a y 12.b).



Figura 11 - Parte posterior de un equipo de enfriamiento evaporativo de relleno rígido. (Fuente propia).



Figura 12 - Sistemas de micropulverización de agua de la línea Mist&Fog de la empresa Termigo [17].

Por ser bastante habituales en los espacios abiertos los sistemas de pulverización, a continuación, se van a recopilar algunas ideas relativas a ellos. Pueden trabajar directamente con agua de red o pueden utilizar una bomba para aumentar la presión del agua que se conduce hasta unas boquillas donde se produce la micronización de la corriente de agua para favorecer su evaporación y no trabajan con recirculación del agua. Su eficacia es elevada, pero presentan problemas ligados a su funcionamiento que pueden ser causa de gran malestar para las personas que se encuentren en el lugar donde operen estos sistemas, como, por ejemplo: la formación de grandes gotas por el choque de varios aerosoles (o por una mala operación de las boquillas), o, el riesgo de

contaminación bacteriológica por *Legionella* si el sistema recircula agua o no queda vacío de la misma cuando deja de funcionar [15],[18]. Por lo tanto, el diseño y sobre todo el mantenimiento de estos sistemas cobran muchísima importancia.

2.3.2. Sistemas de enfriamiento evaporativo indirectos.

Si el espacio que se desea acondicionar no permite un aumento en la humedad relativa, entonces se recurre a los sistemas de enfriamiento evaporativo indirectos. Podemos tener dos configuraciones diferentes según donde ocurra el proceso de enfriamiento evaporativo según se puede observar en la Figura 13.

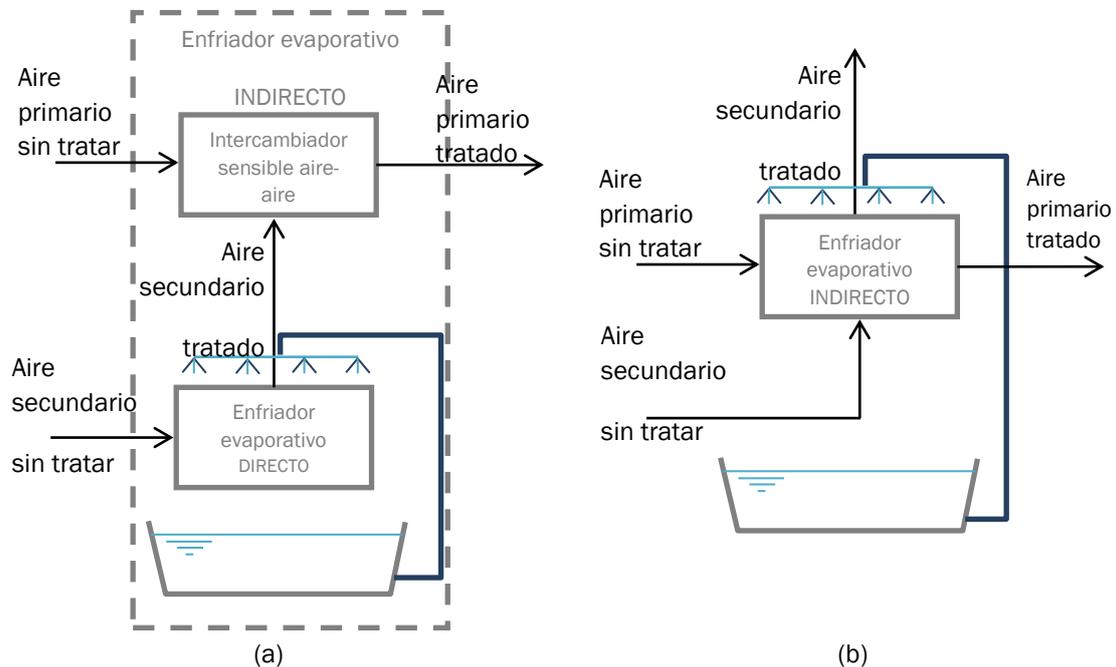


Figura 13 - Diferentes formas de integrar el enfriamiento evaporativo indirecto: (a) antes del intercambiador y (b) en el mismo intercambiador [15].

En los sistemas de enfriamiento evaporativo indirectos la evaporación del agua se efectúa en una corriente secundaria de aire, la cual sufre un enfriamiento y ve aumentada su humedad, para después ponerse en contacto ambas corrientes (la de impulsión o primaria y la secundaria) en un intercambiador, de manera que solo puedan intercambiar calor sensible y así se consiga enfriar la corriente primaria sin adición de humedad específica. Las condiciones psicrométricas de las corrientes de aire evolucionan según se puede ver en la Figura 14. Como se puede ver, la corriente de aire primario no ve modificada su humedad específica.

2. Enfriamiento evaporativo

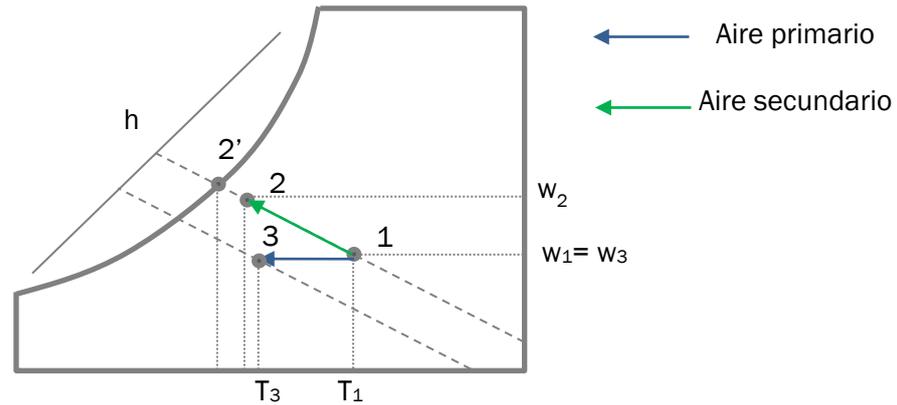


Figura 14 - Esquema de la evolución psicrométrica del aire al ser tratado en un equipo de enfriamiento adiabático indirecto [15]

2.3.3. Sistemas de enfriamiento evaporativo mixtos.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo mixtos consisten en una combinación de dos o más etapas de enfriamiento evaporativo directo e indirecto, lo que permite que el fenómeno sea aplicable en muchos más casos, además de mejorar la eficiencia del proceso global [15].

La evolución psicrométrica más habitual es la que se puede ver en la Figura 15, que se corresponde con un proceso de enfriamiento indirecto seguido por uno directo, que es la configuración más habitual.

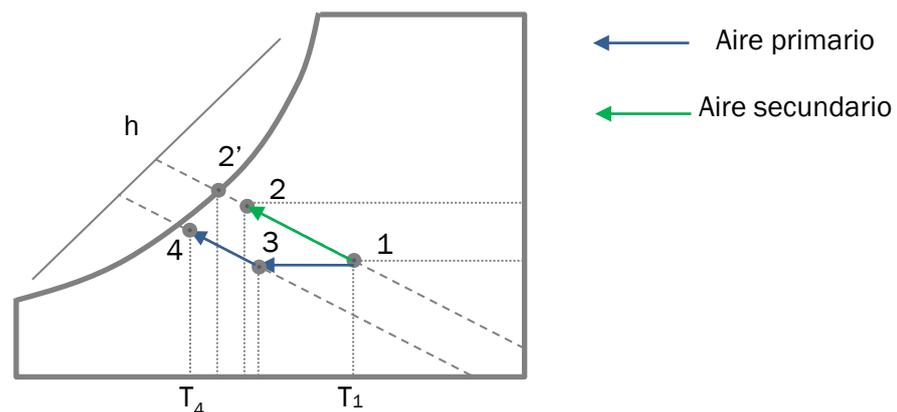


Figura 15 - Esquema de la evolución psicrométrica del aire al ser tratado en un equipo de enfriamiento mixto (indirecto-directo) [15].

3. CONFORT TÉRMICO EN EDIFICIOS.

La población europea pasa de media entre un 85% y un 90% del tiempo en interiores [19]: en casa, en el colegio, en la universidad, en el trabajo e incluso en nuestro tiempo de ocio (bares, cines, centros comerciales...) o en medios de transporte. Por lo tanto, la calidad del ambiente interior cobra vital importancia en nuestro día a día, tanto para asegurar la salud de los ocupantes como para mantener su confort. La norma UNE 171330-1:2008 [20] define la calidad ambiental en interiores como: *las condiciones ambientales de los espacios interiores, adecuadas al usuario y la actividad, definidas por los niveles de contaminación química, microbiológica y por los valores de los factores físicos*. Estas condiciones ambientales interiores (IEQ, por sus siglas en inglés) incluyen, entre otras, la calidad de la iluminación, el ruido, aspectos de ergonomía además de la calidad del clima interior (ICQ, por sus siglas en inglés), que a su vez este engloba la calidad del aire interior (IAQ, por sus siglas en inglés) y el confort térmico (Figura 16). El objetivo de las instalaciones térmicas de climatización es maximizar la calidad del clima interior (ICQ) sin comprometer los requisitos de eficiencia energética de los edificios (establecidos en las diferentes normativas asociadas) y los costes relacionados con el edificio y sus instalaciones.

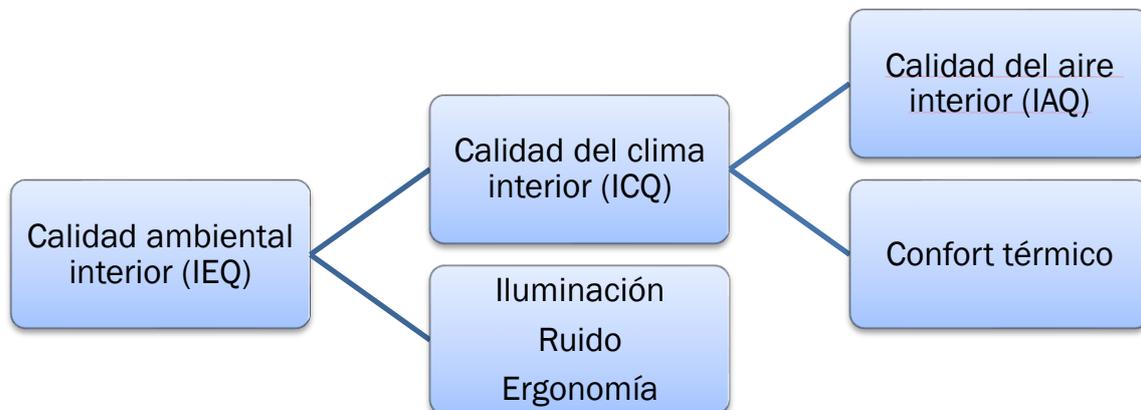


Figura 16 - Conceptos asociados a la calidad del ambiente en interiores.

En este trabajo de fin de grado nos centraremos en las condiciones que influyen sobre el confort térmico de los ocupantes de un espacio.

Las condiciones óptimas de confort para un espacio ocupado, incluidas las de confort térmico, son aquellas que se consideran como satisfactorias por la mayoría de los ocupantes; pero, por ejemplo, las condiciones de neutralidad

3. Confort térmico en edificios

térmica son diferentes entre los individuos según la vestimenta, la actividad que estén desarrollando e incluso por particularidades fisiológicas y psicológicas, por lo que un estado de confort ideal, en el que todos los ocupantes estén satisfechos es una meta difícilmente alcanzable. Así que el objetivo será satisfacer al máximo porcentaje posible de personas.

Los factores que intervienen sobre el balance térmico del cuerpo humano con el ambiente pueden clasificarse en dos categorías:

- Personales:
 - Actividad metabólica.
 - Vestimenta.
- Ambientales:
 - Temperatura seca.
 - Humedad relativa.
 - Velocidad del aire.
 - Temperatura radiante.

En la siguiente tabla, Tabla 3, se encuentran los rangos entre los que varían los factores anteriormente citados.

Tabla 3 – Rangos de variación de los factores que influyen sobre el balance térmico del cuerpo humano con el ambiente.

Parámetro	Rango
Actividad metabólica (met)	0,8 a 4
Grado de vestimenta (clo)	0 a 2
Temperatura seca del aire (°C)	10 a 30
Temperatura radiante media (°C)	10 a 40
Velocidad del aire en la zona ocupada (m/s)	0 a 1
Humedad relativa (%)	30 a 70

El estudio de las variables que afectan al confort térmico suele hacerse a través de la definición de distintos índices, que son combinación de los factores ambientales anteriores. Uno de los más habituales es la temperatura operativa, que se define como *la temperatura uniforme de un recinto negro imaginario en el intercambio de calor por radiación y convección entre este y sus ocupantes fuera igual al de un entorno no uniforme real.*

$$t_0 = (h_c t_a + h_r t_{rad}) / (h_c + h_r) \quad (E-1)$$

Siendo:

- h_c : coeficiente de transmisión de calor por convección [$Wm^{-2}K^{-1}$]
- t_a : temperatura del aire [K]
- h_r : coeficiente de transmisión de calor por radiación [$Wm^{-2}K^{-1}$]
- t_{rad} : temperatura media radiante [K]

Aunque, de manera aproximada podemos suponer que la temperatura operativa es la media aritmética entre la temperatura seca del aire y la temperatura radiante media debido a que los valores de h_c y h_r son muy próximos.

$$T_{operativa} \approx \frac{T_{aire} + T_{radiante}}{2} \quad (E-2)$$

No obstante, si la temperatura operativa y la temperatura de seca del aire no difieren entre sí más de 2 °C se puede trabajar directamente con la temperatura seca del aire.

También, para los espacios que cuentan con sistemas *HVAC* (*Heating, ventilation and air conditioning*, por sus siglas en inglés), se usan los índices de Voto Medio Previsto (VMP) y Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPI) (o, *PMV* y *PPD*, por sus siglas en inglés) que expresan la sensación térmica y el grado de insatisfacción para el conjunto del cuerpo. Para unos niveles de actividad y vestimenta determinados, estos índices asocian una combinación de factores ambientales con la valoración esperable, por parte de los ocupantes (VMP), del confort térmico y con un porcentaje de esos mismos ocupantes que lo juzgaría inaceptable (PPI). El VMP varía desde -3, que sería “Frío”, hasta +3 “muy caluroso”, siendo 0 el valor asociado a la “neutralidad térmica”. En la norma internacional EN ISO 7730 [21] se encuentra desarrollado este método de evaluación de las condiciones de confort térmico y se establecen las distintas categorías del ambiente térmico que podemos ver en la siguiente tabla, Tabla 4.

Tabla 4 – Categorías del ambiente térmico en función del VMP y el PPI. [21]

Categoría	Estado térmico del cuerpo (global)	
	PPI (%)	VMP
I	<6	-0,2 < VMP < +0,2
II	<10	-0,5 < VMP < +0,5
III	<15	-0,7 < VMP < +0,7
IV	>15	VMP < -0,7 o VMP > +0,7

3. Confort térmico en edificios

Las instalaciones térmicas de climatización o los sistemas HVAC son diseñados para conseguir, en los espacios en los que son usados, unas condiciones ambientales correspondientes a la neutralidad térmica, teniendo en cuenta las actividades que en ese espacio se vayan a desarrollar y la vestimenta de los ocupantes. Estas condiciones ambientales interiores de diseño las podemos ver en la Tabla 5, que se encuentra recogida en la *IT 1.1.4.1.2 Temperatura operativa y humedad relativa* del RITE [22] y son 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 PPI menor al 10% y asumiendo un nivel de velocidad de aire bajo (< 0.1 m/s).

Tabla 5 - Condiciones interiores de diseño según RITE*.

Estación	Temperatura operativa (°C)	Humedad relativa (%)
Verano	23...25	45...60
Invierno	21...23	40...50

*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.

Pero a esta exigencia de calidad térmica del ambiente también se le añaden condiciones que pueden provocar malestar térmico local (calentamiento o enfriamiento no deseado de alguna zona del cuerpo) como, por ejemplo: corrientes de aire (sobre todo si inciden en nuca o tobillos), gradientes verticales de temperatura, suelos calientes/fríos y asimetría radiante. Si a la Tabla 4 le añadimos estas condiciones de malestar térmico local obtenemos la siguiente tabla de categorías del confort térmico, Tabla 6.

Tabla 6 - Categorías de ambiente térmico teniendo en cuenta causa de malestar térmico local.

Categoría	Estado térmico del cuerpo en su conjunto		Incomodidad local			
	PPI (%)	VMP	PD* (%)			
			Tasa de corrientes de aire (%)	Diferencia de temperatura vertical del aire	Suelo caliente o frío	Asimetría radiante
A	<6	-0,2 < VMP < +0,2	<10	<3	<10	<5
B	<10	-0,5 < VMP < +0,5	<20	<5	<10	<5
C	<15	-0,7 < VMP < +0,7	<30	<10	<15	<10

*Porcentaje de insatisfechos (Percentage of Dissatisfied, en inglés)

También las variaciones transitorias de los parámetros ambientales como ciclos de temperatura (debidos al control de la temperatura), rampas de temperatura (ascenso o descenso de temperatura a un ritmo superior de 2°C/h) o saltos bruscos de temperatura operativa pueden ser causa de malestar térmico local.

El uso de los índices de VMP-PPI (Voto medio previsto - Porcentaje de personas insatisfechas) se suele utilizar cuando el espacio acondicionado lo es mediante sistemas de refrigeración mecánica, ya que el uso de esos índices es un método de evaluación del confort térmico exigente. Sin embargo, en un espacio sin refrigeración mecánica donde se espera que los ocupantes puedan tener control directo sobre las diferentes opciones posibles para el acondicionamiento del medio interior, como la apertura o cierre de ventanas, el uso de elementos de sombra, como persianas o cortinas, o que los ocupantes puedan abrigarse en mayor o menor medida y adaptar su nivel de actividad, es más apropiado utilizar, para la evaluación del confort térmico, un método adaptativo. En este método las personas pueden interactuar con el ambiente adaptando sus propias preferencias térmicas, modificando su comportamiento o adecuando sus expectativas en función del ambiente térmico en el que se encuentren y, por lo tanto, se asumen unos rangos más amplios de temperatura operativa aceptables.

El acondicionamiento del espacio mediante sistemas de enfriamiento evaporativo puede considerarse como climatización pasiva y por ello lo más apropiado sería el estudio del confort térmico mediante un método adaptativo (que es menos exigente). En el estudio realizado sobre un equipo evaporativo portátil, en el siguiente capítulo de este trabajo, a pesar de ser más adecuado el método adaptativo, porque se ajusta a las condiciones explicadas con anterioridad, se ha utilizado el método de VMP-PPI por ser un método más concreto que permite cuantificar el nivel de confort térmico alcanzado. Así, se recurrirá a un equipo de medida específico que proporciona directamente la información sobre el VMP y PPI. Al tratarse de un método más exigente de valoración del confort térmico que el caso del método adaptativo, trabajar con el primero nos permitirá extraer conclusiones que de ser favorables indicarán que siempre alcanzaremos el objetivo de neutralidad térmica para el mayor porcentaje de personas en el espacio acondicionado.

4. CARACTERIZACIÓN DE EQUIPOS PORTÁTILES DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN INTERIORES RESIDENCIALES.

4.1. Metodología.

Para la caracterización de equipos de enfriamiento evaporativo directo en interiores residenciales se va a analizar el efecto que produce en las condiciones interiores, tanto de temperatura como de humedad relativa, un equipo portátil de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido, *Biocool* modelo *EOLUS Mini* (Figura 17), 100 W de potencia, proporcionando 3500 m³/h de caudal de aire y para una superficie de 45 m².



Figura 17 – Equipo portátil de enfriamiento evaporativo directo, Biocool modelo EOLUS Mini [23].

Se han estudiado dos salones-comedores de dos residencias diferentes, ambas residencias son pisos situados en Valladolid. En el primer caso de estudio nos encontramos con un piso con ventanas hacia distintas orientaciones y la posibilidad de conseguir ventilación natural cruzada en la estancia de estudio. Nos referiremos a este caso como caso A. En el segundo caso, el piso cuenta con todas las ventanas hacia la misma orientación y, por lo tanto, sin posibilidad de realizar ventilación natural cruzada en la estancia donde se coloca el equipo. A este caso de estudio nos referiremos como caso B.

En el caso A, el equipo se coloca en el salón de 19,56 m², directamente frente a una ventana. En el caso B, el equipo se coloca en la puerta que comunica

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

una galería de unos 5 m² y un salón de 19,16 m². Ambas disposiciones pueden verse en la Figura 18 y en la Figura 19.



Figura 18 - Plantas de las estancias estudiadas: Caso A con ventilación cruzada, caso B sin ventilación cruzada.



(a)



(b)

Figura 19 - Disposición de los equipos en: (a) caso de estudio A y (b) caso de estudio B.

La recogida de datos, en ambos casos, se realiza durante los días del 4 al 7 de agosto de 2019. Para ello se colocaron cuatro sondas de temperatura y humedad relativa, Testo 175H1 (Figura 20), en cada casa. Estas sondas fueron calibradas previamente a la realización de este trabajo en el Laboratorio de Calor y Frío de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid para la toma de datos de este trabajo.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales



Figura 20 - Sonda de temperatura seca y humedad relativa Testo 175H1.

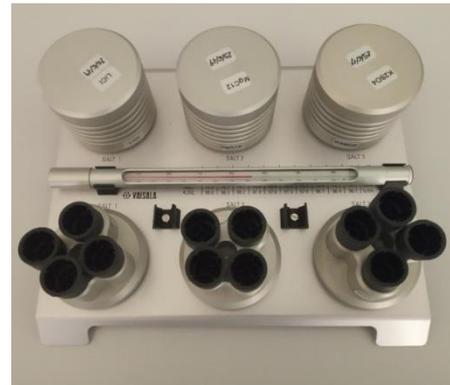
La calibración de la sonda de temperatura no es inmediata, puesto que esta es interna y no puede entrar en el horno de calibración, por lo que este proceso ha de realizarse en dos fases. En la primera fase se utiliza un horno de calibración de la marca *Fluke*, modelo 9103 (Figura 21.a), donde se calibran otras sondas de temperatura externas que sí pueden entrar en el horno. El rango de temperaturas que este horno permite calibrar es de -25°C hasta 140°C . Para la calibración se establecen rampas ascendentes y descendentes de temperatura hasta que se van alcanzando los puntos que se han establecido como referencia para la calibración. Los datos obtenidos se llevan a una hoja de cálculo para, mediante regresión lineal, obtener la ordenada en el origen y la pendiente de la recta de regresión y así poder corregir los valores medidos por la sonda externa. Una vez realizadas estas correcciones en las sondas externas se procede a la segunda fase del proceso de calibración y se colocan estas sondas externas, ya calibradas, con las sondas *Testo 175H1* en una caja térmica en la que se vuelven a realizar variaciones de temperatura y se van registrando los datos para posteriormente procesarlos en una hoja de cálculo y obtener una nueva recta de regresión y así poder corregir finalmente los valores de temperatura de las sondas internas.

Para la calibración de las sondas de humedad se ha utilizado el equipo *Vaisala Humidity Calibrator HMK15* (Figura 21.b), que utiliza tres soluciones saturadas diferentes: cloruro de litio (LiCl), cloruro de magnesio (MgCl_2) y sulfato potásico (K_2SO_4), asegurando el porcentaje de humedad relativa del aire que se encuentra en equilibrio termodinámico entre el aire y las soluciones de las sales. La sonda se va colocando sobre cada una de estas soluciones (en el orden en el que aquí se han presentado y sin llegar a mojar el sensor) y se registran las diferentes humedades. Esta humedad registrada será cada vez mayor al ir cambiando de disolución, siendo la humedad relativa del aire en equilibrio con las soluciones de sal saturadas el que se establece en el orden $\text{LiCl} < \text{MgCl}_2 < \text{K}_2\text{SO}_4$.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales



(a)



(b)

Figura 21 – Equipos usados en la calibración de las sondas Testo 175H1: (a) Horno de calibración Fluke 9103 y (b) Vaisala Humidity Calibrator HMK15

Los datos de calibración de las sondas pueden consultarse en el Anexo A que acompaña a este trabajo.

La primera sonda se colocó en la entrada de aire a la estancia, la segunda sonda en la zona ocupada (S1), la tercera sonda en una zona no ocupada (S2) y, por último, la cuarta sonda en una zona no acondicionada de la casa. Se puede ver la disposición de las sondas S1 y S2 en la Figura 18. Estas sondas registraron la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa a intervalos de 1 minuto. Además, en el caso A se usa también un equipo de medición de confort térmico, *Vivo Comfort* del fabricante *Dantec Dynamics* (Figura 22.a, 22.b y 22.c). Las características de ambos equipos pueden consultarse en la Tabla 7.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

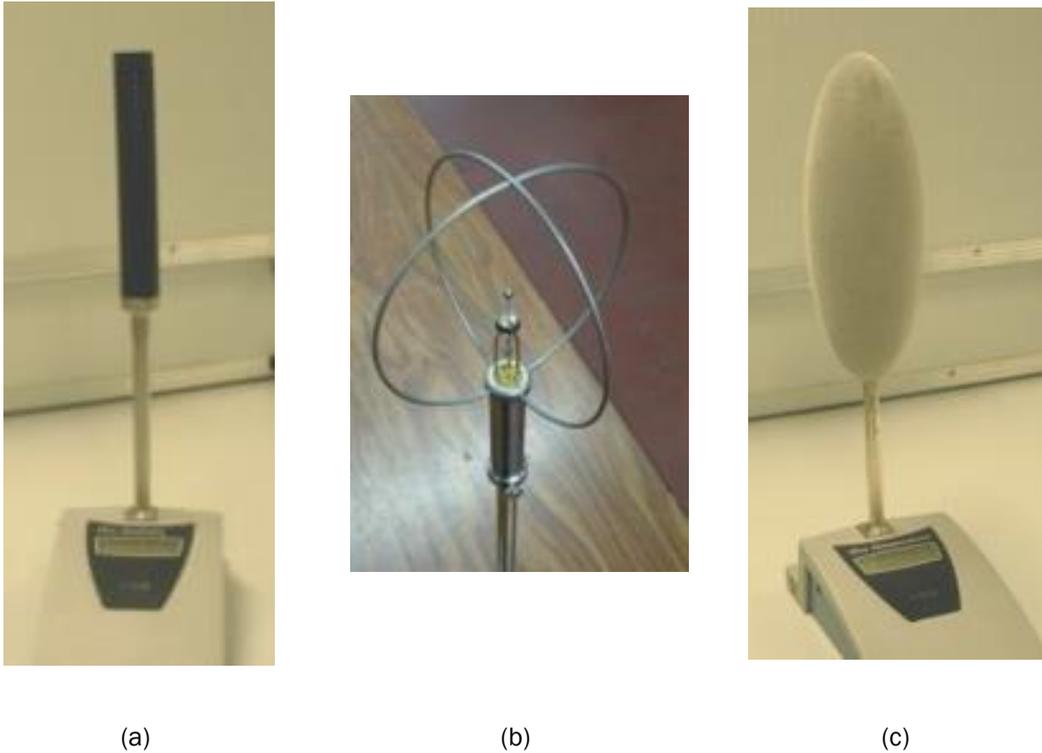


Figura 22 – Elementos que conforman el equipo de medición de confort térmico Vivo Comfort: (a) Sonda de humedad relativa, (b) Sonda de velocidad del aire (omnidireccional) y (c) Sonda de temperatura operativa.

Tabla 7 – Características de los equipos de medida.

Sensor	Parámetro	Rango	Precisión
Sonda de temperatura y humedad relativa Testo 175H1	Temperatura de bulbo seco (°C)	-20/55	±0.4 °C
	Humedad relativa, HR (%)	0/100	±2% HR (desde 2 a 98% HR a +25 °C)
Equipo de medición de confort térmico, Vivo Comfort de Dantec Dynamics	Velocidad del aire, v (m/s)	0.05/1.0	<1 m/s: ±0.01 m/s, ±0.0.25v >1 m/s: ±0.1v
	Temperatura operativa (°C)	0/45	0-10 °C: ±0.5 K 10-40 °C: ±0.2 K 40-45 °C: ±0.5 K

Los datos de las condiciones exteriores han sido proporcionados por una estación meteorológica perteneciente al edificio LUCIA de la Universidad de Valladolid, a 1.3 km de la residencia del caso A y a 0.85 km de la residencia del caso B.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

En los diferentes días de ensayos que se recogen en este trabajo existen algunas discrepancias puntuales entre horarios de apertura de ventanas o arranques y paradas de equipo, que no es lo recomendable cuando después se va a realizar una comparación de resultados, pero recordamos que estos han sido ensayos en entornos reales, no en un ambiente controlado como el de un laboratorio. El uso de los espacios utilizados es diverso y se adapta a las necesidades del momento, por lo que no se ha obligado a los ocupantes a atenerse estrictamente a las pautas propuestas. Lo que sí se ha realizado es el registro, dentro de lo posible, de esas diferentes actuaciones en unas tablas que reúnen las diferentes condiciones para cada día de ensayos y que se presentan a continuación.

El primer día, 4 de agosto, a partir de ahora día 0, solo se toman datos como referencia. En ese día, el equipo de enfriamiento evaporativo se mantiene apagado y las ventanas del piso cerradas la gran parte del tiempo de toma de datos. Las condiciones del ensayo pueden verse recogidas en la Tabla 8.

Tabla 8 – Condiciones de toma de datos del día 0.

04/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado de las ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado de las ventanas de la estancia	Anotaciones
11:45	Apagado	Cerradas		Apagado	Abiertas	Labores limpieza suelo.
14:15	Apagado	Cerradas		Apagado	Cerradas	
14:35	Apagado	Cerradas		Apagado	Cerradas	
23:30	Apagado	Abiertas	Free-cooling nocturno.	Apagado	Cerradas	

El objetivo del día 1 es el estudio del funcionamiento del equipo durante periodos de tiempo amplios y con las ventanas de la estancia y de diferentes lugares de la casa de abiertas, para permitir la renovación de aire y comprobar si existe influencia de la ventilación cruzada en la variación de las condiciones mientras el equipo está en funcionamiento. En la Tabla 9 pueden verse las condiciones de los ensayos utilizadas en el día 1.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 9 - Condiciones de toma de datos del día 1.

05/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
0:00	Apagado	Cerradas	Fin free-cooling.	Apagado	Cerradas	
7:30	Apagado	Abiertas	Ocupación: 1 persona, 2 met (de 7:30 a 7:50). Ventilación.	Apagado	Cerradas	
8:50	Apagado	Cerradas		Apagado	Cerradas	
12:00	Apagado	Cerradas		Apagado	Abiertas	Todo abierto (salón, cocina, dormitorio)
13:10	Encendido de equipo	Abiertas	Ventanas abiertas desde 13:00.	Apagado	Abiertas	
13:12	Encendido	Abiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Todo abierto (salón, cocina, dormitorio)
13:45	Encendido	Abiertas	Inicio del modo "swing" olvidado.	Encendido	Abiertas	
14:00	Encendido	Abiertas	Ordenador encendido y comienzo medidas equipo confort.	Encendido	Abiertas	
14:35	Parada de equipo	Cerradas	Entre 14:35-14:40 se aparta el PC.	Encendido	Abiertas	
14:50	Apagado	Cerradas		Parada de equipo	Cerradas	Todo cerrado (salón, cocina, dormitorio)
16:05	Encendido de equipo	Abiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Todo abierto (salón, cocina, dormitorio)
17:39	Encendido	Abiertas	Ventana del estudio cerrada (opuesta a la de toma de aire)	Encendido	Abiertas	Abierto salón y dormitorio (cocina cerrada)
18:30	Encendido	Abiertas	Ventana del estudio abierta de nuevo	Encendido	Abiertas	
18:35	Encendido	Abiertas		Parada de equipo	Cerradas	Todo cerrado (salón, cocina, dormitorio)
18:40	Encendido	Abiertas	Cambio de lado del apantallamiento de la sonda de toma del aire - parece afectar mucho	Apagado	Cerradas	
18:42	Parada de equipo	Cerradas		Apagado	Cerradas	
18:50	Apagado	Cerradas		Apagado	Abiertas	

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 9 - Condiciones de toma de datos del día 1 (Continuación).

05/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
19:00	Apagado	Cerradas	Salón ocupado por una persona.	Apagado	Abiertas	
19:10	Encendido de equipo	Abiertas		Encendido de equipo	Abiertas	EQUIPO EN LA PUERTA DEL SALÓN (Puertas y ventanas terraza salón abierta, dormitorio abierto)
19:13	Encendido	Abiertas	Fin equipo confort. Ordenador apagado.	Encendido	Abiertas	
20:05	Parada de equipo			Encendido	Abiertas	
20:30	Apagado			Parada de equipo	Cerradas	Ropa húmeda tendida en terraza. Ventana dormitorio cerrada, puerta terraza cerrada, pero se dejan ventanas terraza abiertas
23:00	Apagado	Abiertas	Apertura ventanas para free-cooling nocturno	Apagado	Cerradas	

El día 2, se mantuvieron las ventanas parcialmente abiertas durante la noche previa a la recogida de datos, aprovechando la variación de temperatura que se da entre el día y la noche en verano en Valladolid. El objetivo de este día era el estudio del funcionamiento del equipo con las ventanas de la estancia cerradas, sin permitir la renovación de aire, para comprobar su influencia en las condiciones medidas, pero ya en la primera arrancada del equipo se comprobó como la humedad relativa adquiría valores por encima del 70%, hecho que puede acarrear efectos adversos en la salud [24], [25], por lo que se constató que para el acondicionamiento de espacios interiores con equipos de enfriamiento evaporativo es necesaria la renovación del aire interior, por esta razón el resto de toma de datos se hace de manera similar a la del día 1. En la Tabla 10 pueden verse las condiciones de los ensayos utilizadas en el día 2.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 10 - Condiciones de toma de datos del día 2.

06/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
0:45	Apagado			Apagado	Abiertas	Ventana dormitorio abierta.
7:30	Apagado	Abiertas	El día parece nublado	Apagado	Abiertas	
8:30	Apagado	Cerradas		Apagado	Abiertas	
12:00	Apagado	Cerradas	Comienzo medidas equipo confort (2 personas)	Apagado	Abiertas	
12:10	Apagado	Cerradas		Apagado	Cerradas	
12:11	Encendido de equipo	Cerradas		Apagado	Cerradas	
12:12	Encendido	Cerradas		Encendido de equipo	Cerradas	
12:45	Encendido	Cerradas	2 personas en el salón	Encendido	Cerradas	
12:48	Encendido	Cerradas		Encendido	Cerradas	
12:50	Parada de equipo	Cerradas		Parada del equipo	Cerradas	
13:30	Apagado	Cerradas	Entrada puntual a revisar	Apagado	Cerradas	
14:00	Apagado	Abiertas	Apertura ventanas	Apagado	Abiertas	
14:18	Encendido de equipo	Entreabiertas	Caída brusca humedad ya estaba estable. La sonda alejada medía 27°C, igual que la de toma de aire.	Apagado	Abiertas	
14:20	Encendido	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	1 persona en salón.
15:52	Encendido	Entreabiertas	Se abre un poco más la ventana. La sonda más próxima (en "zona ocupada") supera el 70% de humedad.	Encendido	Abiertas	1 persona en salón.
16:20	Parada del equipo	Cerradas	De 15:52 a 16:20, una persona en la habitación contigua con otro PC	Parada del equipo	Abiertas	1 persona en salón.
16:40	Apagado	Cerradas		Apagado	Cerradas	Ventana dormitorio cerrada. Horno en la cocina encendido.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 10 - Condiciones de toma de datos del día 2. (Continuación)

06/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
17:35	Apagado	Cerradas	Entrada a revisar	Apagado	Cerradas	
18:00	Apagado	Cerradas	A las 18.17 PC en la mesa. Fin medidas confort	Apagado	Cerradas	
20:20	Apagado	Cerradas	3 personas y un PC	Apagado	Cerradas	
20:50	Encendido de equipo	Entreabiertas	Comienzo funcionamiento del equipo	Apagado	Cerradas	
21:05	Encendido	Entreabiertas		Apagado	Abiertas	
21:25	Parada del equipo			Apagado	Abiertas	
23:20	Apagado	Abiertas	Apertura total ventanas	Apagado	Abiertas	

En el día 3, el equipo es utilizado a lo largo de todo el día en periodos cortos de tiempo y con las ventanas abiertas para la circulación del aire. En la Tabla 11 pueden verse las condiciones de los ensayos utilizadas en el día 3.

Tabla 11 - Condiciones de toma de datos del día 3.

07/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
8:50	Apagado	Entreabiertas	Cierre parcial de ventanas (batientes)	Apagado	Abiertas	
10:10	Apagado	Cerradas	Cierre total ventanas	Apagado	Abiertas	
10:22	Apagado	Cerradas	Comienzo medidas equipo confort	Apagado	Abiertas	
12:15	Encendido de equipo	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Ventana dormitorio abierta
12:45	Parada del equipo	Cerradas		Parada del equipo	Cerradas	Ventana dormitorio cerrada
13:15	Encendido de equipo	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Ventana dormitorio abierta

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 11 - Condiciones de toma de datos del día 3. (Continuación)

07/08/2019	CASO A			CASO B		
HORA	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones	Estado del equipo	Estado ventanas de la estancia	Anotaciones
13:45	Parada del equipo	Cerradas	(Se me olvida la ventana del estudio, enfrente, batiente)	Parada del equipo	Cerradas	Ventana dormitorio cerrada
14:15	Encendido de equipo	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Ventana dormitorio abierta
14:45	Parada del equipo	Cerradas		Parada del equipo	Cerradas	Ventana dormitorio cerrada
15:19	Encendido de equipo	Entreabiertas		Apagado	Cerradas	
15:25	Encendido	Abiertas		Encendido de equipo	Abiertas	1 persona en salón. Ventana dormitorio abierta
15:57	Parada del equipo	Cerradas	2 personas por el salón.	Parada del equipo	Cerradas	1 persona en salón. Ventana dormitorio cerrada
16:30	Encendido de equipo	Entreabiertas	2 personas por el salón	Encendido de equipo	Abiertas	1 persona en salón. Ventana dormitorio abierta
17:00	Parada del equipo	Cerradas		Parada del equipo	Cerradas	1 persona en salón. Ventana dormitorio cerrada
17:07	Apagado	Cerradas	Queda una persona en el salón	Apagado	Cerradas	
17:30	Encendido de equipo	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	Ventana dormitorio abierta
17:59	Parada del equipo	Cerradas		Parada del equipo	Cerradas	1 persona en salón. Ventana dormitorio cerrada.
18:31	Encendido de equipo	Entreabiertas		Encendido de equipo	Abiertas	1 persona en salón. Ventana dormitorio abierta
19:00	Parada del equipo	Abiertas		Parada del equipo	Abiertas	1 persona en salón. Se mantienen abiertas las ventanas y puertas
19:20	Apagado	Abiertas	1 persona con PC en el salón			

4.2. Resultados y discusión.

Antes de proceder con los análisis y los resultados de los ensayos de los diferentes días se van a hacer unas consideraciones sobre las diferentes zonas de la casa y las sondas ahí colocadas.

La entrada de aire en el caso A es una ventana situada en la misma estancia que se va a acondicionar con el equipo. La sonda aquí ubicada recibe el aire del exterior (cuando la ventana está abierta) pero también del interior (espacio que se va a acondicionar), es por ello que la gráfica generada con los datos (temperatura y humedad relativa) de la entrada de aire adquiere una forma similar a la de la zona ocupada y a la de la zona no ocupada, aunque estas se diferencian de la entrada de aire y entre ellas mismas de manera significativa en los valores que toman y los saltos que se producen en ellas, como se puede comprobar en la Figura 23.a y 23.c, en la Figura 24.a y 24.c, en la Figura 30.a y 30.c y en la Figura 36.a y 36.c. La entrada de aire en el caso B es una galería cerrada, cuyo cerramiento consiste en un muro de ladrillo de 65 cm de altura, por encima de este unas ventanas fijas y por encima de estas unas ventanas correderas con carpintería de aluminio; eso sumado a la orientación de la casa, hace que en verano en esta galería se produzca un efecto invernadero, por lo que la sonda colocada en esta zona alcanza valores alejados de lo marcado por la Tabla 5 y toma una forma bastante diferente del resto de gráficas (Figura 23.b y 23.d, en la Figura 24.b y 24.d, en la Figura 30.b y 30.d y en la Figura 36.b y 36.d). Sin embargo, en este caso de estudio, las gráficas de la zona ocupada y de la no ocupada son muy similares entre sí en forma, pero también en los valores que toman.

La zona ocupada es la zona más cercana al equipo y donde se espera la presencia de personas y la zona no ocupada es la más alejada del equipo y donde no se espera la presencia de personas o tiene muy baja probabilidad de que esto ocurra.

La zona no acondicionada, en el caso A, es una habitación opuesta (no directamente) a la de la estancia de estudio y la sonda se coloca en cerca de la ventana, por lo que en los momentos en los que se tiene la ventana abierta es, a la vez, salida de aire interior y entrada de aire exterior. En el caso B, esta zona es el inicio de un pasillo entre la puerta de entrada y el resto de las estancias de la casa. Las sondas aquí colocadas nos permitirán observar si el ambiente de estas zonas se ve afectado o no por el funcionamiento de los equipos por el hecho de la existencia de ventilación cruzada.

A continuación, se van a presentar los análisis de los diferentes días de ensayo, apoyados por los datos correspondientes de las condiciones de temperatura y humedad relativa recogidas. Cada día de ensayo persigue un objetivo diferente como se ha comentado en el apartado de metodología y que se volverá a recordar en cada apartado. En estos análisis, en la zona en la que más

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

vamos a incidir para la obtención de resultados será la de la zona ocupada por ser donde encontramos los cambios más significativos y ser la más interesante para el estudio del confort de las personas.

4.2.1. Ensayos día 0.

Como ya se ha comentado, este día el equipo de enfriamiento evaporativo no fue puesto en funcionamiento en ningún momento y las ventanas permanecieron cerradas la mayor parte del día para poder realizar una toma de datos (temperatura y humedad relativa de las diferentes zonas) que sirviese como referencia para los ensayos de días posteriores.

En la Figura 23, que se presenta a continuación, puede verse la evolución de las temperaturas y humedades relativas en los dos casos de estudio durante el día 0.

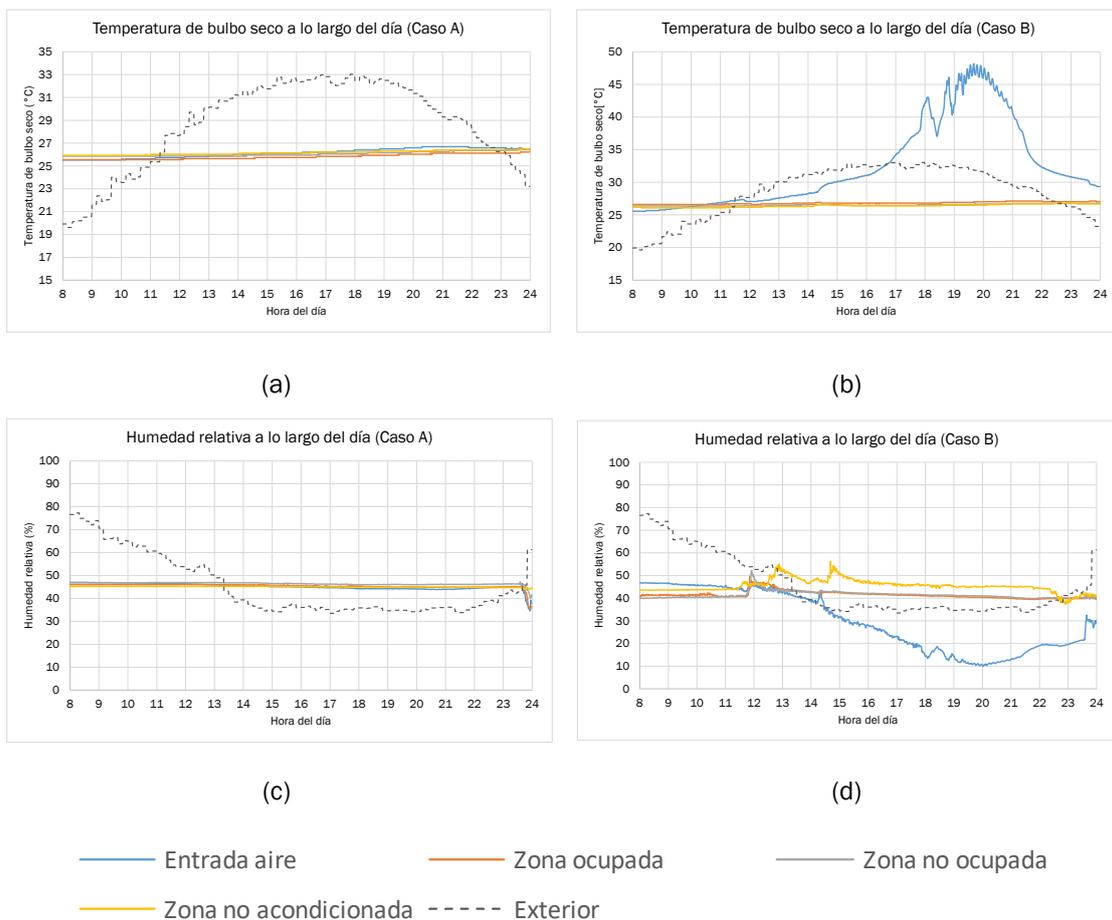


Figura 23 – Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 0.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

En el caso A (caso de estudio con ventilación cruzada) podemos observar que la temperatura se mantiene prácticamente estable, con un valor promedio de 25,8°C en la zona ocupada pero muy similar al resto de zonas (Figura 23.a), al igual que ocurre con la humedad relativa que se mantiene en un promedio de 45% (Figura 23.c).

En el caso B (sin ventilación cruzada), tenemos que la temperatura en las zonas interiores también se mantiene prácticamente estable, con un promedio de 26,8°C (Figura 23.b), 1°C más que en el caso A. Alrededor de las 11:45 – 12:00 puede verse como la humedad relativa en las zonas interiores aumenta ligeramente debido a labores de limpieza del suelo (Figura 23.d). Hacia las 13:00 y hacia las 15:00 pueden verse también unos incrementos en la humedad relativa de la zona no acondicionada: esta sonda está próxima a la puerta de entrada a la vivienda, por lo que es posible que estos incrementos sean debidos a actividades propias de la vivienda como pueden ser el uso de la ducha o el uso de la cocina y que el flujo de aire no haya seguido los caminos previstos por la ventilación general de la vivienda.

4.2.2. Ensayos día 1.

Como hemos dicho antes, el objetivo de este día es el estudio del funcionamiento del equipo durante periodos de tiempo amplios y con las ventanas de las estancias abiertas, para comprobar cómo influye el aporte de aire fresco y si una ventilación cruzada marca diferencia en el acondicionamiento de los espacios con el uso de estos equipos.

En la Figura 24, que se presenta a continuación, puede verse la evolución de las temperaturas y humedades relativas en los dos casos de estudio durante el día 1.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

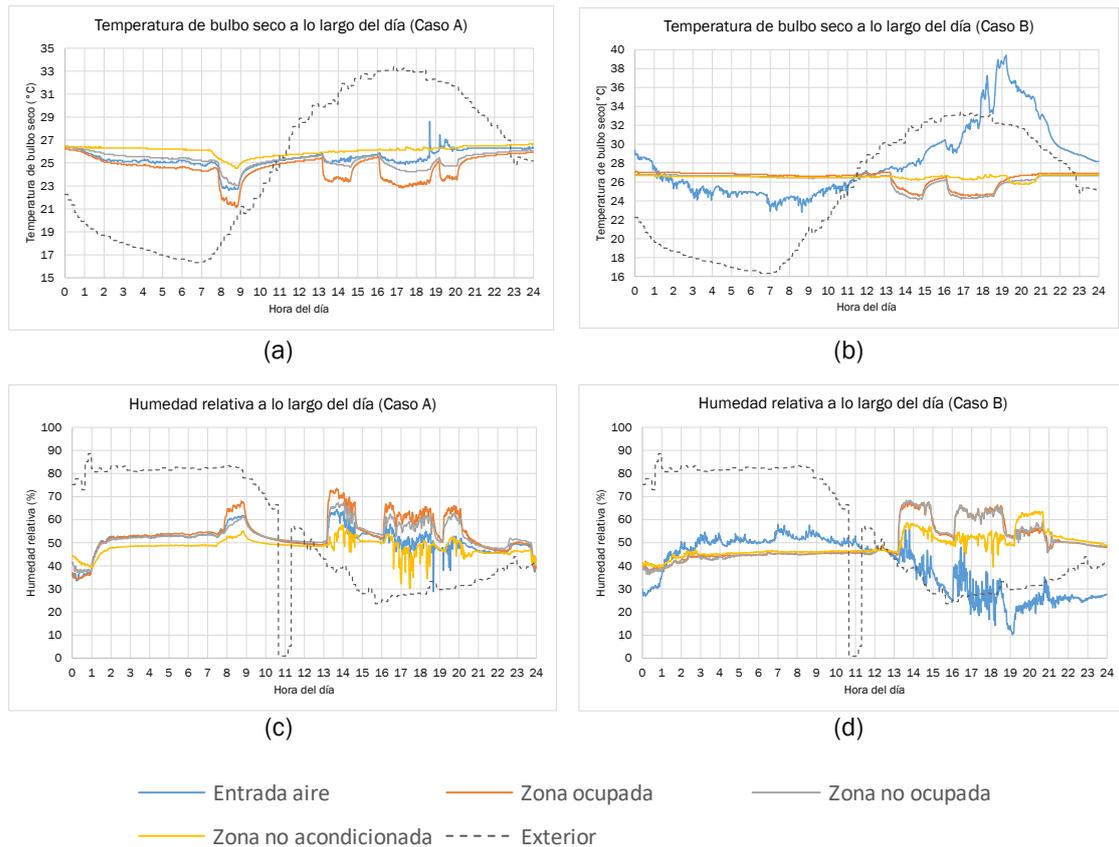


Figura 24 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 1.

En el caso A (Figura 24.a y 24.c), durante la noche se mantienen las ventanas cerradas. Las condiciones en la zona ocupada se mantienen a un promedio de 25 °C y 55% de humedad relativa. A las 7:30 se abren ventanas y se inicia una pequeña práctica deportiva en la estancia, lo que coincide con un ligero aumento de la temperatura, pero una vez finalizada esta actividad, a las 7:50, se registra el primer descenso significativo en la temperatura; en 10 minutos la temperatura desciende 2,2 °C y a partir de ahí se mantiene a un promedio de 21,6 °C hasta el cierre de las ventanas. A la par del descenso de la temperatura, la humedad relativa aumenta al entrar aire del exterior (con mayor humedad relativa) pero se mantiene por debajo del 70%. A las 8:50 se cierran las ventanas y se mantienen así hasta las 13:00, momento en el que la temperatura está estabilizada a 25,4 °C y la humedad relativa al 49%.

En el caso B (Figura 24.b y 24.d) también se mantienen todas las ventanas cerradas por la noche y hasta las 12:00 del mediodía. En este periodo la temperatura promedio es de 26,8 °C, 1,8 °C más que en el caso A, y la humedad relativa promedio es de 45%. Una vez abiertas las ventanas a las 12:00 y hasta las 13:12 se observa una ligera variación en la temperatura y en la humedad relativa en función de las condiciones exteriores, que esta variación sea tan poco notable puede ser consecuencia de que todas las ventanas estén orientadas hacia el mismo lugar y no se generen corrientes cruzadas, por lo que el aire no circula en la

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

casa con la misma facilidad que en una vivienda con la posibilidad de generar corrientes cruzadas.

4.2.2.1. Primera puesta en funcionamiento del equipo.

A las 13:10 se pone en funcionamiento el equipo en el caso A (Figura 24.a y 24.c). En 10 minutos se consigue un descenso de temperatura de 2 °C en la zona ocupada y 10 minutos después se mantiene prácticamente constante, a 23,6 °C de promedio, hasta la parada del equipo. Este descenso de temperatura también se observa, aunque no de manera tan notable, en el resto de las zonas; excepto en la zona no acondicionada, que no se percibe descenso, ya que la sonda está colocada en una ventana por la que puede salir aire tratado desde el interior o entrar aire (más caliente) del exterior, indistintamente. La humedad relativa tarda 8 minutos en alcanzar valores ligeramente por encima del 70%, pero al activar el modo “swing” (movimiento automático de oscilación de las lamas del equipo), la humedad comienza a bajar del 70% y se mantiene en valores entre el 63% y el 70%. En la zona no acondicionada a pesar de que no refleja cambio de temperatura, como hemos comentado, sí que se ve afectada su humedad relativa. Una vez apagado el equipo y cerrado las ventanas, a las 14:35, en la zona ocupada la temperatura tarda 45 minutos en estabilizarse y alcanzar un promedio de 25,4 °C. El mismo tiempo tarda la humedad en caer a valores en torno al 54%.

En el caso B (Figura 24.b y 24.d), el equipo se pone en marcha a las 13:12 y se parte de 27 °C y 45%, en la zona ocupada. En los 10 primeros minutos se consigue un descenso de 0,9 °C. La temperatura sigue descendiendo y no es hasta pasados 55 minutos que la temperatura alcanza un estado prácticamente estable, con un promedio de 25 °C. La zona no acondicionada sufre un mínimo descenso en la temperatura. Respecto a la humedad relativa son necesarios 18 minutos para llegar a un estado relativamente estable con pequeñas variaciones, en la zona ocupada, mientras que la zona no acondicionada sí registra variación en las condiciones de humedad relativa, a pesar de no existir ventilación cruzada. A las 14:50 se para el equipo y se cierran ventanas. La temperatura tarda 45 minutos en estabilizarse y alcanzar 26 °C de promedio y la humedad relativa tarda 30 minutos hasta tomar de promedio el 53%, todo ello en la zona ocupada.

En la Tabla 12 y Tabla 13 encontramos resumida la información más importante de ambos casos.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 12 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del primer ensayo del día 1.

Parámetro	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,5	27
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,4	24,6
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-2,1	-2,4
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	49	45
Condiciones finales de humedad relativa (%)	66	65
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+17	+20

Tabla 13 – Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el primer ensayo del día 1.

Estado	Parámetro	Caso A	Caso B
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	2	0,9
	Aumento humedad relativa (%)	23	20
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	20	65
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	23,6	25
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No alcanza estabilidad.	18
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	Fluctúa entre el 63 y el 70	66
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	45	45
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	25,4	26
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	45	30
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	54	53

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.2.2. *Segunda puesta en funcionamiento del equipo.*

A las 16:05 se procede al segundo arranque de los equipos.

En el caso A (Figura 24.a y 24.c), en los primeros 10 minutos de funcionamiento en la zona ocupada, se consigue un descenso de $1,8^{\circ}\text{C}$ y unos 30 minutos después se alcanza un estado en el que la temperatura permanece estable, a $23,1^{\circ}\text{C}$ de promedio. En ese primer intervalo de tiempo la humedad relativa pasa de un 52% a un 63% y a partir de ahí fluctúa entre el 58% y 68%. Igual que en el primer arranque, la temperatura de la zona no acondicionada apenas sufre modificaciones mientras que se registran importantes fluctuaciones de la humedad relativa. A las 18:42 el equipo se para, se cierran ventanas y, en la zona ocupada, se tardan 28 minutos en alcanzar un máximo de $25,2^{\circ}\text{C}$, a la vez que la humedad relativa cae del 60% a un mínimo del 50%. No se alcanzan valores estables por la necesidad de realizar un tercer ensayo con el equipo.

Para la zona ocupada del caso B (Figura 24.b y 24.d), en los primeros 10 minutos de funcionamiento el descenso en la temperatura es de $1,3^{\circ}\text{C}$ y 25 minutos después se alcanza una temperatura bastante estable con un promedio de $24,7^{\circ}\text{C}$. La humedad relativa aumenta un 12% en los primeros 10 minutos, del 52% al 64%, y a partir de ese momento fluctúa entre valores del 58% y el 66%. Al igual que en el apartado anterior, en la zona no acondicionada la temperatura registra unas ligeras variaciones mientras que la humedad relativa claramente se ve afectada. A las 18:35 se para el equipo y vemos como la temperatura aumenta y sí que alcanza un estado estable hasta el final de la noche, en la zona ocupada, a pesar de realizar un ensayo más. En este tercer ensayo en el caso B, se decidió cambiar el equipo de sitio para comprobar si se medía algún cambio más relevante en las condiciones de la zona no acondicionada. Una vez acabado este segundo ensayo, la humedad cae en 15 minutos un 12% y se mantiene estable hasta el tercer arranque, que a diferencia de la temperatura esta sí se ve ligeramente aumentada.

En la Tabla 14 y Tabla 15 encontramos resumida la información más importante de ambos casos.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 14 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del segundo ensayo del día 1.

Parámetro	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,5	26,6
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,4	24,8
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-2,1	-1,8
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	52	52
Condiciones finales de humedad relativa (%)	60	65
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+8	+13

Tabla 15 – Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el segundo ensayo del día 1.

Estado	Parámetro	Caso A	Caso B
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	1,8	1,3
	Aumento humedad relativa (%)	11	12
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	40	35
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	23,1	24,7
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No alcanza estabilidad	No alcanza estabilidad
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	Fluctúa entre el 58 y el 68	Fluctúa entre el 58 y el 66
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	No estabilidad por cercanía con el último ensayo.	85 (estabilidad por cambio de sitio del equipo)
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	25,2 (máxima temperatura)	26,9
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No estabilidad por cercanía con el último ensayo	15
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	50 (mínima humedad)	53

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.2.3. Tercera puesta en funcionamiento del equipo.

Como hemos comentado en el apartado anterior, en el tercer arranque del equipo del caso A (Figura 24.a y 24.c) no se parten de condiciones estables por no disponer del tiempo necesario para realizar las dos acciones. Comenzamos este ensayo, en la zona ocupada, con 25,2°C de temperatura y en 10 minutos ya se alcanza un estado estable en la temperatura de 23,7°C de promedio. Respecto a la humedad relativa partimos de un 50%, en 3 minutos aumenta un 9%, 7 minutos después aumenta un 4%, y 5 minutos después se alcanza un estado con ligeras fluctuaciones en el que tenemos un 64% de promedio. Al igual que en los ensayos anteriores, la temperatura de la zona no acondicionada no presenta apenas variaciones al contrario que la humedad relativa que sí registra fluctuaciones. A las 20:05 se para el equipo y, en la zona ocupada, en 45 minutos se produce el mayor aumento de temperatura, 2°C, y a partir de ahí alcanzar un estado prácticamente estable ya que la temperatura aumenta 0,1°C cada 35 o 40 minutos, aproximadamente, hasta el final de la noche. Respecto a la humedad relativa, aproximadamente en 60 minutos se llega a un valor estable, con un promedio del 47%.

En el caso B (Figura 24.b y 24.d), se decide cambiar el equipo de lugar para comprobar si en esta nueva situación la zona no acondicionada se vería afectada, puesto que en relación con la temperatura esta zona apenas sufre cambios en los anteriores ensayos, no así respecto a la humedad relativa en la que sí se aprecian variaciones durante el resto de los ensayos. Se aprecia durante este tiempo que la temperatura apenas disminuye 1°C. La humedad, por el contrario, sí se ve más afectada, pasando en 20 minutos de un 49% a un 61%.

En la Tabla 16 y Tabla 17 encontramos resumida la información más importante de este tercer ensayo (solo se incluye el caso A, puesto que al cambiar de posición el equipo en el caso B los ensayos no pueden ser comparados).

Tabla 16 - Resumen de las condiciones iniciales y finales de la zona ocupada del tercer ensayo del día 1.

Parámetro	Caso A
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,2
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,5
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-1,7
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	50
Condiciones finales de humedad relativa (%)	65
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+15

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 17 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el tercer ensayo del día 1.

Estado	Parámetro	Caso A
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	1,7
	Aumento humedad relativa (%)	13
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	10
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	23,7
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	15
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	64
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	45
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	25,7
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	75
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	47

4.2.2.4. Medidas del equipo de confort térmico.

Recordamos que en el caso A también se dispone de un equipo de confort térmico; que consta de una sonda de humedad relativa (Figura 22.a), una sonda omnidireccional de velocidad del aire (Figura 22.b) y de una sonda de temperatura operativa (Figura 22.c), cuyas características pueden consultarse en la sección de metodología en la Tabla 7.

El equipo de enfriamiento evaporativo, en el día 1 del caso A, funciona entre las 13:10 y 14:35, entre las 16:05 y 18:42 y entre las 19:10 y las 20:05. El equipo de medición de confort térmico monitoriza el ambiente desde las 14:00 hasta las 19:13. Todos estos intervalos de tiempos y condiciones particulares que se pudieran dar están registrados en la Tabla 9.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

En el primer intervalo en el que el equipo está funcionando podemos ver que el PPI es del 5% y el VMP previsto está en torno a 0,10 (Figura 25.a), lo cual entraría dentro de la categoría I (Tabla 4) y habríamos alcanzado el objetivo de satisfacer al máximo porcentaje posible de personas, pero si nos fijamos en la gráfica de la tasa de corrientes de aire (Figura 25.b) se comprueba que el porcentaje está muy por encima del 30% (Tabla 6), por lo que aunque se hayan conseguido condiciones favorables de temperatura y humedad relativa estaríamos en una situación de malestar térmico local invalidando de esta manera la satisfacción del mayor número de personas. Que el porcentaje de tasa de corrientes de aire alcance valores tan elevados puede ser consecuencia de la utilización de un equipo sobredimensionado para la estancia de estudio.

Durante la parada del equipo la tasa de corrientes de aire baja al 0% pero el VMP y el PPI, suben a valores en los que nos quedamos lejos de cumplir las condiciones de satisfacción de confort térmico para la mayoría de los ocupantes (estaríamos en una categoría IV según la Tabla 4), lo que efectivamente coincide con el aumento de la temperatura y la humedad relativa de la estancia (Figura 24.a y 24.c) al evolucionar hacia las condiciones previas que se tenían antes del encendido del equipo.

La situación que se da en el segundo intervalo en el que el equipo de enfriamiento está en funcionamiento es análoga a la del primer intervalo y se extraen las mismas conclusiones. Se alcanzan condiciones de confort térmico para el máximo de ocupantes, pero debido a la tasa de corrientes de aire tendremos condiciones de malestar térmico local.



(a)

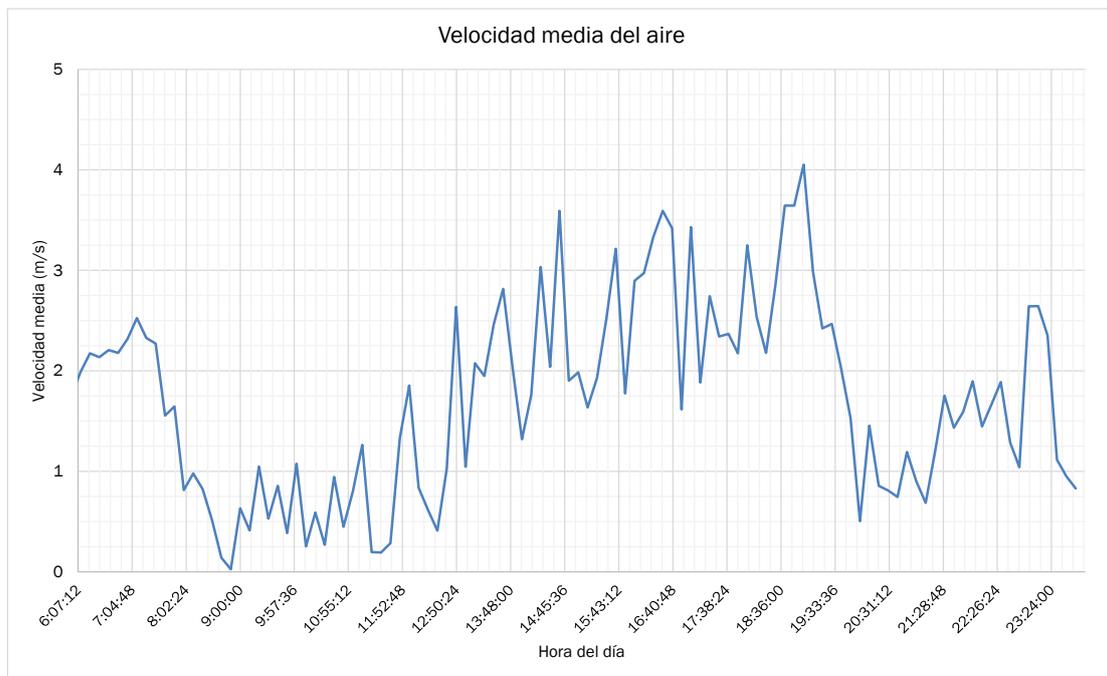
(b)

Figura 25 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 1.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.2.5. Conclusiones al finalizar los ensayos del día 1.

Cuando el equipo no está en funcionamiento, se comprueba, en el caso A, que la ventilación natural de la casa hacia las 7:30 con una temperatura exterior en torno a los 18°C y aprovechando una brisa ligera del aire de aproximadamente 1,5 m/s (Figura 26), sí que es notable (incluso en la zona no acondicionada). En cuestión de 10 minutos la temperatura en la zona ocupada desciende 2,2°C y la humedad relativa aumenta unos puntos porcentuales (Figura 24.a y 24.c), pero siempre por debajo del 70%. En el caso B, las ventanas se abren una hora antes de comenzar con los ensayos, hacia las 12:00, cuando las condiciones en el exterior ya no son tan favorables y podrían empeorar las condiciones del interior. Estas condiciones apenas se ven ligeramente modificadas (a pesar de que, a esa hora, como en el momento de ventilación del caso A, existe una ligera brisa de aire en el exterior (Figura 26)), debido posiblemente a la imposibilidad de generar ventilación cruzada en la vivienda y que el aire no circule tan fácilmente por toda la casa.



— Día 1

Figura 26 – Velocidad media del aire, en el día 1, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.

Si observamos los momentos de arranque y paradas del equipo en términos de tiempo (comparando las pendientes en los dos casos de estudio), en general, son muy similares, tanto las pendientes de las temperaturas (Figura 27.a, 27.c) como las de las humedades relativas (Figura 27.b, 27.d) de las zonas ocupadas, lo cual quiere decir que los tiempos empleados en alcanzar estados análogos, en ambos casos, tienen diferencias no relevantes. En términos de salto de temperatura (Figura 28), en el primer ensayo (durante el funcionamiento) se consigue un descenso de 0,3°C más en el caso B que en el A, en el segundo

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

ensayo obtenemos un descenso de $0,3^{\circ}\text{C}$ más en el caso A que el en B. En términos de salto de humedad relativa (Figura 29), tenemos unas diferencias del 3% y del 5% en el primer y segundo ensayo, respectivamente. Estas diferencias, tanto en los saltos de temperatura como en los de humedad relativa, pueden considerarse despreciables si atendemos a la incertidumbre de la medida asociada a la precisión de las sondas utilizadas (Tabla 7), obteniendo entonces un comportamiento muy similar del ambiente térmico en ambos casos, concluyendo que cuando el equipo está en funcionamiento, la ventilación cruzada, a pesar de que en el exterior se movía un brisa ligera (Figura 26), no es un factor determinante en la zona climatizada.

En cuanto a la zona no acondicionada, observamos que, durante el funcionamiento del equipo, la temperatura de esta zona, en ambos casos, se ve muy poco afectada (Figura 27.e), al contrario que la humedad relativa (Figura 27.f), en la que sí se aprecian variaciones importantes mientras los equipos están en marcha, sobre todo en el caso A (pero recordamos que esta sonda se encuentra en una ventana y se ve afectada por el aire del interior y también del exterior). El equipo actúa de manera local impulsando aire más frío y húmedo, que enseguida amortigua las cargas sensibles positivas que encuentra en la estancia y, en consecuencia, eleva su temperatura hasta condiciones de confort. Cuando este aire sale de la estancia (con o sin ventilación cruzada) hacia otras zonas sigue amortiguando posibles cargas positivas que se encuentre en su camino y es por lo que cuando llega a las zonas no acondicionadas ya no está en condiciones de afectar a la temperatura. Puesto que en la zona no acondicionada de ambos casos nos encontramos con un comportamiento similar (no afectación de temperatura y sí de humedad relativa) podemos concluir que la ventilación cruzada no es un factor relevante para las zonas no acondicionadas durante el funcionamiento de los equipos.

Recordamos que el tercer ensayo en el caso B se realizó bajo otras condiciones y por ello no lo hemos comparado aquí.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

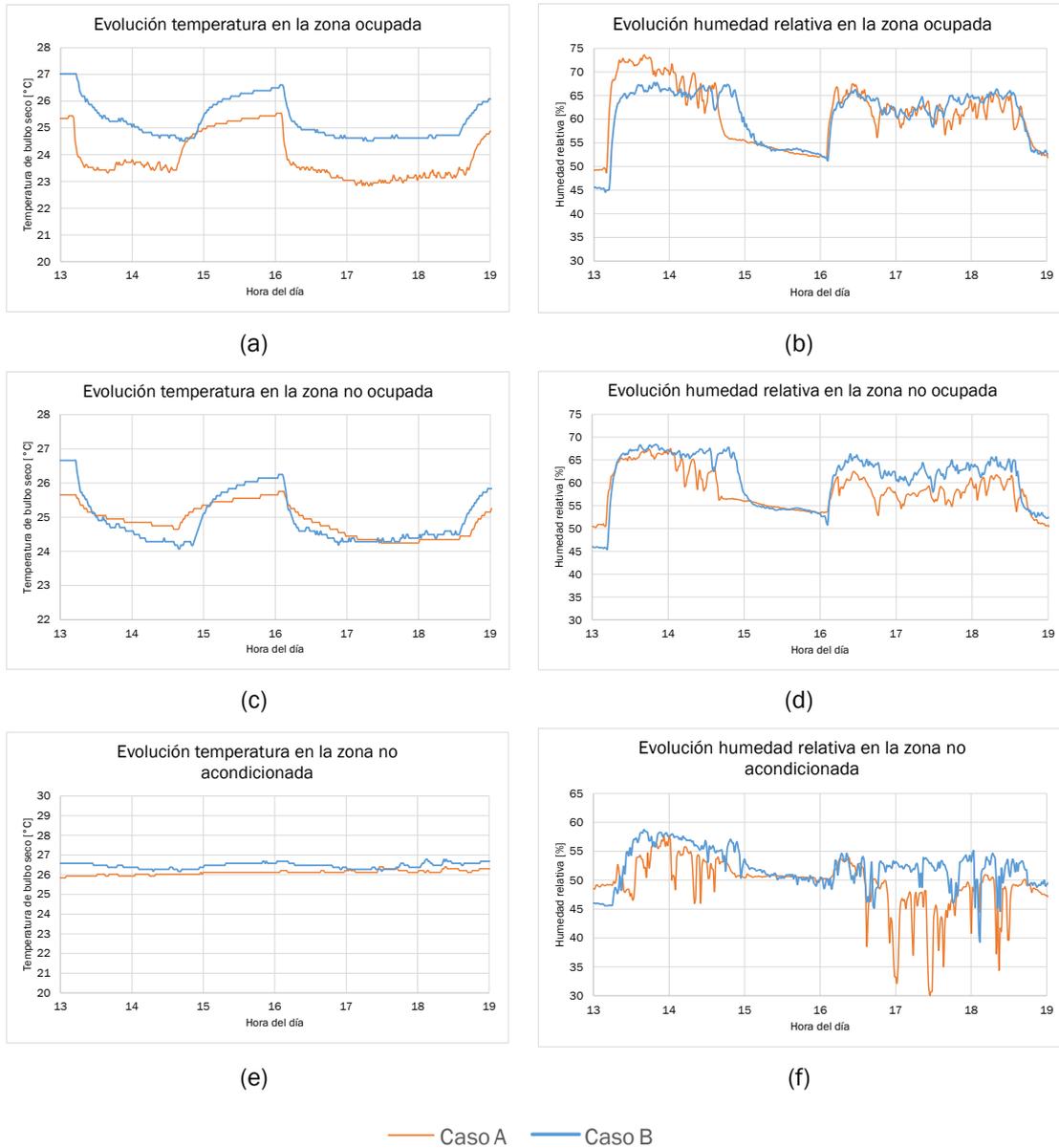


Figura 27 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 1.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

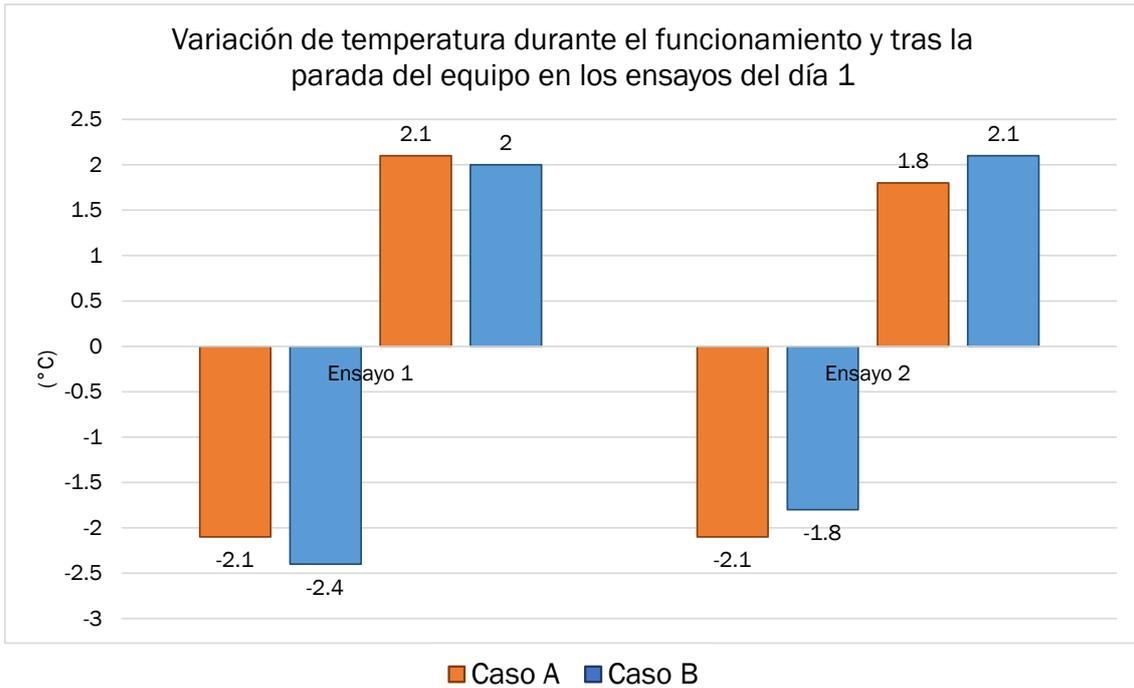


Figura 28 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 1.

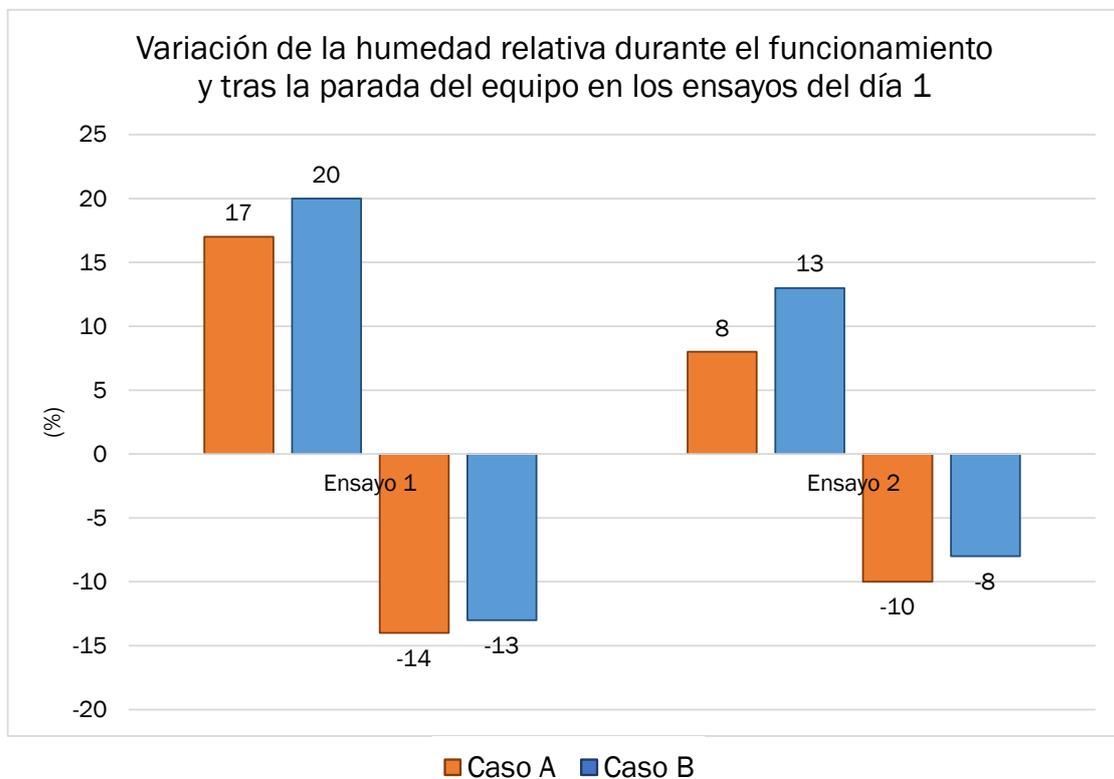


Figura 29 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 1.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.3. Ensayos día 2.

En este día de ensayo el objetivo propuesto era comprobar el desempeño de los equipos de enfriamiento evaporativo en interiores mientras se mantienen las ventanas cerradas, es decir, sin que exista renovación del aire interior en las estancias a acondicionar. Como más adelante se verá, ya la primera puesta en funcionamiento de los equipos se comprobó que este ensayo no era seguro en términos de salubridad y posible deterioro de superficies por aparición de humedades, por lo que el resto de los ensayos se realizaron con las ventanas abiertas de manera similar a los realizados el día 1.

En la Figura 30 que se presenta a continuación, pueden verse la evolución, durante el día 2 de ensayos, de las temperaturas y humedades relativas de los dos casos de estudio.

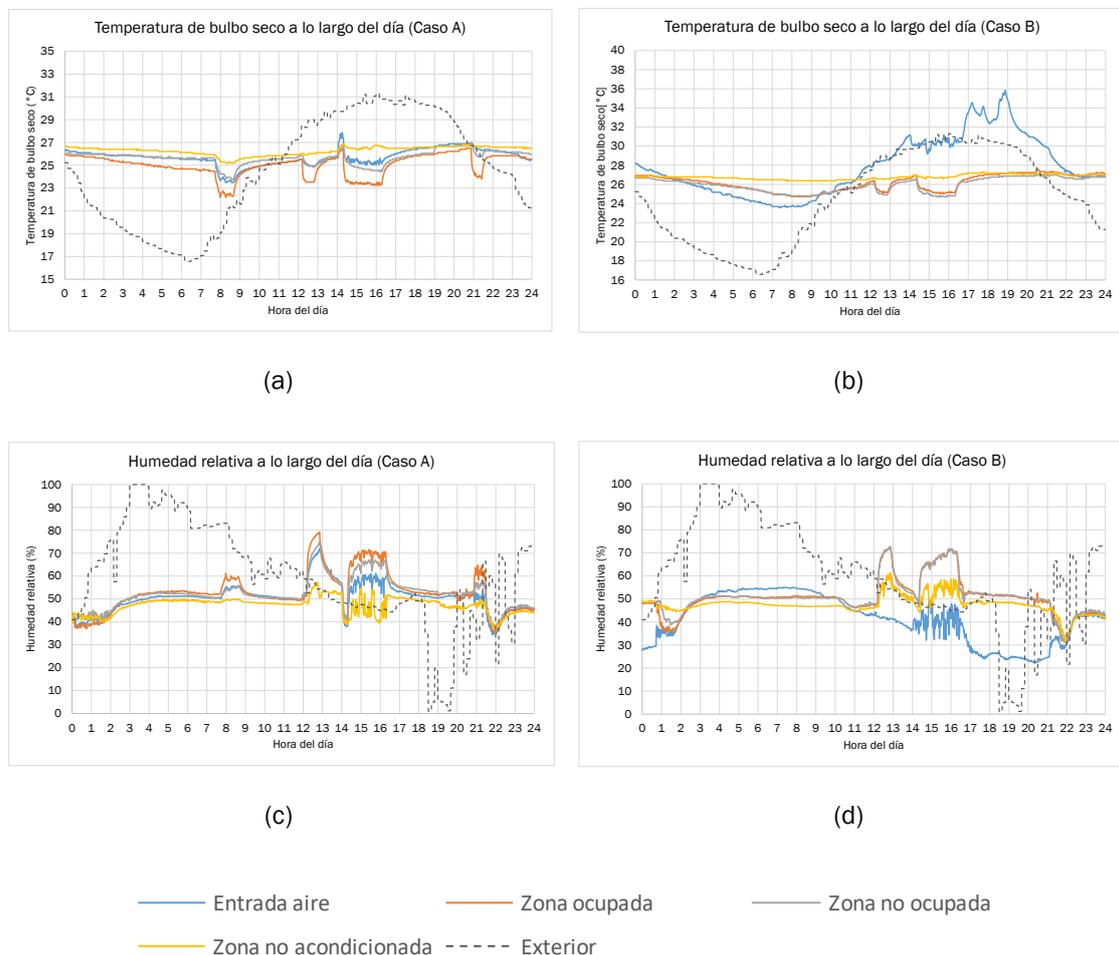


Figura 30 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 2.

En el caso A (Figura 30.a y 30.c) hasta las 7:30 de la mañana, la temperatura, en todas las zonas medidas, va disminuyendo de forma gradual debido a la significativa variación de temperatura que se da en el exterior durante la noche. El primer descenso importante de temperatura se registra unos minutos

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

después de haber abierto todas las ventanas de la casa para su ventilación, se tardan 30 minutos en alcanzar una temperatura estable, con un promedio de 22,5°C, que se mantiene hasta que se cierran las ventanas. En ese mismo intervalo de tiempo vemos que la humedad relativa aumenta hasta un promedio de 58%, como consecuencia de la entrada de aire exterior con mayor porcentaje de humedad relativa. Una vez cerradas las ventanas la temperatura va aumentando conforme lo hace también la temperatura exterior, y la humedad relativa disminuye hasta estabilizarse alrededor del 50%.

En el caso B (Figura 30.b y 30.d) se tienen toda la noche y parte de la mañana las ventanas abiertas, lo que permite que la temperatura en el interior de la casa vaya disminuyendo hasta registrarse un mínimo de 24,7°C, que es 2,2°C más que en el caso A, donde solo se han abierto las ventanas durante 1 hora por la mañana. Durante la mayor parte de la noche la humedad relativa se mantiene bastante estable.

Como hemos comentado en las Conclusiones al finalizar los ensayos del día 1., la ventilación cruzada, cuando no estamos utilizando los equipos, sí es más notable su influencia en las condiciones interiores de la estancia de estudio y de la zona no acondicionada.

4.2.3.1. Primera puesta en funcionamiento del equipo.

El primer arranque del equipo en el caso A (Figura 30.a y 30.c) con las ventanas cerradas se produce a las 12:11, partiendo de una temperatura de 25,5°C y 51% de humedad relativa en la zona ocupada. Se tardan 12 minutos en llegar a un estado estable en la temperatura, obteniéndose un descenso de 2°C. La humedad relativa en solo 5 minutos alcanza el 70%, a partir de ese punto evoluciona de manera más lenta, pero sigue incrementándose hasta alcanzar un pico del 79% 30 minutos después. Respecto a la zona no acondicionada, vuelve a repetirse la situación del día anterior, la temperatura apenas se ve afectada mientras que sí se registran cambios en la humedad relativa.

En el caso B (Figura 30.b y 30.d) el arranque del equipo se realiza a las 12:12, partiendo de 26,4°C y 49 % de humedad relativa, en la zona ocupada. El tiempo empleado en alcanzar una temperatura prácticamente estable (promedio de 25,2°C) es de 16 minutos y el descenso es de 1,2°C, 0,8°C menos que en el caso A. En cuanto a la humedad relativa se tardan 18 minutos en alcanzar el 70% y 20 minutos después se alcanza un máximo del 73%. En la zona no acondicionada encontramos la misma situación que el caso A: en la temperatura apenas se registran modificaciones mientras que sí se observan cambios en la humedad relativa. Recordamos que en ambos casos se tienen las ventanas cerradas, es decir, que en el caso A no contamos con ventilación cruzada, pero obtenemos un

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

comportamiento similar, de la zona no acondicionada, a lo analizado en el día 1 cuando sí contábamos con la variable de ventilación cruzada.

En el caso A se alcanza antes el límite marcado por cuestiones de salud, pero desde que se enciende el equipo hasta llegar a un máximo en la humedad relativa, se tarda aproximadamente el mismo tiempo en ambas estancias. En ambos casos, al alcanzar humedades relativas tan altas e inadecuadas se decide no continuar con el ensayo y parar los equipos alrededor de las 12:50, constatando así que para el buen acondicionamiento del espacio mediante el uso de este tipo de tecnología es necesario la apertura de ventanas y puertas favoreciendo la renovación del aire interior; por esta razón el resto de los ensayos del día se proceden a realizar con las ventanas abiertas.

Una vez apagados los equipos, en ambos casos se deja evolucionar el ambiente con las ventanas cerradas. La temperatura comienza a aumentar y tarda 40 y 33 minutos en estabilizarse en el caso A y B (Figura 30.a y 30.b), respectivamente. La humedad relativa no se llega a estabilizar en ninguno de los casos, se observa como decae progresivamente, un 23% en 72 minutos en el caso A y un 20% en 70 minutos en el caso B, por lo que se decide, a las 14:00, abrir las ventanas y que así el descenso de humedad relativa se produzca de manera más acusada (Figura 30.c y 30.d) al restablecerse la renovación de aire en las estancias. Durante 18 minutos (20 minutos en el caso B) se mantiene esta situación (ventanas abiertas y equipos parados): la humedad relativa en el caso A cae un 15% y en el caso B cae un 5% (la mayor caída en el caso A puede deberse a que la renovación de aire es mayor debido al movimiento de aire generado por ventilación cruzada). Por contra vemos aumentar la temperatura, 0,9°C en el caso A y 0,3°C en el caso B, al entrar aire del exterior a 29,7°C. (Mayor subida en caso A, también relacionada con la ventilación cruzada y una temperatura del exterior elevada).

En la Tabla 18 y Tabla 19 encontramos resumida la información más importante de ambos casos.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 18 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del primer ensayo del día 2.

Parámetro	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,5	26,4
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,5	25,1
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-2	-1,3
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	51	49
Condiciones finales de humedad relativa (%)	79	73
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+28	+24

Tabla 19 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el primer ensayo del día 2.

Estado	Parámetro	Caso A	Caso B
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	1,9	0,9
	Aumento humedad relativa (%)	22	17
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	12	16
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	23,5	25,2
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No estabilidad. 35 min hasta pico	No estabilidad. 38 min hasta pico.
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	79 (pico)	73 (pico)
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	40	33
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	25,6	26,5
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No se alcanza estabilidad.	No se alcanza estabilidad
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	-	-

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.3.2. *Segunda puesta en funcionamiento del equipo.*

En esta segunda puesta en funcionamiento, en el caso A (Figura 30.a) con las ventanas entreabiertas, se tardan 22 minutos en alcanzar un descenso (de 3 °C) en la temperatura que se mantenga de manera estable. La humedad relativa (Figura 30.c) en 4 minutos aumenta del 41% al 61% y continúa evolucionando al alza durante 38 minutos, hasta estabilizarse en torno al 70%, por lo que se decide abrir más las ventanas, lo cual hace que la humedad relativa descienda ligeramente y fluctúe entre valores del 65% al 70% hasta que se para el equipo, todo ello en la zona ocupada. Durante el funcionamiento del equipo, en la zona no acondicionada vemos como la temperatura ha aumentado ligeramente como consecuencia probablemente de la entrada de aire exterior a una mayor temperatura; la humedad relativa sí registra fluctuaciones notables.

En el caso B (Figura 30.b), con las ventanas abiertas, se tardan 50 minutos en alcanzar un descenso (de 1,8 °C) estable en la temperatura, tiempo mucho más largo y menor caída en la temperatura que en el caso A, pero recordemos que la entrada de aire en el caso B se encuentra en una galería en la que se produce efecto invernadero. En 10 minutos la humedad relativa (Figura 30.d) pasa del 48% al 63% y después continúa elevándose hasta que 78 minutos después supera el 70% y se mantiene alrededor de ese valor hasta las 16:20, hora en que se apaga el equipo. En la zona no acondicionada, durante el funcionamiento del equipo, la temperatura sufre un mínimo descenso mientras que la humedad relativa sí sufre notables cambios.

Una vez parados los equipos, en el caso A (Figura 30.a y 30.c) se deja evolucionar el ambiente con las ventanas cerradas. En los primeros 70 minutos se da el mayor cambio en la temperatura y en la humedad relativa, un incremento de 1,8 °C y un descenso de un 12%, respectivamente. En los siguientes 200 minutos la temperatura solo aumenta 0,9 °C y la humedad relativa se mantiene prácticamente estable a un promedio del 52%. En el caso B (Figura 30.b y 30.d) se deja evolucionar las condiciones con las ventanas abiertas durante 20 minutos, puesto que al apagar el equipo estábamos en humedades relativas en torno al 70%. La humedad relativa en la estancia se beneficia notablemente de estos minutos con las ventanas abiertas y cae del 69% al 51% (momento en el que se cierran las ventanas) y se mantiene prácticamente estable (promedio del 51%) hasta las 21:05 que se vuelven a abrir las ventanas. En ese intervalo de tiempo con las ventanas abiertas la temperatura aumenta 1,1 °C, hasta 26,4 °C y 55 minutos después se estabiliza y alcanza los 27,1 °C de promedio hasta el final del día.

En la Tabla 20 y Tabla 21 encontramos resumida la información más importante de ambos casos.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 20 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del segundo ensayo del día 2.

Parámetro	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	26,5	26,9
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,8	25,3
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-2,7	-1,6
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	41	48
Condiciones finales de humedad relativa (%)	66	69
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+25	+21

Tabla 21 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el segundo ensayo del día 2.

Estado	Parámetro	Caso A	Caso B
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	2,9	1,1
	Aumento humedad relativa (%)	25	15
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	22	50
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	23,4	25,1
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	38	88
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	70	71
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	70	75
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	26,1	27,1
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	70	20
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	52	51

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.3.3. Tercera puesta en funcionamiento del equipo.

En el caso A (Figura 30.a y 30.c), se procede a arrancar de nuevo el equipo a petición de un ocupante de la vivienda; al estar fuera de la planificación de los ensayos, en el caso B no se realiza este tercer ensayo. A las 20:50 se vuelve a encender el equipo y, en la zona ocupada, se tardan 20 minutos en alcanzar un estado estable de temperatura con un promedio de 24 °C. En cuanto a la humedad relativa, se alcanza el primer máximo (64%) a los 7 minutos y a partir de ahí y hasta la parada del equipo la humedad fluctúa entre el 58% y el 65%. En la zona no acondicionada, al igual que en otros ensayos, la temperatura apenas sufre variaciones mientras que la humedad relativa sí registra pequeñas fluctuaciones. Una vez parado el equipo la temperatura tarda 31 minutos en alcanzar un estado estable que se mantiene hasta las 23:20, hora en la que se vuelven a abrir las ventanas para provechar la temperatura más fresca del exterior.

En la Tabla 22 y en la Tabla 23 se resumen los datos de mayor interés en este tercer ensayo en el caso A.

Tabla 22 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada del tercer ensayo del día 2.

Parámetro	Caso A
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	26,5
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,8
Variación de temperatura entre arranque y parada de equipo (°C)	-2,7
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	53
Condiciones finales de humedad relativa (%)	62
Variación de humedad relativa entre arranque y parada de equipo (%)	+9

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Tabla 23 - Resumen de las condiciones en la zona ocupada durante el funcionamiento y parada del equipo en el tercer ensayo del día 2.

Estado	Parámetro	Caso A
10 primeros minutos tras arranque del equipo	Descenso de temperatura (°C)	2,1
	Aumento humedad relativa (%)	8
Periodo tras arranque de equipo	Tiempo en alcanzar estabilidad en temperatura (min)	20
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	24
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	No se alcanza estabilidad.
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	Fluctúa entre el 58% y el 65%.
Periodo tras parada del equipo	Tiempo hasta alcanzar estabilidad en temperatura (min)	31
	Temperatura promedio en estacionario (°C)	25,8
	Tiempo en alcanzar estabilidad en humedad relativa (min)	75
	Humedad relativa promedio en estacionario (%)	45

4.2.3.4. Medidas del equipo de confort térmico.

En el segundo día de ensayos el equipo de enfriamiento evaporativo funcionó durante los siguientes intervalos: de 12:11 a 12:50, de 14:18 a 15:52 y de 20:50 a 21:25; mientras que el equipo de medición de confort térmico estuvo en funcionamiento desde las 12:00 hasta las 18:00. Estos intervalos y sus condiciones pueden consultarse en la Tabla 10.

Durante el primer arranque del equipo, si solo atendemos al VMP y al PPI (Figura 31.a), este último sufre unas ligeras fluctuaciones, pero en las que nunca se llega al 8%, aún así nos encontraríamos en una categoría II de ambiente térmico (Tabla 4), con un mayor número de personas insatisfechas debido a las altas humedades relativas que se alcanzaron. Atendiendo ahora a la gráfica de la tasa de corrientes de aire (Figura 31.b) comprobamos que durante el periodo de

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

funcionamiento se alcanzan valores muy elevados que generan malestar térmico local que anulan cualquier categoría de ambiente térmico aceptable para la mayoría de los ocupantes. Una vez parado el equipo el VMP y el PPI evolucionan ligeramente más rápido y hacia valores más desfavorables que los obtenidos en el día 1 (tras la parada del equipo), lo cual puede ser consecuencia del aumento de temperatura y la lenta disminución de la humedad relativa (desde valores tan elevados) al dejar evolucionar el ambiente con las ventanas cerradas.

En la segunda puesta en funcionamiento del equipo se alcanza perfectamente el objetivo de situación térmica favorable para el mayor número de ocupantes (VMP varía entre 0 y 0,10 y el PPI se mantiene en el 5%, Figura 31.a), pero al igual que en los otros ensayos la tasa de corrientes de aire (Figura 31.b) es muy alta y estaríamos en condiciones de malestar térmico local. Una vez apagado el equipo volvemos a quedarnos lejos de la categoría I dada por la Tabla 4 debido al aumento de temperatura en la estancia de estudio.

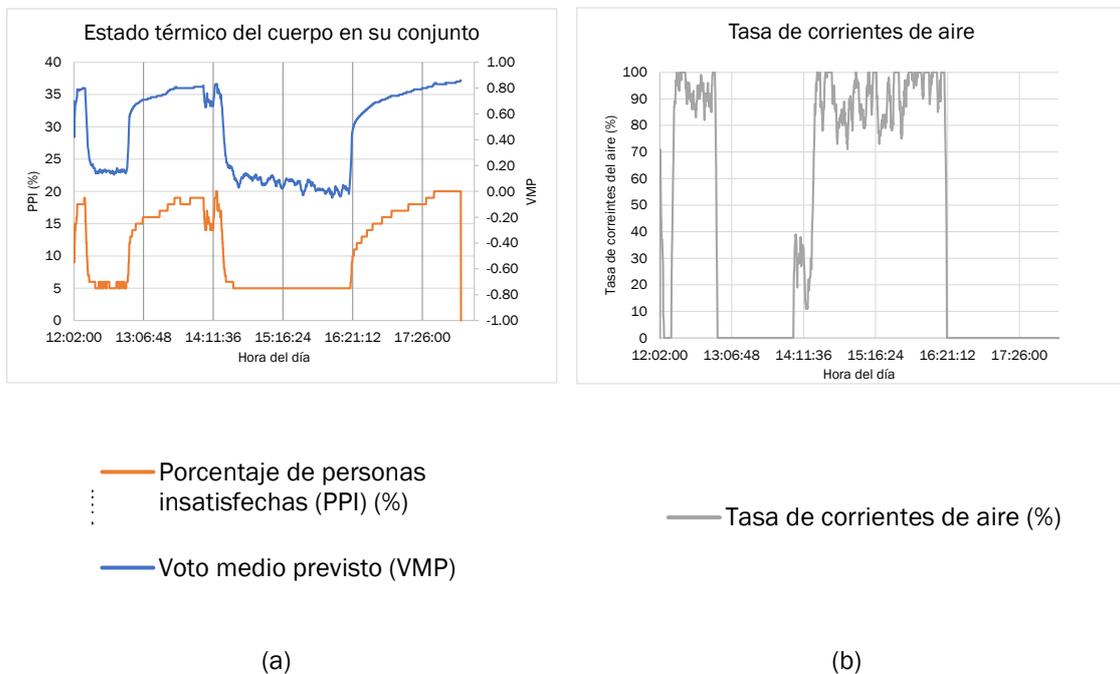


Figura 31 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 2.

4.2.3.5. Conclusiones al finalizar los ensayos del día 2.

La conclusión más importante que podemos sacar de este día es la necesidad de tener un aporte de aire fresco de manera continuada gracias a la apertura de huecos en la estancia donde se vayan a utilizar este tipo de equipos de enfriamiento, para que el incremento de humedad relativa no supere los límites de salubridad y no se genere la posibilidad de deterioro de superficies por aparición de humedades.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Volvemos a comprobar que a primera hora de la mañana (con una temperatura exterior en torno a los 18°C) cuando el equipo no funciona, pero se abren las ventanas, la ventilación cruzada en el caso A consigue una actuación más notable en todas las zonas, sobre la temperatura y humedad relativa (Figura 30.a y 30.c) a pesar del poco viento (Figura 32) en las primera horas de la mañana, que en el caso B (Figura 30.b y 30.d), donde se han tenido las ventanas abiertas durante toda la noche y parte de la mañana.

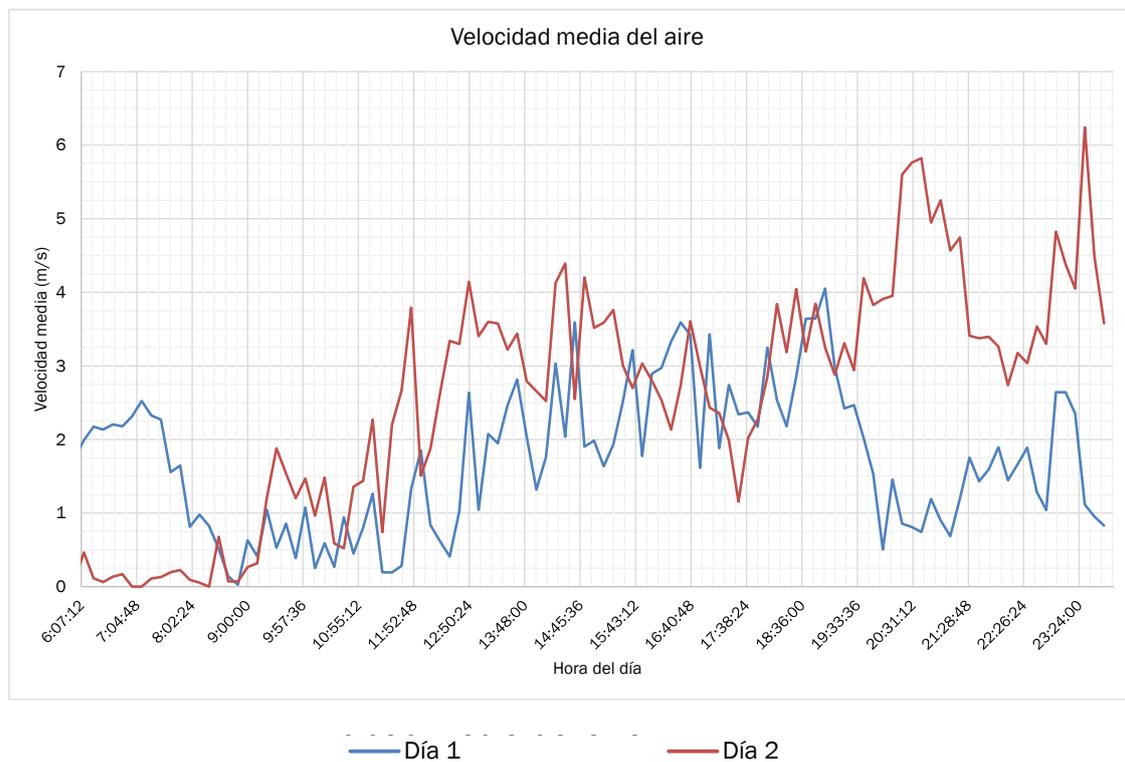


Figura 32 - Velocidad media del aire, en el día 1 y 2, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.

Si nos fijamos ahora en los momentos de arranque y paradas del equipo (Figura 33) en términos de tiempo (comparando las pendientes en los dos casos de estudio), vuelven a ser muy similares, con diferencias despreciables, tanto en temperatura como en humedad relativa, indicando que se tarda tiempos similares en llegar a estados análogos. En términos de salto de temperaturas en la zona ocupada (Figura 34), en el primer ensayo se consigue bajar la temperatura $0,7^{\circ}\text{C}$ más en el caso A que el caso B y en el segundo ensayo se consigue un descenso de $1,1^{\circ}\text{C}$ más en el caso A que en el B (durante el segundo ensayo en el caso B en la estancia de estudio se encontraba una persona aportando carga térmica). En ambos ensayos es el caso A el que obtiene mayor descenso en la temperatura, al contrario que el día 1 en el que en cada ensayo el caso favorable cambiaba. En cuanto a términos de saltos de humedades relativas (también en la zona ocupada) (Figura 35), tenemos unas diferencias del 4% en ambos ensayos y no las vamos a considerar relevantes debido a las tolerancias de los equipos de medida (Tabla 7). Durante las paradas de los equipos el aumento de temperaturas es prácticamente

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

el valor del descenso que se había conseguido con el equipo encendido (en el ensayo 1 las variaciones tras la parada son algo mayores, en valor absoluto, que durante el funcionamiento, ya que se deja evolucionar el ambiente con las ventanas cerradas y unos minutos antes del siguiente ensayo se abren coincidiendo con una temperatura exterior alta). De igual manera que en el día 1, al obtener un comportamiento similar del ambiente podemos sacar como conclusión que la ventilación cruzada en la zona climatizada no es un factor relevante para el funcionamiento del equipo.

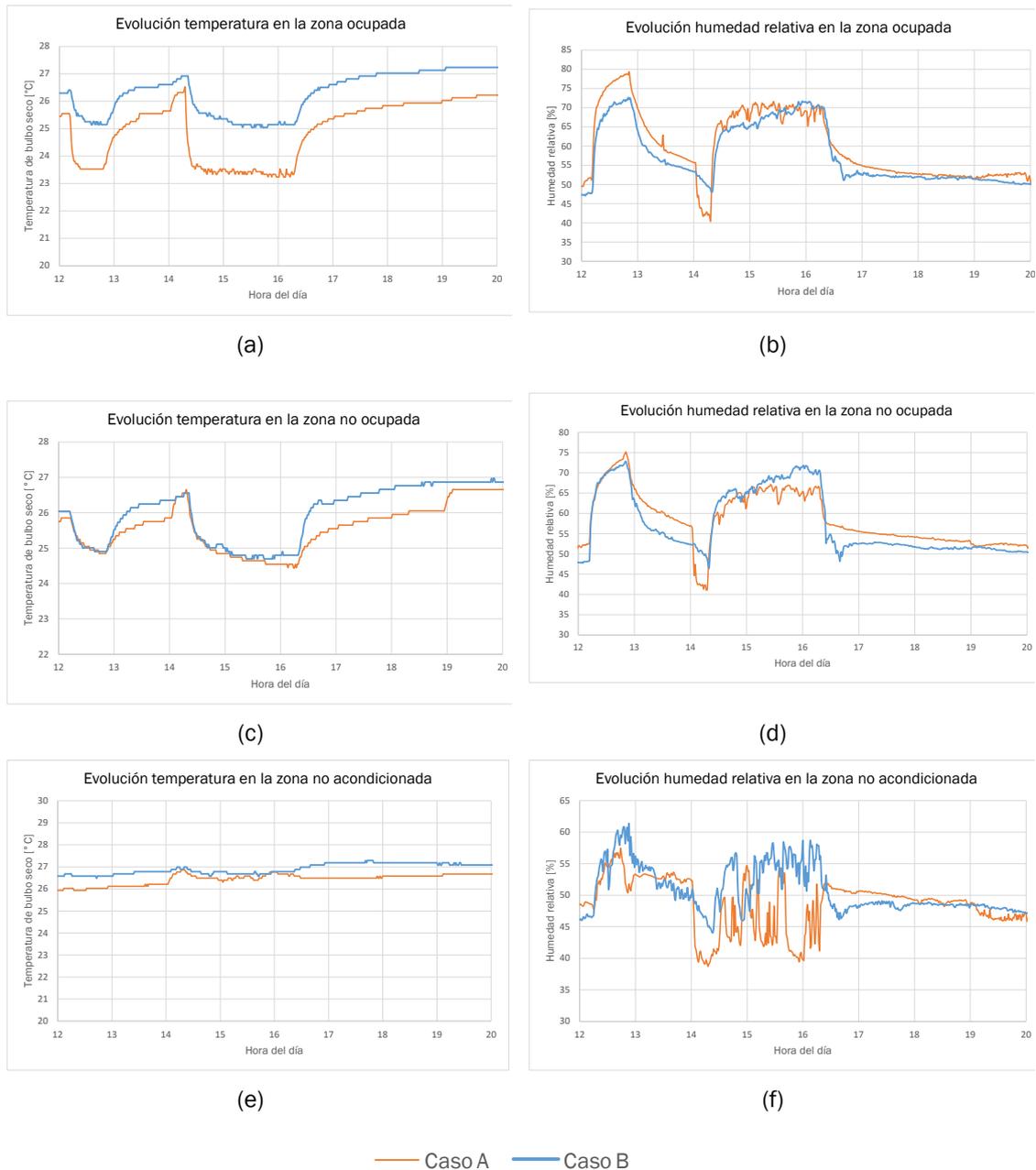


Figura 33 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 2.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

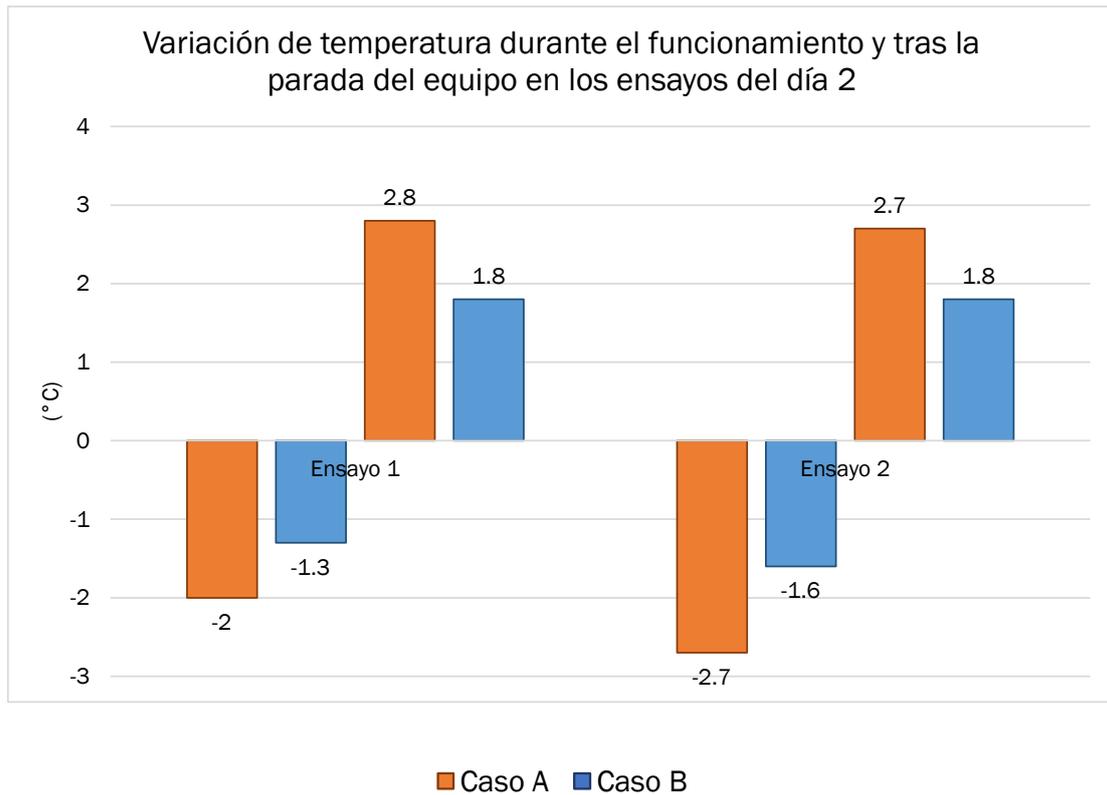


Figura 34 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 2.

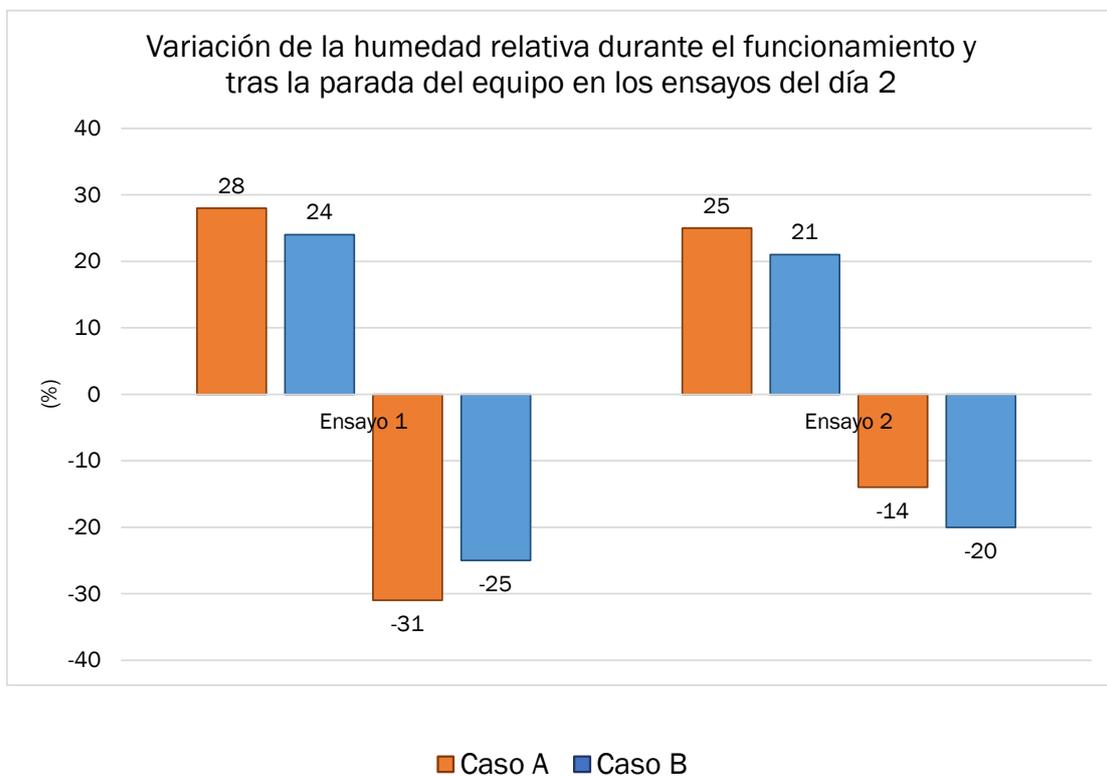


Figura 35 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 2.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

En las zonas no acondicionadas de ambos casos (Figura 33.e y 33.f) se vuelve a ver una actuación análoga a la del día 1. Durante el funcionamiento de los equipos las temperaturas en estas zonas apenas parecen verse afectadas, al contrario de lo que pasa con las humedades relativas que claramente sufren fluctuaciones, así que una vez más determinamos que la ventilación cruzada tampoco es un factor relevante a la hora de intentar llevar todas las condiciones de confort de la zona acondicionada hacia las zonas no acondicionadas.

4.2.4. Ensayos día 3.

El objetivo marcado para el día 3 es comprobar si las condiciones de confort térmico de la estancia de estudio difieren de manera significativa, principalmente si se puede conseguir un mayor salto de temperaturas, si en vez de utilizar el equipo durante periodos de tiempo largos se hace durante múltiples periodos cortos.

En la Figura 36, que se presenta a continuación, pueden verse la evolución de las temperaturas y humedades relativas de los dos casos de estudio durante el día 3 de ensayos.

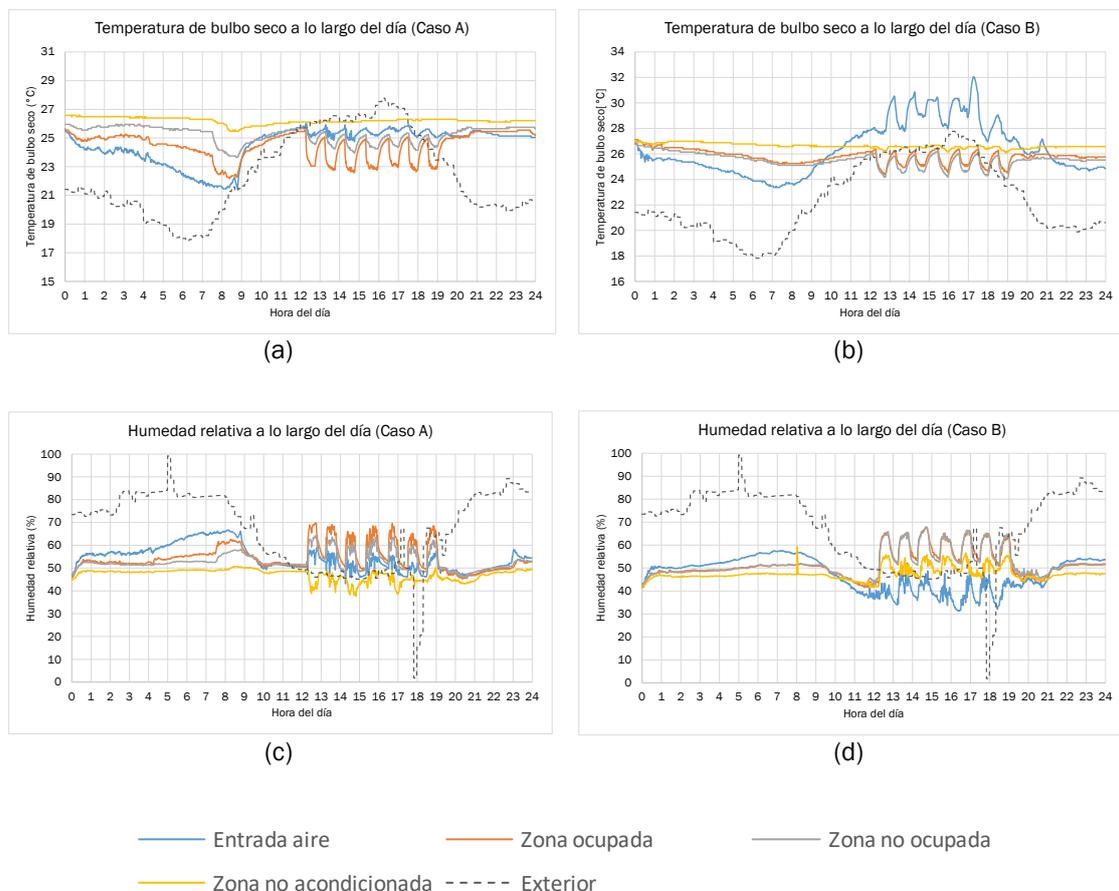


Figura 36 - Temperaturas de bulbo seco y humedades relativas para los casos A y B en el día 3.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Como en los dos días previos, se observa en el caso A (Figura 36.a y 36.c) un descenso importante en la temperatura (y un aumento en la humedad relativa) entre las 7:30 y las 8:50, lo que coincide con la apertura de ventanas para ventilar (y una temperatura exterior más fresca). En el momento anterior a abrir las ventanas las condiciones en la zona ocupada son de 23,8°C y 56%. Unos 20 minutos después el descenso de temperatura es de 1,3°C y el aumento de humedad relativa de un 5% y ambos se mantienen estables (con alguna ligera fluctuación) hasta que las ventanas se cierran parcialmente a las 8:50 haciendo que el ambiente, de las zonas ocupada y no ocupada, evolucione hasta una temperatura por encima de los 25°C y una humedad relativa en torno al 50%.

En el caso B (Figura 36.b y 36.d), se dejan las ventanas abiertas toda la noche y la temperatura mínima que se alcanza en la zona ocupada, hasta alrededor de 9 de la mañana, es de 25,3°C, 2,8°C más que el promedio del caso A en el momento de ventilar. La humedad relativa máxima alcanzada es de 52%. A partir de las 9 de la mañana la temperatura va en aumento hasta los 26°C, aproximadamente, y la humedad relativa se sitúa en torno al 43%.

Como ya se ha comentado anteriormente, los ensayos de este día son en periodos cortos, unos 30 minutos, y entre un ensayo y el siguiente también un periodo de 30 minutos; por lo que en los análisis de este día no nos centraremos en el tiempo que se tarda en llegar a estados estacionarios sino en las diferencias de temperatura y humedad relativa que se obtienen tanto en los periodos de funcionamientos del equipo como en los de las consiguientes paradas.

4.2.4.1. Primera puesta en funcionamiento del equipo

A continuación, se presentan unas tablas donde se encuentran recogidas las condiciones de confort, y sus variaciones, durante la puesta en funcionamiento (desde las condiciones de partida hasta que se para el equipo), a los 10 minutos de funcionamiento del equipo y durante la parada del equipo (desde que se para el equipo y hasta el siguiente arranque). Como se ha explicado antes, se ha decidido por esta presentación de los datos por ser periodos de funcionamiento y parada del equipo muy continuados en el tiempo. Se seguirá esta misma presentación en los próximos seis apartados y será en el apartado de conclusiones al finalizar los ensayos del día 3 cuando se analicen y comenten estos resultados.

En la Tabla 24 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 25 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 24 – Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el primer ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-2,1	-1,4	+1,4	+1
Variación de humedad relativa (%)	+17	+19	-11	-8

Tabla 25 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del primer ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,5	26,4	23	24,4
Condiciones finales de temperatura (°C)	23	24.4	24,8	26,2
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-2,5	-2	+1,8	+1,8
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	51	44	70	65
Condiciones finales de humedad relativa (%)	70	65	58	51
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+21	+21	-12	-14

4.2.4.2. Segunda puesta en funcionamiento del equipo.

En la Tabla 26 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

En la Tabla 27 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 26 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el segundo ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-1,7	-0,8	+1,4	+0,8
Variación de humedad relativa (%)	+9	+13	-9	+9

Tabla 27 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del segundo ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	24,8	26,2	22,8	24,9
Condiciones finales de temperatura (°C)	22,8	24,9	24,9	26,2
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-2	-1,3	+2,1	+1,3
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	58	51	65	66
Condiciones finales de humedad relativa (%)	65	66	50	53
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+7	+15	-15	-13

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.4.3. *Tercera puesta en funcionamiento del equipo.*

En la Tabla 28 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 29 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 28 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el tercer ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-2	-0,8	+1,4	+0.8
Variación de humedad relativa (%)	+14	+11	-11	-6

Tabla 29 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del tercer ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	24,9	26,2	22,6	25
Condiciones finales de temperatura (°C)	22,6	25	24,9	26,5
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-2,3	-1,2	+2,3	+1,5
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	50	53	64	67
Condiciones finales de humedad relativa (%)	64	67	50	54
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+14	+14	-14	-13

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.4.4. Cuarta puesta en funcionamiento del equipo.

En la Tabla 30 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 31 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 30 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el cuarto ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-1,9	-1	+1,3	+0,9
Variación de humedad relativa (%)	+10	+9	-6	-4

Tabla 31 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del cuarto ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	24,9	26,5	23	24,9
Condiciones finales de temperatura (°C)	23	24,5	25	26,4
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-1,9	-2	+2	+1,5
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	50	54	62	59
Condiciones finales de humedad relativa (%)	62	62	52	52
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+12	+8	-10	-7

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.4.5. *Quinta puesta en funcionamiento del equipo.*

En la Tabla 32 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 33 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 32 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el quinto ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-1,9	-1,1	+1,5	+0,8
Variación de humedad relativa (%)	+14	+11	-8	-7

Tabla 33 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del quinto ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25	26,4	23	25,1
Condiciones finales de temperatura (°C)	23	25,1	25,1	26,4
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-2	-1,3	+2.1	+1,3
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	52	52	60	65
Condiciones finales de humedad relativa (%)	60	65	50	53
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+12	+13	-10	-12

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.4.6. Sexta puesta en funcionamiento del equipo.

En la Tabla 34 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 35 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 34 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el sexto ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-2,2	-1,1	+1,4	+1
Variación de humedad relativa (%)	+14	+10	-10	-9

Tabla 35 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del sexto ensayo del día 3.

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25,1	26,4	22,8	24,6
Condiciones finales de temperatura (°C)	22,8	24,6	25	26,3
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-2,3	-1,8	+2,2	+1,7
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	50	53	62	64
Condiciones finales de humedad relativa (%)	62	64	51	51
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+12	+11	-11	-13

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

4.2.4.7. *Séptima puesta en funcionamiento del equipo.*

En la Tabla 36 se han recogido, para los dos casos, la variación de temperatura y humedad relativa que se produce en los primeros 10 minutos de encender el equipo y a los 10 minutos una vez que se ha parado el equipo.

En la Tabla 37 se han recogido, para los dos casos, los valores de temperatura y humedad relativa desde los que se da comienzo y a los que se llega durante el acondicionamiento del espacio con el equipo y los mismos valores de partida y final una vez que el equipo se para y las condiciones del ambiente evolucionan.

Tabla 36 - Variación de las condiciones de la zona ocupada en los primeros 10 minutos de funcionamiento y parada del equipo durante el séptimo ensayo del día 3.

Parámetro	Funcionamiento equipo (a los 10 min)		Parada de equipo (a los 10 min)	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Variación de temperatura (°C)	-2,1	-1,4	+1,3	+1,1
Variación de humedad relativa (%)	+14	+10	-14	-14

Tabla 37 - Resumen de las condiciones iniciales y finales en la zona ocupada durante y después del séptimo ensayo del día 3

Parámetro	Durante funcionamiento del equipo.		Después de parada del equipo.	
	Caso A	Caso B	Caso A	Caso B
Condiciones iniciales de temperatura (°C)	25	26,3	23,1	24,5
Condiciones finales de temperatura (°C)	23,1	24,5	25	26
Variación entre condiciones iniciales y finales de temperatura (°C)	-1,9	-1,8	+1,9	+1,5
Condiciones iniciales de humedad relativa (%)	51	51	64	64
Condiciones finales de humedad relativa (%)	64	64	50	47
Variación entre condiciones iniciales y finales de humedad relativa (%)	+13	+13	-14	-17

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Una vez finalizado este séptimo ensayo se dan por terminados los ensayos para este día. Se deja evolucionar el ambiente con las ventanas abiertas en ambos casos.

En el caso A (Figura 36.a y 36.c) la temperatura tarda 25 minutos en alcanzar un estado estable a 25 °C de promedio que mantiene durante 70 minutos, para después aumentar unas décimas y ya mantenerse estable lo que resta de día a 25,4 °C de promedio. La humedad relativa cae hasta el 50% y hasta las 21:30 sufre ligeras fluctuaciones alrededor del 45%, para después estabilizarse.

En el caso B (Figura 36.b y 36.d) en 20 minutos se alcanza un estado estable que se mantiene hasta el final del día (con alguna mínima variación puntual) con un promedio de 25,8 °C. La humedad relativa en 20 minutos realiza su mayor descenso y durante los 110 minutos siguientes fluctúa entre 44% y 48% y para después estabilizarse hasta el final del día al 51%

4.2.4.8. Medidas del equipo de confort térmico.

Como ya hemos visto anteriormente, durante el día 3 de ensayos el equipo funcionó a intervalos de 30 minutos con descansos también de 30 minutos. El primer ensayo comenzó a las 12:15. El resto de los intervalos y condiciones pueden comprobarse en la Tabla 11. El equipo de medición de confort térmico tomó datos desde las 10:20 de la mañana hasta las 19:20, aproximadamente.

Durante el primer ensayo del día se satisface el objetivo de neutralidad térmica para la mayoría de las personas, puesto que en la Figura 37.a vemos como el PPI alcanza el 5% y el VMP se mantiene alrededor de 0,10. En el resto de ensayos el PPI aumenta y fluctúa ligeramente, si lo comparamos con el primer ensayo, pero se mantiene por debajo del 10%, mientras que el VMP varía en torno al -0,20, todo ello hace que nos encontremos entre las categorías I y II según la Tabla 4. Durante las paradas de los equipos, podemos observar que el PPI no supera en ningún caso el 15%, al contrario de lo que sucedía en las paradas de los otros días. Pero al igual que en los días anteriores la tasa de corrientes, cuando el equipo está en funcionamiento, se dispara, por lo que volvemos a estar en una situación de malestar térmico local.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

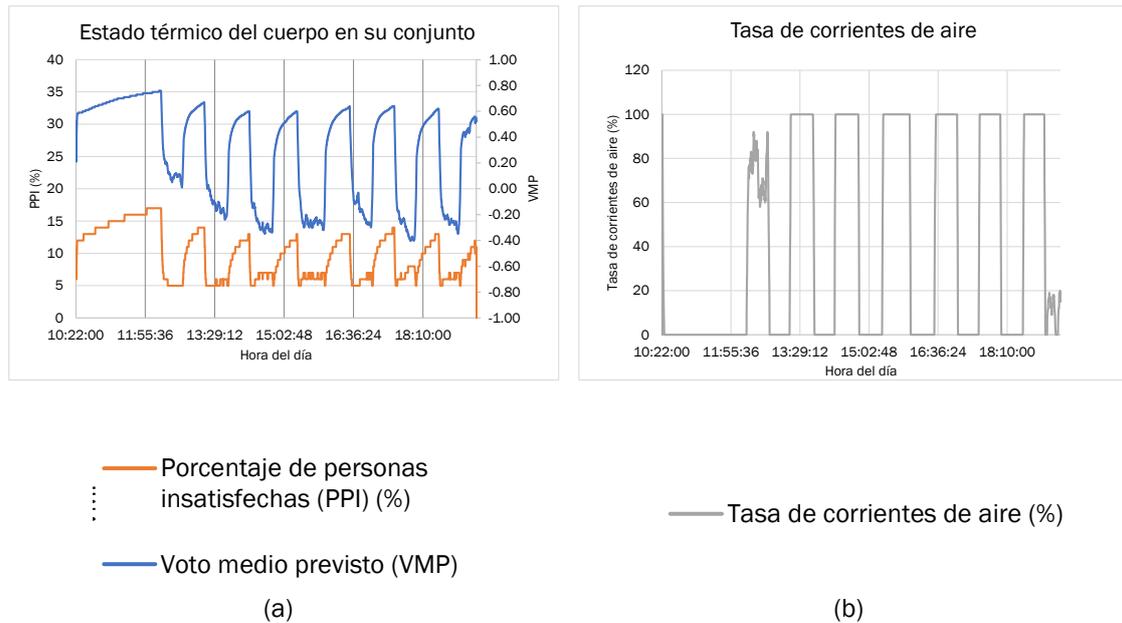


Figura 37 - Medidas del equipo de confort térmico en los ensayos del día 3.

4.2.4.9. Conclusiones al finalizar los ensayos del día 3.

Durante la mañana, con el equipo parado y el periodo de ventilación natural incluida, la evolución del ambiente en el caso A (Figura 36.a y 36.c) toma una forma similar a la de los días anteriores (Figura 24.a y 24.c) (Figura 30.a y 30.c); la diferencia más notable radica en el salto de temperatura que se consigue en el momento de ventilar, siendo mayor en el día 1, lo cual puede ser consecuencia de un mayor viento en el exterior (Figura 38) (y cerca de 1°C menos de temperatura) que favorezca el movimiento del aire dentro de gracias a la ventilación cruzada. En el caso B (Figura 36.b y 36.d), tenemos una situación similar a la del día anterior. Con las ventanas abiertas toda la noche y parte de la mañana se registra un descenso gradual de la temperatura, siendo el mínimo conseguido mayor que el obtenido en el caso A con solo un corto periodo de tiempo con las ventanas abiertas. Durante las horas más frescas de la mañana contar con ventilación cruzada ayuda en una modificación más notable de las condiciones de todas las zonas de la casa.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

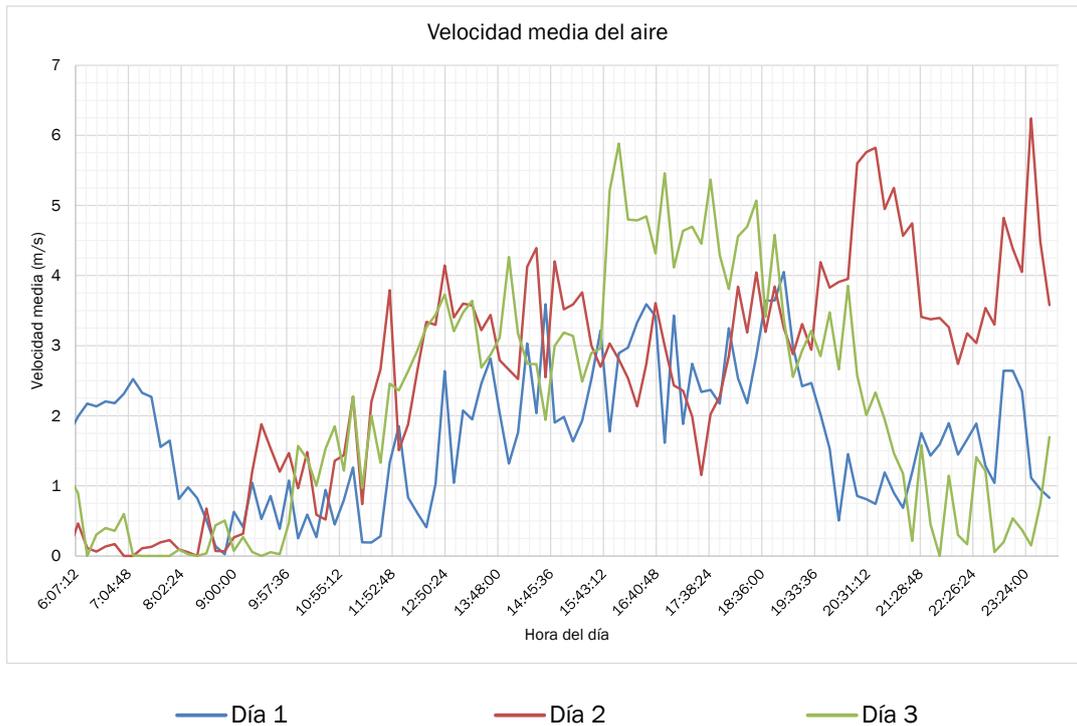


Figura 38 - Velocidad media del aire, en el día 1,2 y 3, medida por la estación meteorológica del edificio LUCIA.

Si ahora, como en las conclusiones de los días anteriores, nos fijamos en los momentos de arranque y paradas del equipo en términos de tiempo (comparando las pendientes en los dos casos de estudio entre sí), comprobamos que tanto las pendientes de las temperaturas (Figura 39.a, 39.c) como las de las humedades relativas (Figura 39.b, 39.d) son muy similares, por lo tanto, los tiempos empleados en alcanzar estados análogos no difieren entre los casos de estudio. En cuanto a los saltos de temperatura en la zona ocupada (Figura 40), las variaciones entre los diferentes ensayos (de cada caso por separado) son muy similares entre sí. Si comparamos un caso con el otro se puede ver que, durante el funcionamiento del equipo, se obtiene, en general, mayor descenso de temperaturas en el caso A (siendo en el ensayo 2 la mayor diferencia entre el caso A y el caso B con $1,1^{\circ}\text{C}$) posiblemente debido a la permanente ocupación del salón por una persona en el caso B, mientras que en el caso A la ocupación de la estancia se da de manera intermitente. Después de parar los equipos en ambos casos, la temperatura vuelve a aumentar prácticamente los mismos valores que se habían conseguido de descenso. Probablemente sin una carga térmica que amortiguar permanentemente en el caso B se hubieran obtenido mayores descensos en la temperatura que serían cercanos a los obtenidos en el caso A. En cuanto a las humedades relativas en la zona ocupada (Figura 41), en el primer ensayo, en ambos casos, la variación es muy grande porque partimos de unas condiciones de confort cercanas a los límites. Una vez acondicionado el espacio, después de esta primera puesta en funcionamiento, en el resto de los ensayos las variaciones de humedad relativa ya no son tan elevadas y en la mayoría de los ensayos (si tenemos en cuenta la precisión de las sondas, Tabla 7) son valores similares. Como sucede con la

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

temperatura, en la mayoría de los ensayos (de ambos casos) después de parar los equipos la humedad relativa vuelve a descende alrededor de los mismos valores que se habían conseguido aumentar durante el funcionamiento. Por todo lo anterior se concluye que la ventilación cruzada durante el funcionamiento de los equipos no es relevante en la zona climatizada.

En las zonas no acondicionadas de ambos casos observamos el mismo comportamiento que en los días anteriores. Durante la realización de los ensayos, la temperatura (Figura 39.e) sufre muy leves modificaciones mientras que la humedad relativa (Figura 39.f) se aprecian claramente variaciones, por lo que la existencia de ventilación cruzada no es el factor influyente para que se den estas situaciones.

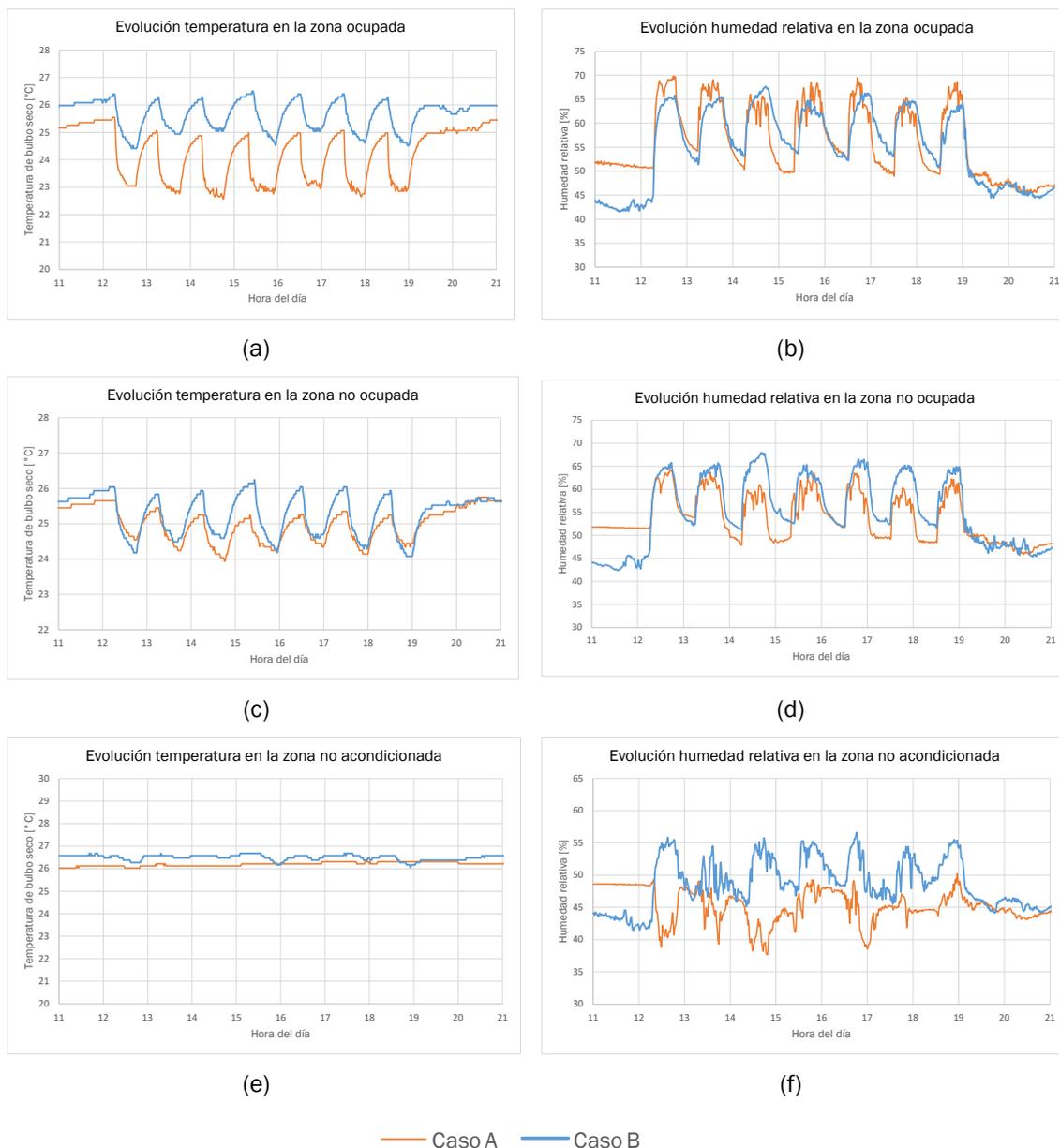


Figura 39 - Evoluciones de las temperaturas y humedades en las diferentes zonas para los ensayos del día 3

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

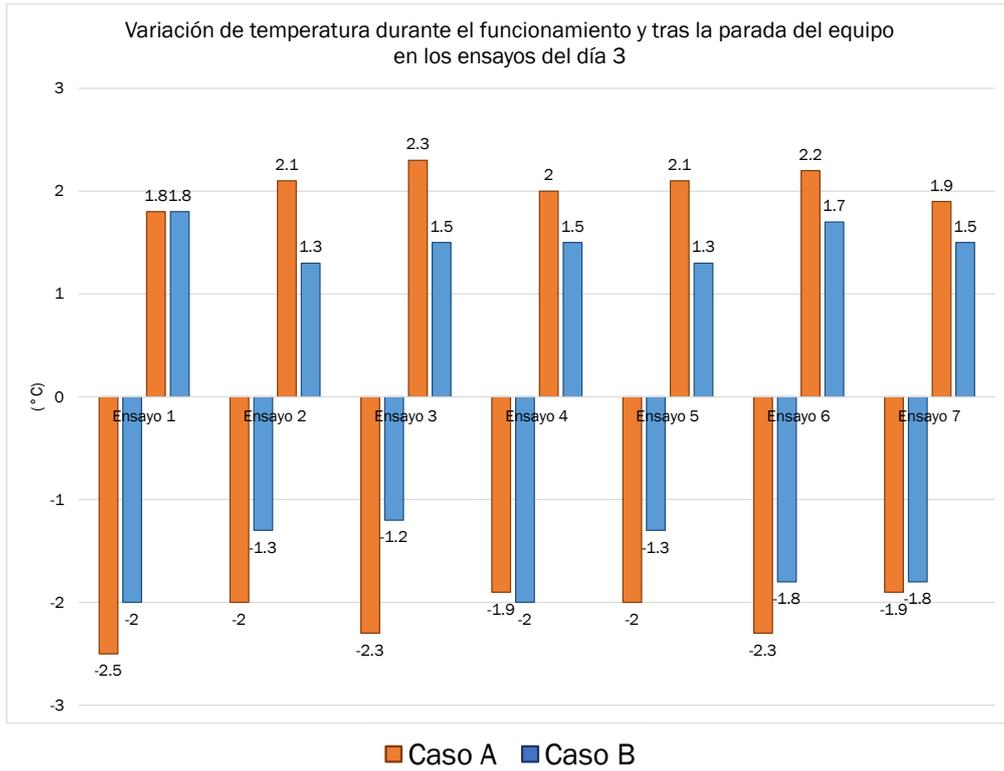


Figura 40 - Variación de la temperatura durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 3.

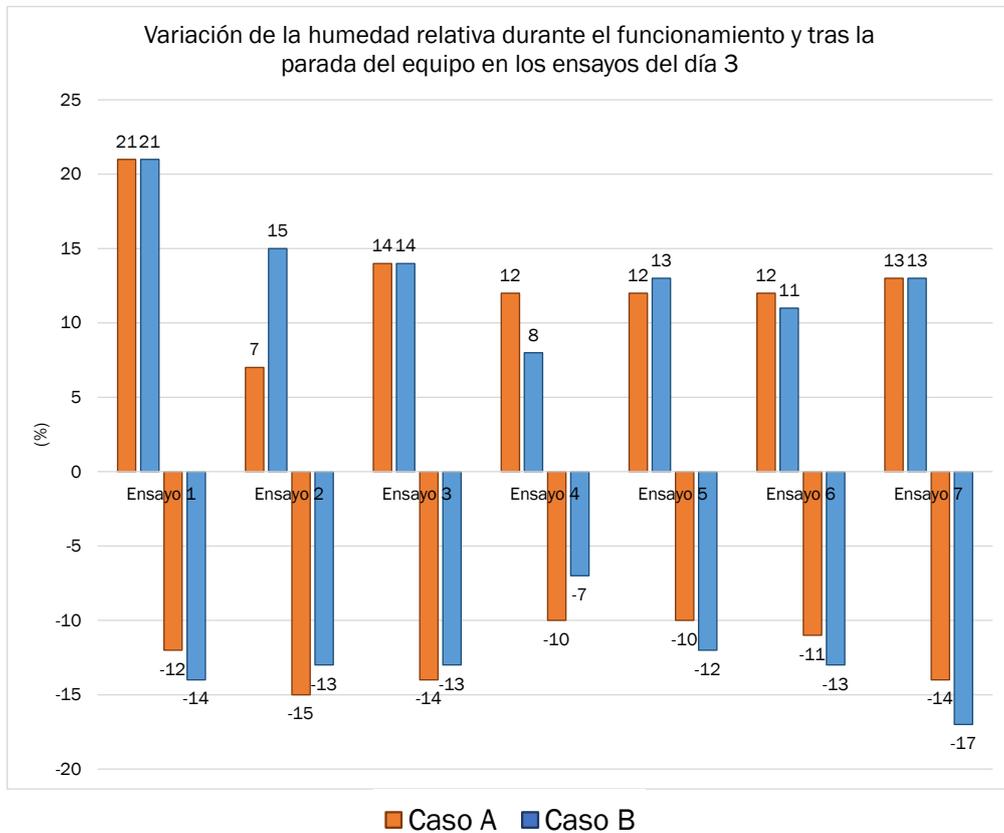


Figura 41 - Variación de la humedad relativa durante el funcionamiento y tras la parada del equipo en la zona ocupada durante los ensayos del día 3.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

Se podría esperar que este modo de funcionamiento del equipo (en periodos cortos) consiguiera después de cada ensayo unas condiciones de temperatura de menores que las del ensayo directamente anterior y, por consiguiente, unos saltos de temperatura de manera global mayores que los obtenidos en los días anteriores, pero como ya se ha explicado, el funcionamiento del equipo está limitado por la temperatura de saturación adiabática dada por las condiciones de entrada del aire al equipo y no por el modo de uso del equipo. En el caso A (Figura 42) sí que parece que en el día 3 se obtienen unos mejores resultados, puesto que las máximas temperaturas alcanzadas tras cada ensayo se quedan por debajo de la primera temperatura de partida y los mínimos alcanzados son menores que en otros días, pero si nos fijamos en la Figura 44, la variación del rango de temperaturas durante el funcionamiento global del equipo no es tan diferente de los otros días. En el caso B (Figura 43), tenemos temperaturas mínimas del día 3 similares a las alcanzadas en los otros ensayos de los días anteriores, pero al igual que pasa en el caso A, si nos fijamos en el rango de temperaturas durante el funcionamiento global del equipo (Figura 44) el día 3 tampoco destaca anormalmente.

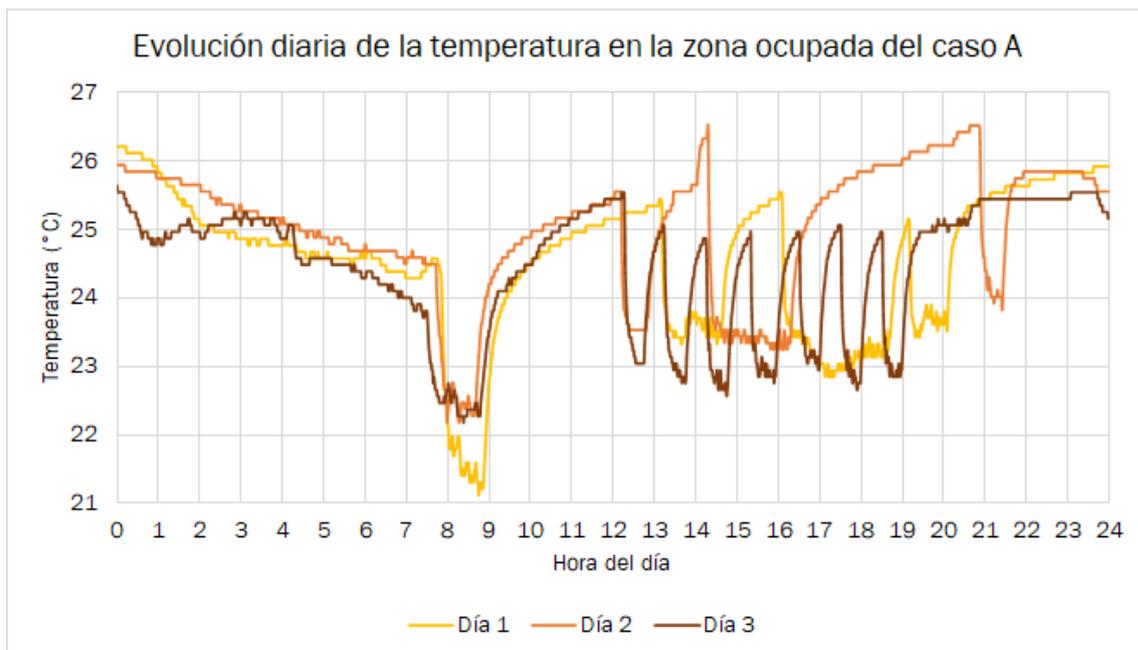


Figura 42 - Evolución diaria de la temperatura en la zona ocupada del caso A.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales

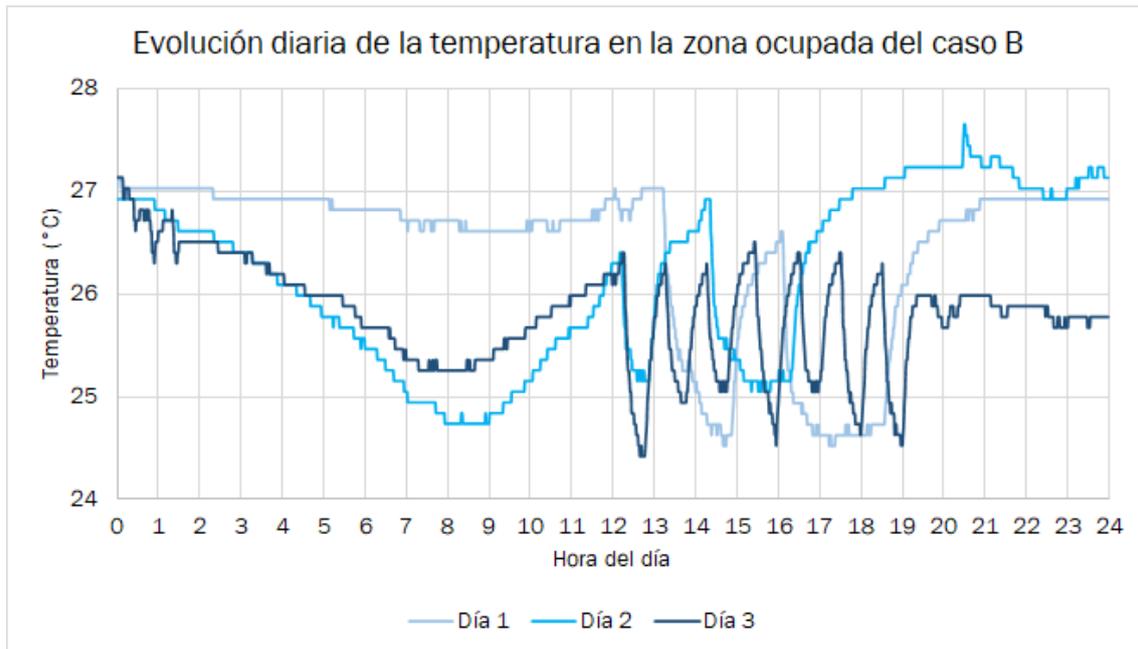


Figura 43 - Evolución diaria de la temperatura en la zona ocupada del caso B.

Aunque el análisis de las medidas del equipo de confort térmico del día 3 sea ligeramente más favorable entre ensayos que en los días anteriores (ya que no se alcanza el 15% de PPI), a la vista de los rangos obtenidos tanto en temperatura como en humedad relativa (Figura 44 y Figura 45) no parece que este modo de funcionamiento aporte mayores beneficios. Se puede concluir, por lo tanto, que los ocupantes pueden libremente poner en funcionamiento el equipo, indistintamente en un periodo largo o varios periodos cortos.

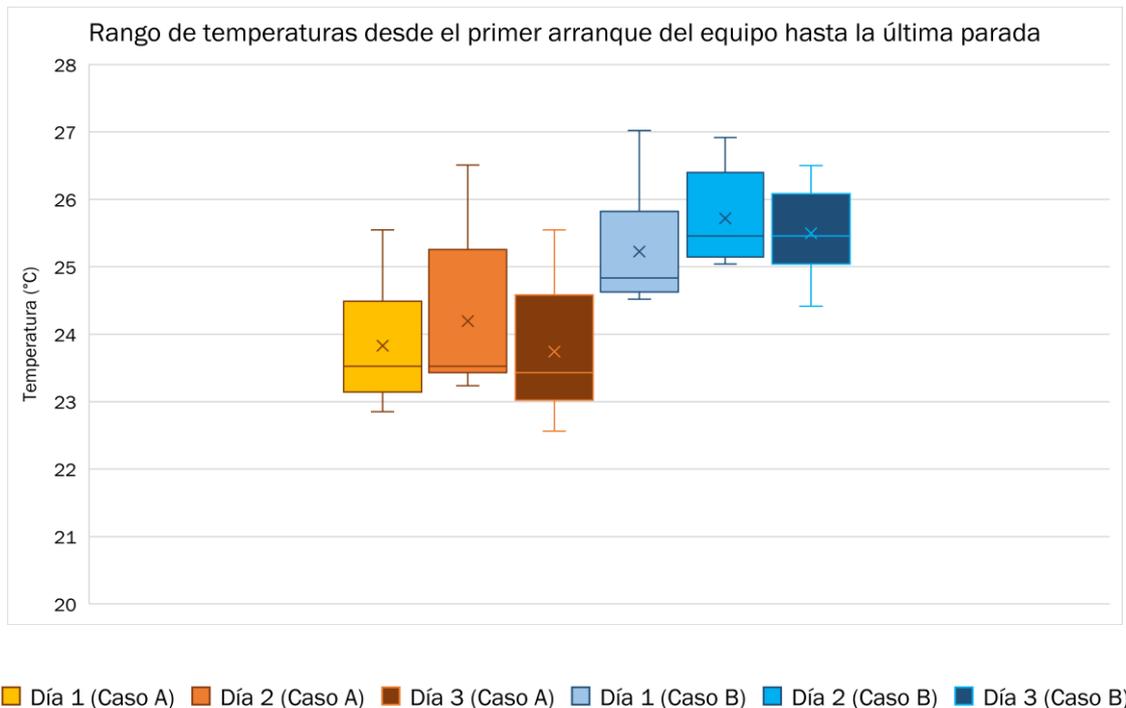
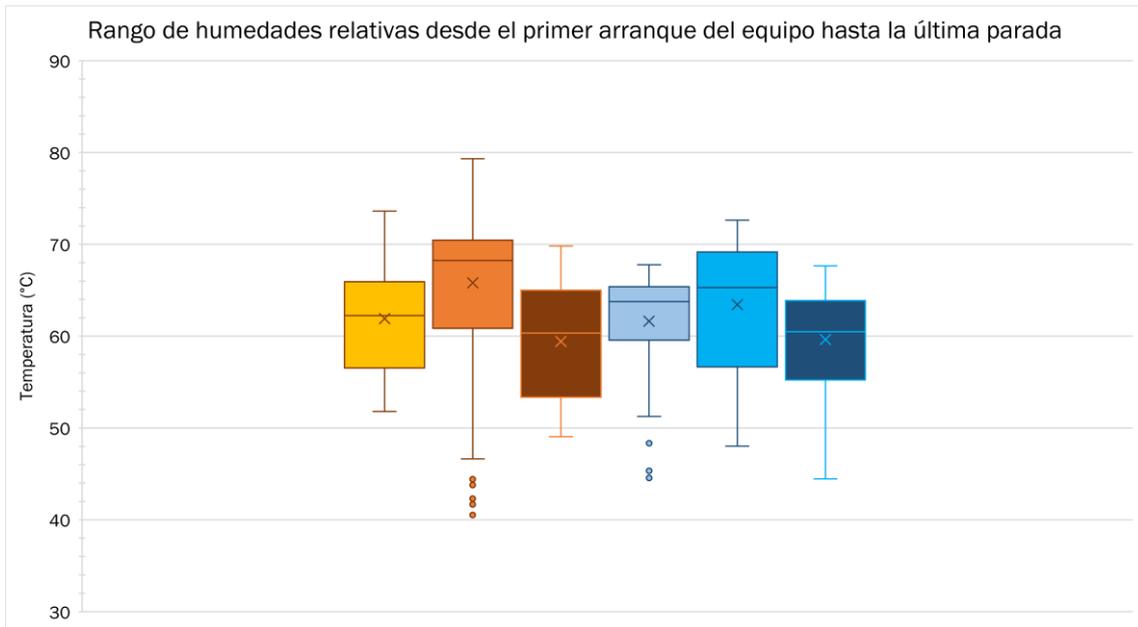


Figura 44 - Rangos de temperaturas alcanzados durante el funcionamiento de los equipos.

4. Caracterización de equipos portátiles de enfriamiento evaporativo en interiores residenciales



■ Día 1 (Caso A) ■ Día 2 (Caso A) ■ Día 3 (Caso A) ■ Día 1 (Caso B) ■ Día 2 (Caso B) ■ Día 3 (Caso B)

Figura 45 - Rangos de humedades relativas alcanzados durante el funcionamiento de los equipos.

5. USO DE EQUIPOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN EXTERIORES

Al contrario que los sistemas de refrigeración mecánica, cuya eficiencia está supeditada a su funcionamiento en interiores con las ventanas y puertas cerradas, los sistemas de enfriamiento evaporativo no son exclusivos de espacios interiores, al ser posible su instalación en lugares abiertos y al aire libre. De hecho, el RITE, en la instrucción técnica IT1.2.4.6 “sobre aprovechamiento de energías renovables y residuales” [22], establece que en la climatización de espacios abiertos solo se podrá recurrir a fuentes renovables o residuales y no a energía convencional, por lo que los sistemas de enfriamiento evaporativo debido a los mínimos requerimientos de energía para su funcionamiento son una de las opciones indicadas (a menudo estos equipos se clasifican como medios de enfriamiento pasivo o gratuito) [15].

Un ejemplo muy extendido de estos equipos en el exterior son los sistemas de pulverización de agua (Figura 12) que ya hemos mencionado anteriormente. Aunque estos sistemas trabajan sin acumulación de agua recordamos que su funcionamiento se basa en la generación de aerosoles, por ello están sujetos a la normativa de prevención de la legionelosis y es de suma importancia prestar atención a su diseño y su mantenimiento.

Como ya se dijo en el apartado de los fundamentos del enfriamiento evaporativo, el intercambio ideal de energía entre el entorno y los seres humanos quedaría repartido de la siguiente manera [14]:

- 50% por radiación.
- 30% por evaporación.
- 15% por convección.
- 5% por conducción.

A la vista de este reparto, el objetivo que se busca es conseguir una mayor afectación sobre las condiciones de confort con un sistema de climatización y minimizar los problemas de los actuales equipos, para lo que se han llevado a cabo diferentes estudios con sistemas desde superficie húmeda con menos nivel de compacidad, que los sistemas convencionales de relleno rígido, en los que se permita un mayor intercambio de energía mediante radiación. Esos sistemas no sólo operan sobre la temperatura seca del aire, sino que principalmente lo hacen sobre la radiante del espacio a acondicionar.

5.1. Ensayos previos.

Los antecedentes de los ensayos que se van a presentar y analizar más adelante son los de un trabajo de fin de grado [26] realizado al amparo del Grupo de Investigación Reconocido de Termotecnia de la Universidad de Valladolid, en el que se ensaya experimentalmente un sistema de enfriamiento evaporativo desde superficie húmeda de tipo textil para mejorar el confort térmico en terrazas durante el verano. El estudio se realizó en el interior de un aula del Laboratorio de Calor y Frío de la Escuela de Ingenierías Industriales perteneciente a la Universidad de Valladolid, simulando con una bomba de calor las condiciones ambientales de verano, ya que los ensayos y toma de datos para la elaboración del trabajo de fin de grado tuvo lugar durante los días finales de invierno. A la vista de las conclusiones obtenidas en ese trabajo, con la llegada de verano, el mismo grupo mencionado anteriormente, pidiendo los permisos pertinentes a la Escuela de Ingenierías Industriales, ocuparon la terraza de ese edificio para reproducir los ensayos recogidos en el trabajo de fin de grado en un entorno real con condiciones de verano reales. Los datos procedentes de los ensayos realizados en la terraza de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid los días 26, 27 y 28 de julio de 2017 no han sido revisados y analizados hasta este momento.

5.2. Ensayo en exterior.

Antes de proceder con los datos y su análisis, se hará una breve explicación de la metodología de los ensayos.

5.2.1. Metodología.

Se construyó una estructura portante en cuyo interior se colocó el equipo de medida de confort térmico (Figura 46), *Vivo Comfort* del fabricante *Dantec Dynamics* (Figura 22.a, 22.b y 22.c) y cuyas características pueden consultarse en la Tabla 7. Posteriormente, la estructura fue cubierta por telas que serán utilizadas como medio de humectación y de apantallamiento (Figura 47.a y 47.b).

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores



Figura 46 - Estructura portante y equipo de medida de confort térmico en el interior.



(a)



(b)

Figura 47 - Estructura portante cubierta por telas: (a) vista desde el exterior y (b) vista desde el interior.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

En el exterior fueron colocados: un adquisidor *Testo 435* para medir velocidad del aire (mediante una sonda de molinillo), un piranómetro para registrar la radiación solar y una sonda *Testo 175H1* (Figura 20) para registrar temperatura seca y humedad relativa y cuyas características pueden consultarse en la Tabla 7.



Figura 48 – Piranómetro y sonda de molinillo Testo 435

El objetivo de estos ensayos es comprobar cómo se modifican las condiciones ambientales en un espacio exterior apantallado mediante un material textil humedecido con agua durante los días de verano.

5.2.2. Ensayo día 1.

Las sondas exteriores comienzan a recibir sol en torno a las 11:40 – 11:50, como puede comprobarse en la (Figura 51.a y 51.b) pero no es hasta las 12:20 de la mañana cuando toda la estructura se encuentra bajo el sol. La humectación de las telas comienza aproximadamente a las 12:45 y este proceso se realiza de manera manual, vertiendo agua sobre las telas que se encuentran sujetas a la estructura (Figura 49).



Figura 49 – Estructura portante con telas humedecidas por agua.

Con las telas ya húmedas se registran afectaciones en las condiciones ambientales del interior de la estructura (Figura 50): se produce un aumento de la humedad relativa, llevándola a niveles más aceptables, y se observa una disminución de las temperaturas operativa y seca, siendo este descenso más acusado en la temperatura operativa. Mientras las telas se van secando se puede observar que las temperaturas van en aumento, pero a un ritmo más lento de lo que cabría esperar si no estuvieran colocadas las telas, y la humedad relativa cada vez va siendo menor. A partir de las 14:00 las telas ya se encuentran secas y se aprecia como las temperaturas (operativa y seca) comienzan a ir claramente en aumento (manteniendo una diferencia entre ellas relativamente constante) mientras que la humedad relativa sigue disminuyendo. A las 16:35, aproximadamente, se retiran las telas de la estructura, lo que hace que la temperatura operativa aumente su diferencia respecto de la temperatura seca.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

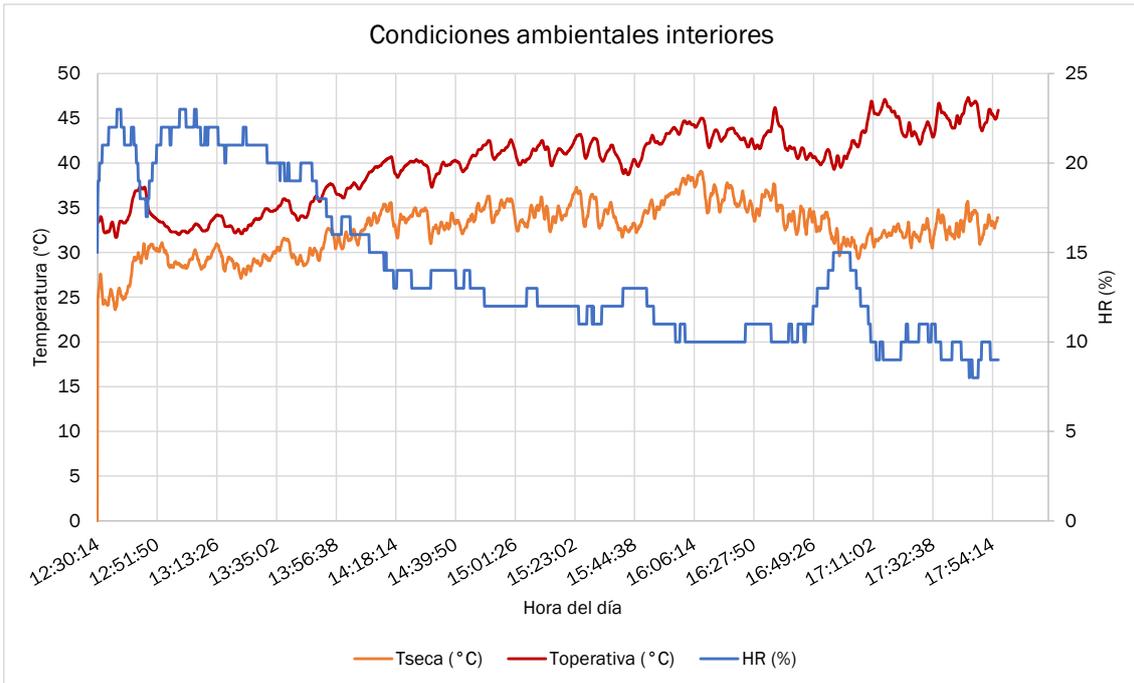
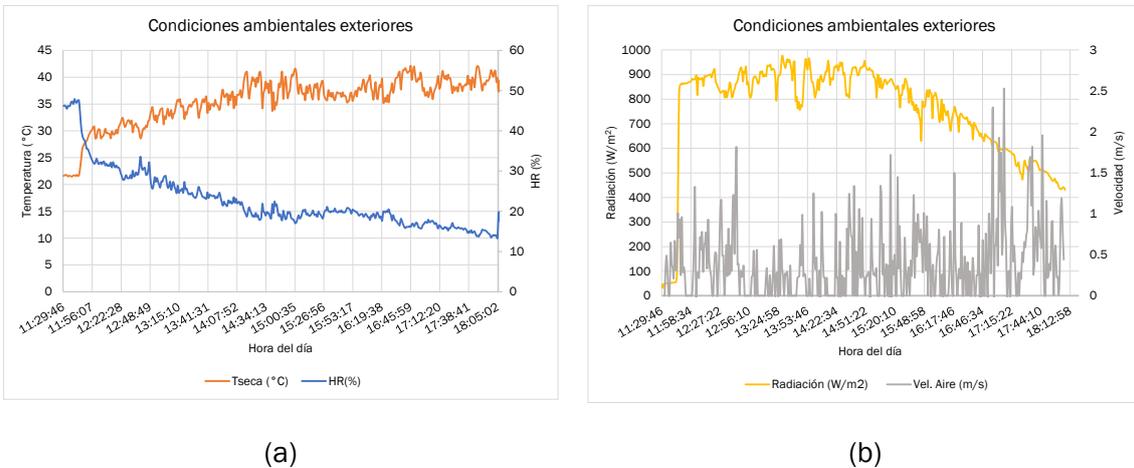


Figura 50 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 1.



(a)

(b)

Figura 51 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 1: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.

5.2.3. Ensayo día 2.

Para este día la humectación de las telas se plantea hacer de manera automática rodeando, por la parte superior, la estructura portante con un tubo con orificios que dispensen el agua hacia las telas.

Hacia las 11:40 las sondas exteriores comienzan a recibir sol, como puede verse puede comprobarse por el rápido aumento de la radiación (Figura 53.b), el

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

aumento de temperatura seca exterior y la disminución de humedad relativa (Figura 53.a). Antes de que comience a dar el sol dentro de la estructura esta queda cubierta por las telas. A las 12:20 ya se tiene toda la estructura portante cubierta bajo el sol y se da comienzo a mojar las telas mediante el sistema de tubos, pero este método solo consigue mojar una de las esquinas, por lo que opta por volver al procedimiento de humectación de manera manual. Debido al rápido secado de las telas se humectan manualmente en varios ciclos. Se observa cómo durante el período en el que se procura mantener las telas humedecidas, tanto las temperaturas operativa y seca como la humedad relativa se mantienen relativamente estables; mientras que la temperatura operativa y la temperatura seca no exceden de 35°C y poco más de 30°C, respectivamente, la humedad relativa se acerca al 20%, no reduciéndose tanto como se esperaría de encontrarse las superficies de sombreado (telas) secas.

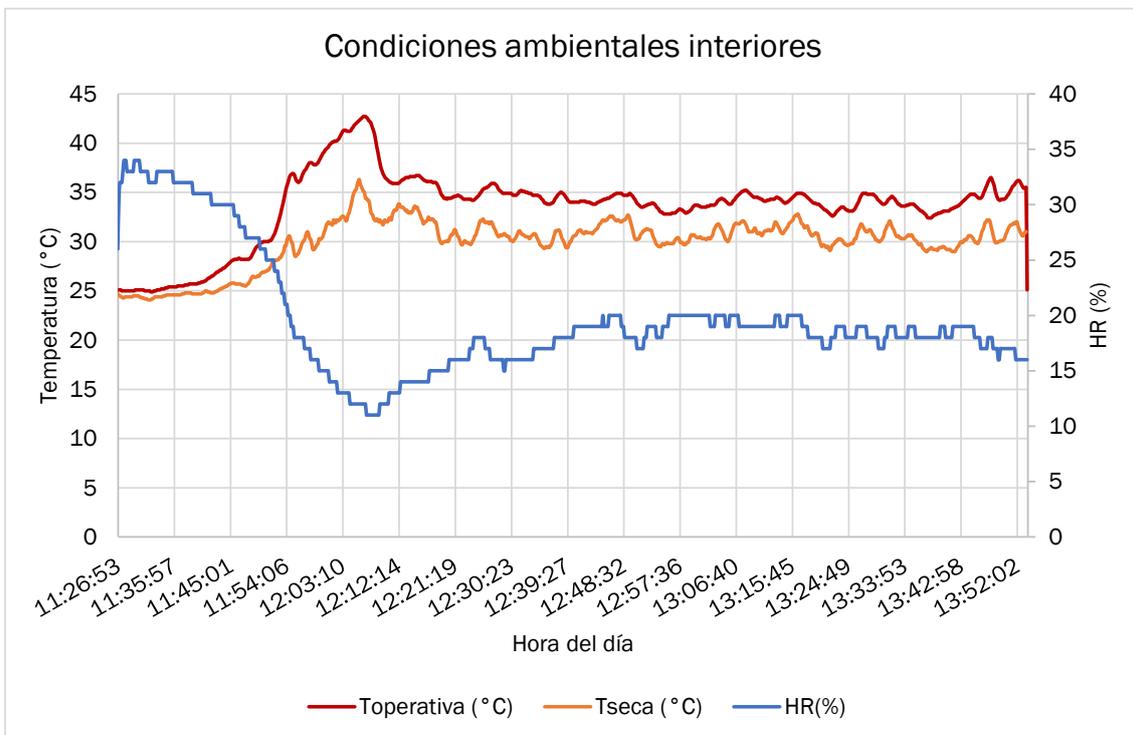


Figura 52 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 2.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

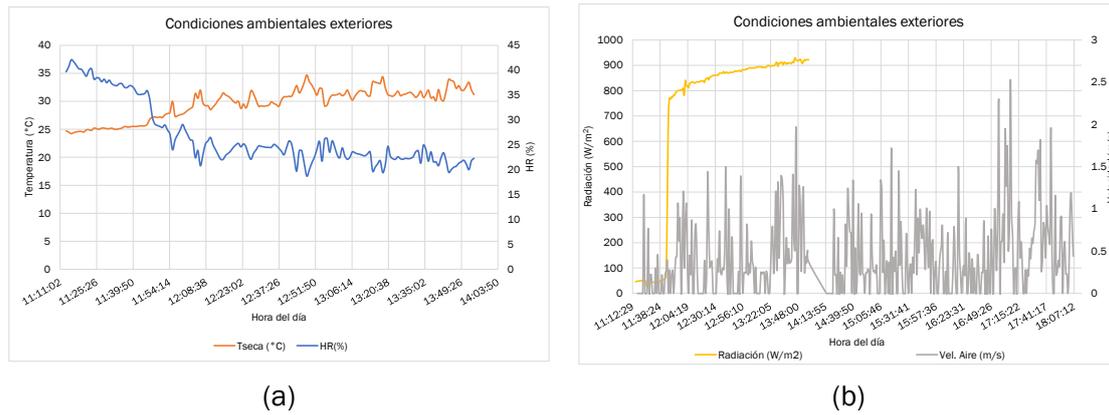


Figura 53 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 2: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.

5.2.4. Ensayo día 3.

En el último día de ensayo se vuelve a intentar mojar las telas de manera automática. El tubo encargado de repartir el agua se envuelve en papel para mejorar su distribución y se condenan algunos de los orificios.



Figura 54 - Sistemas de humectación mediante un tubo alrededor de la estructura portante.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

A las 11:25 las telas ya se encuentran montadas sobre la estructura. Como en el día anterior, las sondas exteriores comienzan a recibir sol hacia las 11:40, como se evidencia en la Figura 56.a y 56.b, por un aumento de la temperatura exterior y disminución de la humedad relativa y un aumento drástico de la radiación solar. A las 11:50 se procede a la humectación de las telas mediante el sistema de tubos. Se realizan varios intentos, pero se comprueba que esta técnica vuelve a ser muy irregular y no es la adecuada para continuar con el ensayo, por lo que se decide realizar el proceso de manera manual.

A las 13:00 y a las 13:15 se empapan las telas y se observa como la temperatura operativa y la seca del aire interior disminuyen (Figura 55), dándose una mayor bajada en la temperatura operativa. También se consigue una mejora en la humedad relativa. A medida que se van secando las telas la evolución de las temperaturas va en aumento hasta que a las 13:45 las telas están prácticamente secas, momento en el que la humedad relativa comienza a disminuir.

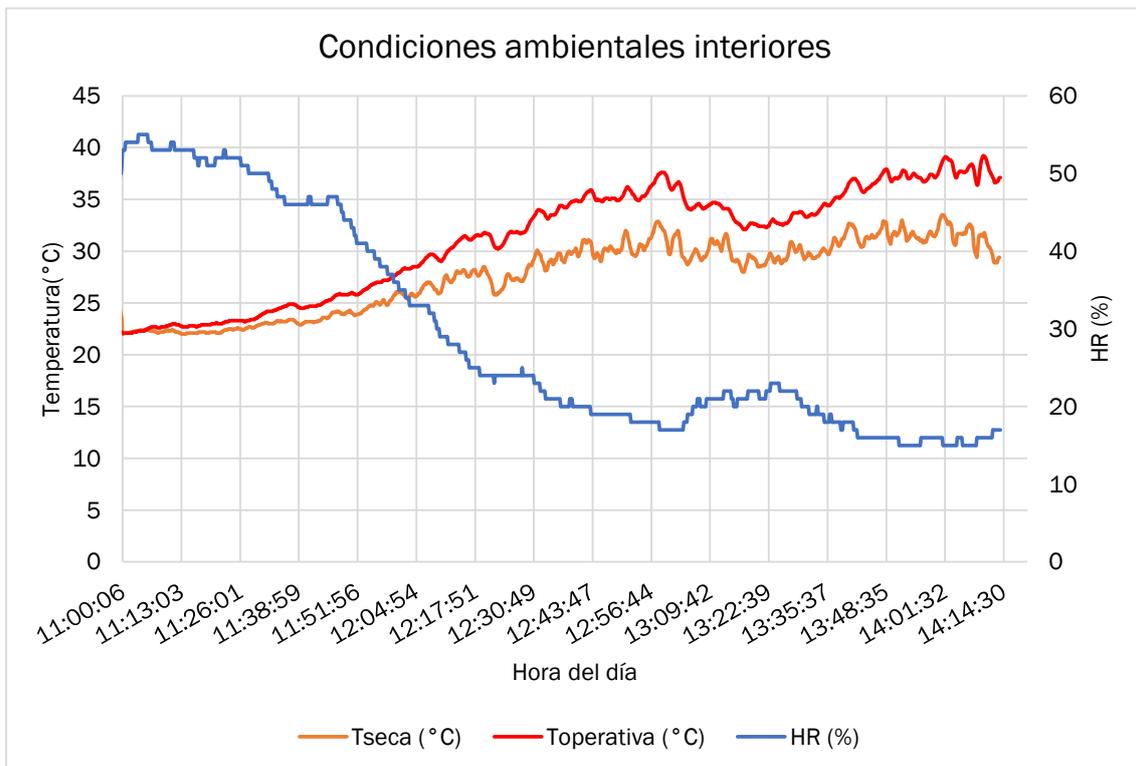


Figura 55 - Condiciones ambientales interiores durante el ensayo del día 3.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

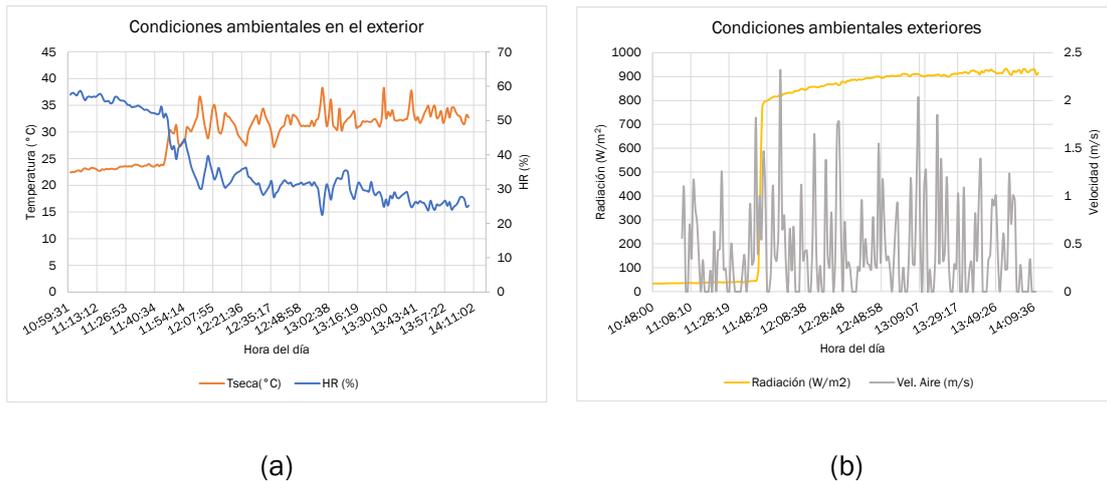


Figura 56 - Condiciones ambientales exteriores durante el ensayo del día 3: (a) Temperatura seca y humedad relativa y (b) Velocidad del aire y radiación solar.

5.2.5. Conclusiones del ensayo en exterior.

Se comprueba que con la humectación del medio textil colocado en la estructura portante se consigue una caída de la temperatura seca del interior y de la temperatura operativa, siendo esta última una caída más acusada, corroborando de esta manera que mediante este sistema de enfriamiento evaporativo se consigue afectar también la temperatura radiante del entorno. La humedad relativa también se ve afectada, pero de una manera mucho más leve que con un sistema de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido.

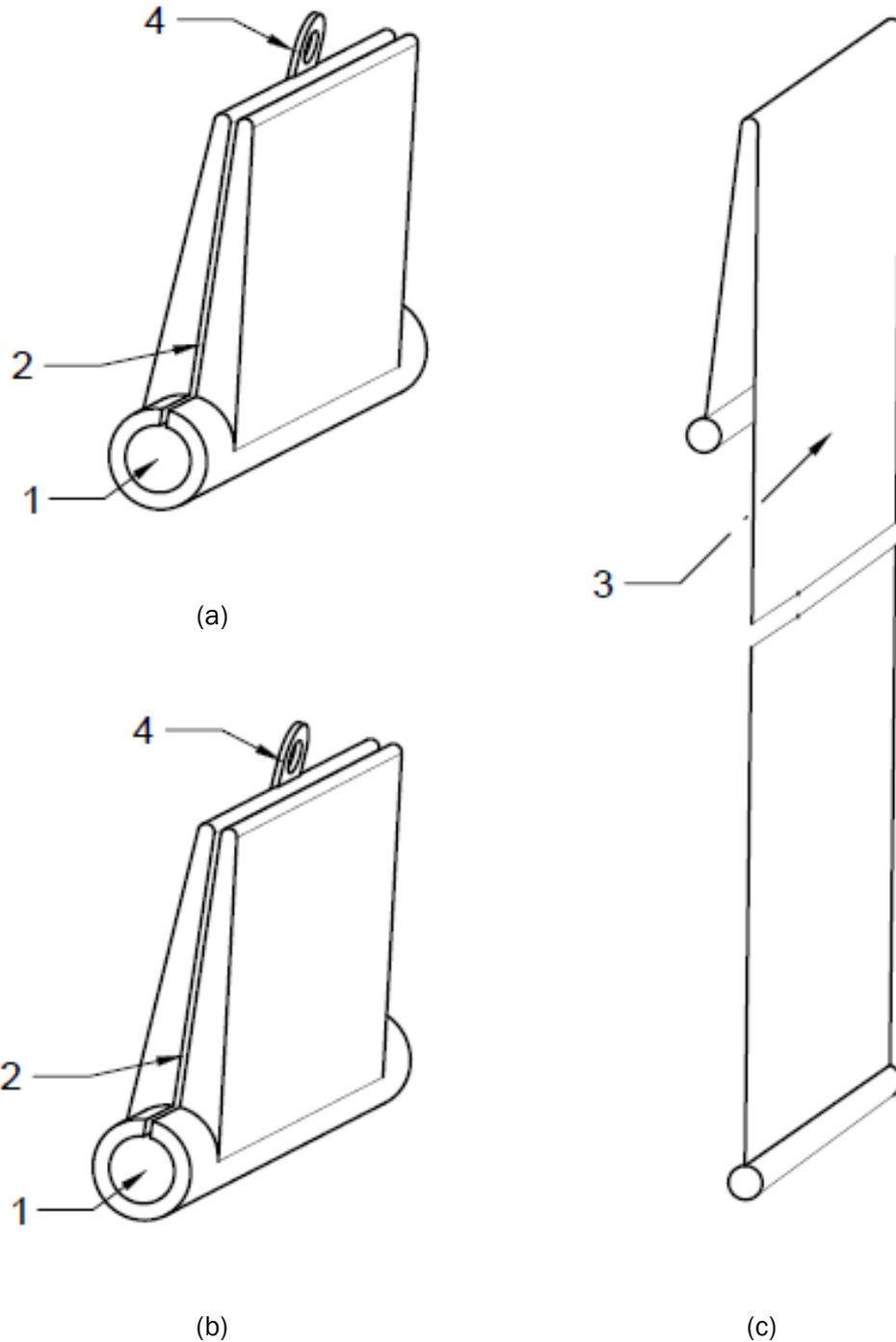
5.3. Diseño del prototipo.

A la vista de las conclusiones obtenidas en el ensayo del sistema de enfriamiento evaporativo desde superficie húmeda textil en un entorno real y debido a los problemas presentados para humectación del medio de manera automática surge la oportunidad de diseñar un dispositivo para implementar

El diseño fue presentado al programa Prometeo organizado por la Fundación general de la Universidad de Valladolid (Funge). Este programa apoya e incentiva los proyectos innovadores de los alumnos de la Universidad de Valladolid con el fin de obtener un prototipo con orientación al mercado. Gracias a este programa se ha podido solicitar una patente sobre este diseño y actualmente se encuentra a la espera de resolución.

Se propone, de esta manera, un elemento consistente en: un soporte superior (Figura 57.a), que a la vez hace la función de distribución de agua, un soporte inferior (Figura 57.b) (que podría ser opcional, como se explicará más

adelante) que puede evacuar un improbable exceso de agua y, sujeto entre ambas piezas, un medio de humectación (Figura 57.c) desde el que se produciría el fenómeno de enfriamiento evaporativo.



1 → Conducto circulación agua.
2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

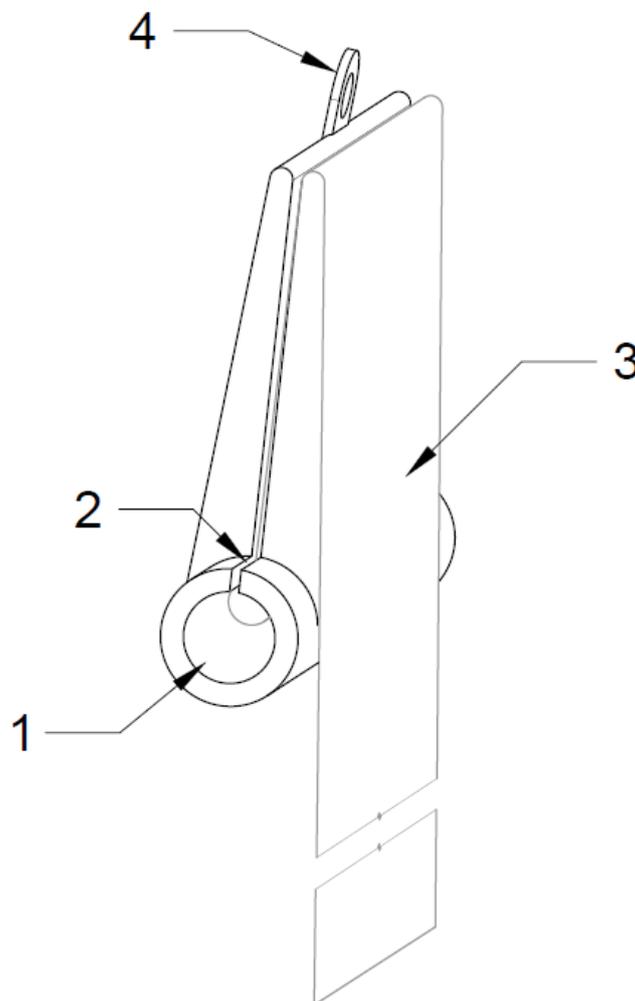
3 → Medio de humectación.
4 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 57 – Prototipo de acondicionamiento: (a) Soporte superior/Distribuidor de agua, (b) Soporte inferior/Evacuación de agua (opcional) y (c) Medio de humectación.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

El aporte de agua hacia el conjunto podrá hacerse desde la red de abastecimiento de agua para consumo humano, aunque en caso necesario podría conectarse a un sistema de bombeo ya existente, el cual podría ser alimentado mediante un pequeño módulo fotovoltaico (recordemos que los sistemas basados en enfriamiento evaporativo tienen unas necesidades de aporte externo de energía para su funcionamiento bastante reducidas). Este aporte de agua no necesariamente sería de manera continuada desde la red, podría realizarse posiblemente mediante pulsos implantando alguna técnica de control, como puede ser algún sistema de apertura periódica, por ejemplo.

El soporte superior o distribuidor de agua (Figura 57.a) se conectará al aporte externo de agua mediante el conducto de circulación de agua (número 1 en la Figura 58) lugar donde también se encuentra alojado el principio del medio de humectación (número 3 en la Figura 58).



1 → Conducto circulación agua.
2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

3 → Medio de humectación.
4 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 58 – Prototipo de acondicionamiento: Soporte superior/Distribuidor de agua con el medio de humectación.

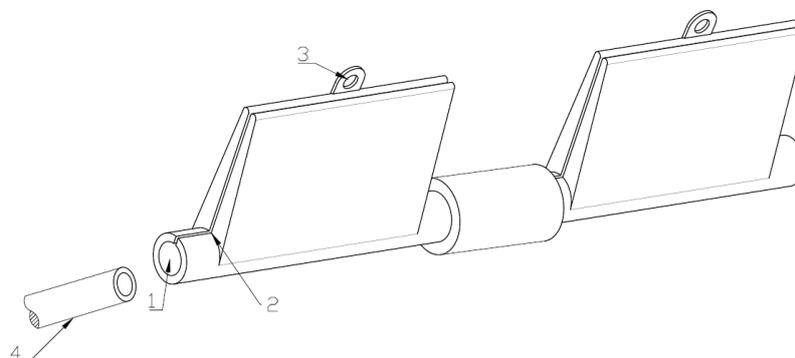
5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

El agua al fluir por ese conducto permite que, por la misma presión de la red, por capilaridad del propio medio de humectación y por gravedad, todo el medio de humectación quede saturado de agua y de esa manera se pueda dar comienzo al fenómeno de enfriamiento evaporativo. Al empezar a evaporarse el agua al contacto con la atmósfera que lo rodea, se consiguen varios efectos: se retira calor sensible del ambiente (se enfriaría el aire), se humidificaría el aire del entorno y también se enfriaría el propio medio de humectación lo cual contribuiría a la disminución de la temperatura radiante del espacio a acondicionar, además de que también podría funcionar como un elemento de sombra o apantallamiento.

Con este sistema de enfriamiento evaporativo se trabaja con menor superficie de contacto aire-agua en comparación con los sistemas convencionales de relleno rígido, en los que el medio de humectación tiene mayor compacidad. Se tiene también menor efecto de humectación en el aire, pero se intenta compensar con una mayor superficie de intercambio radiante (que se encontraría a la temperatura de bulbo húmedo) con los ocupantes del espacio.

Se contemplan para el medio de humectación diferentes tipos de materiales fabricados expresamente para tal fin como fibras plásticas o material de procedencia textil, del que ya se tiene experiencia previa adquirida en el Laboratorio de Calor y Frío de la Escuela de Ingenierías Industriales perteneciente a la Universidad de Valladolid como ha quedado patente en el anterior apartado, o incluso la posibilidad de la utilización de materiales reciclados.

En principio, se propone que la instalación de este sistema sea de manera modular, mediante la unión de varios distribuidores (Figura 59) pero existe la opción, porque sea de mejor conveniencia, de un único dispositivo de mayor tamaño. Como hemos comentado antes, el soporte inferior es opcional, ya que cabría la posibilidad de que quedase integrado en alguna maceta, tiesto o algún tipo de mobiliario verde (Figura 62).

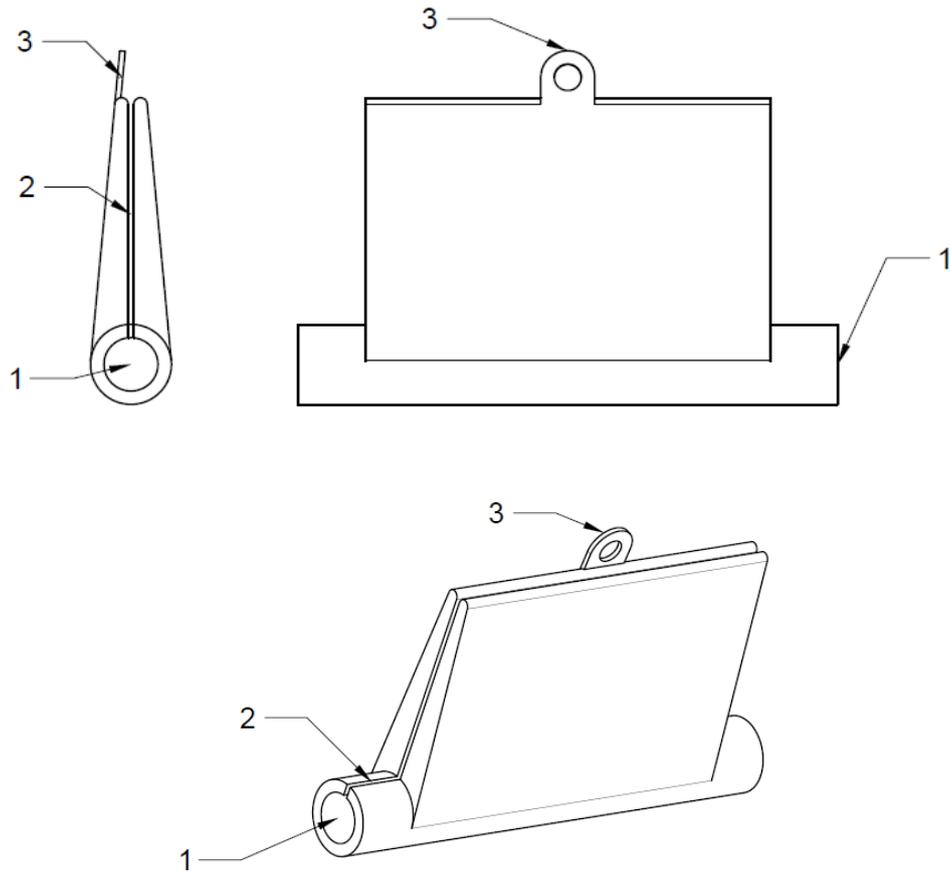


1 → Conducto circulación agua.
2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

3 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.
4 → Conexión a suministro de red.

Figura 59 - Prototipo de acondicionamiento: Sistema modular mediante la unión de varios distribuidores.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores



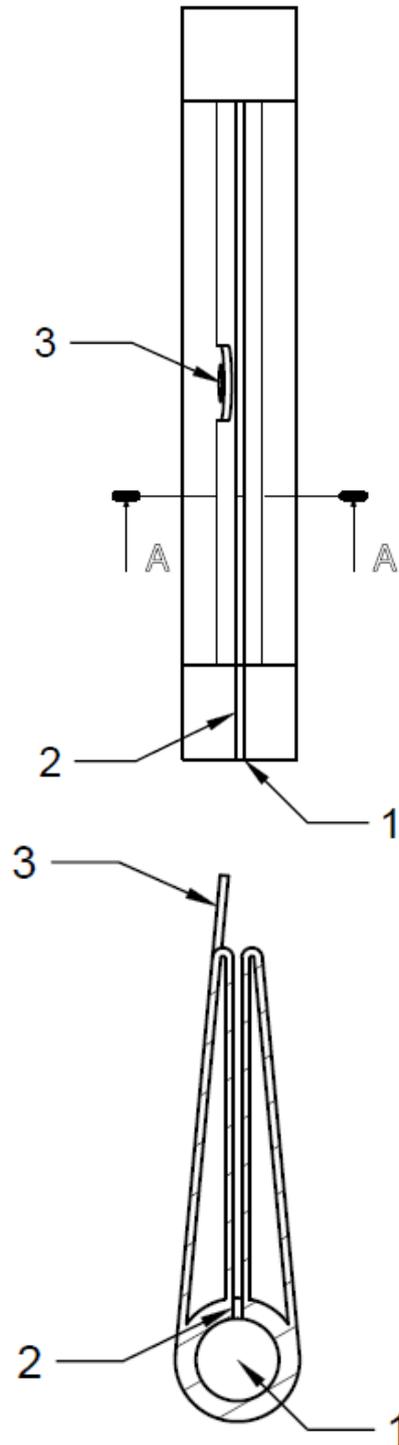
1 → Conducto circulación agua.

2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

3 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 60 - Diferentes vistas del distribuidor para configuración modular.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores



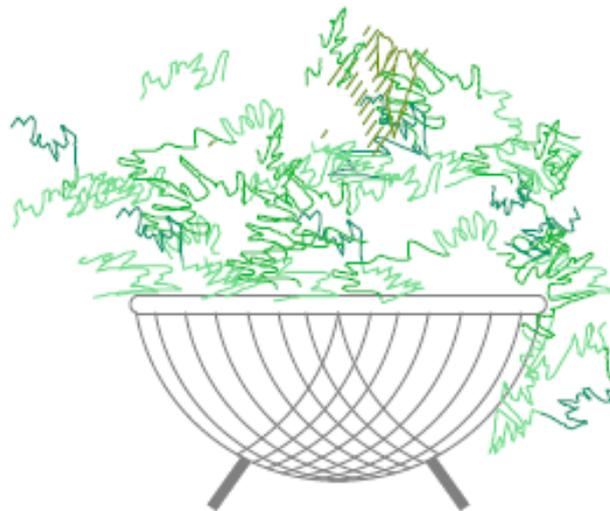
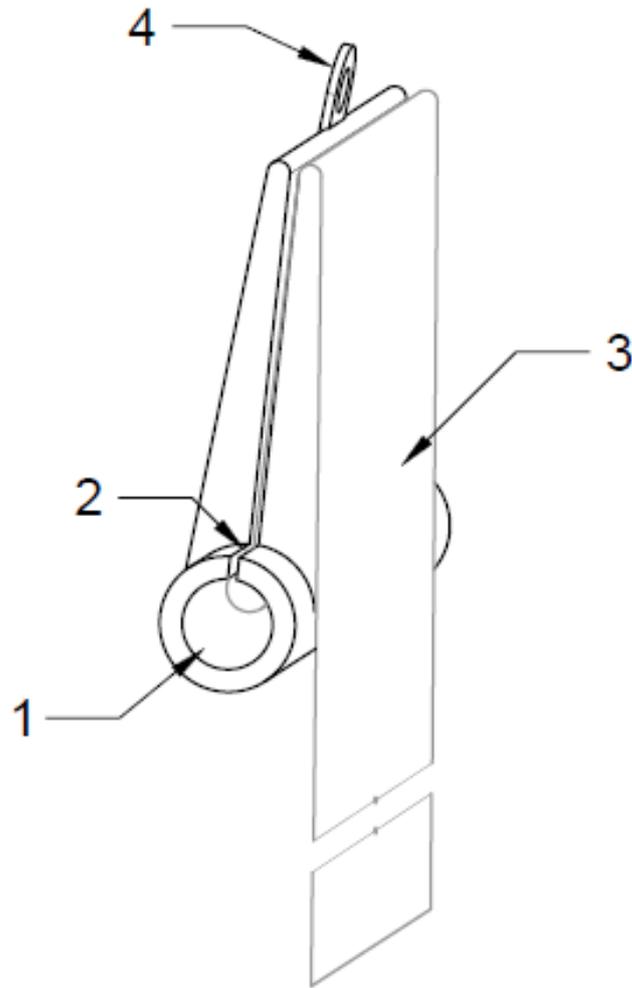
1 → Conducto circulación agua.

2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

3 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 61 - Vista superior y corte frontal del distribuidor.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

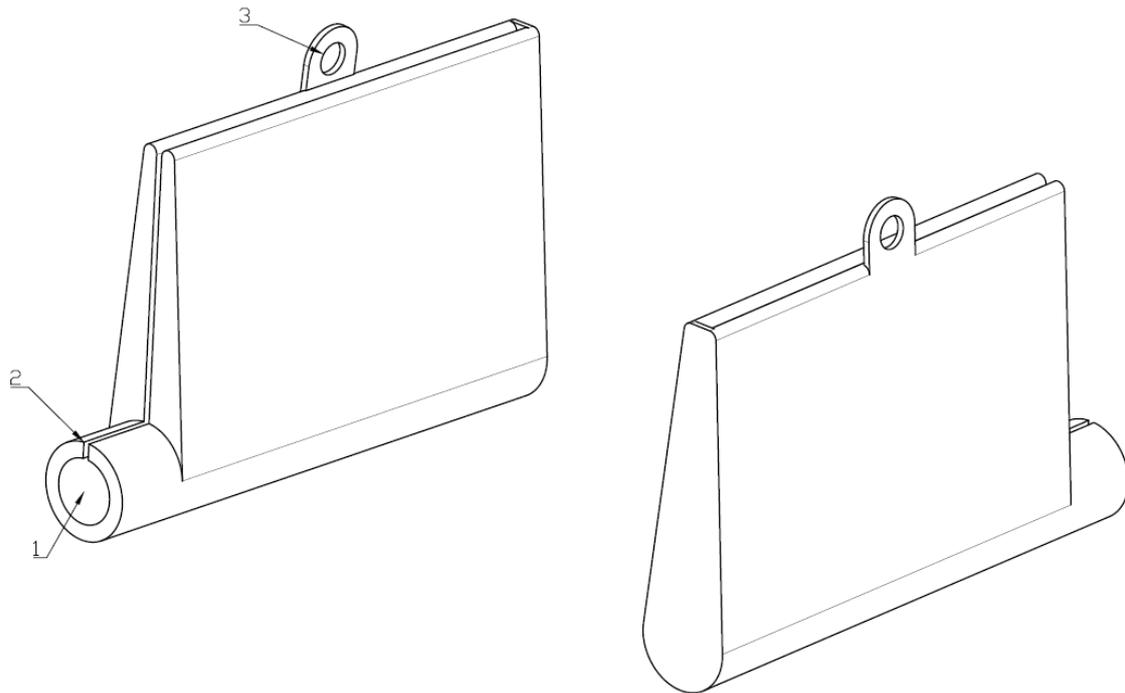


1 → Conducto circulación agua.
2 → Ranura de entrada del medio de humectación.

3 → Medio de humectación.
4 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 62 - Prototipo de acondicionamiento: Soporte superior/Distribuidor de agua y su posible integración en un elemento de mobiliario verde.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores



- 1 → Conducto circulación agua.
2 → Ranura de entrada del medio de humectación.
3 → Enganche para la colocación del dispositivo en estructura portante.

Figura 63 – Vista de un distribuidor de cierre o terminal.

En términos de seguridad, este dispositivo resulta interesante frente a posibles contaminaciones por bacterias, como puede ser la *Legionella*, ya que en este diseño se elimina la generación de aerosoles y la acumulación o recirculación de agua. Además, es posible que el medio de humectación cuente con algún tipo de tratamiento antibacteriano gracias a la naturaleza de su confección.

El prototipo ha sido modelado mediante *Catia*, un software de diseño asistido por ordenador e impreso gracias a la impresora 3D de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

A continuación, se muestran diferentes vistas del prototipo impreso en-3D.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores



Figura 64 - Prototipo impreso en 3D.

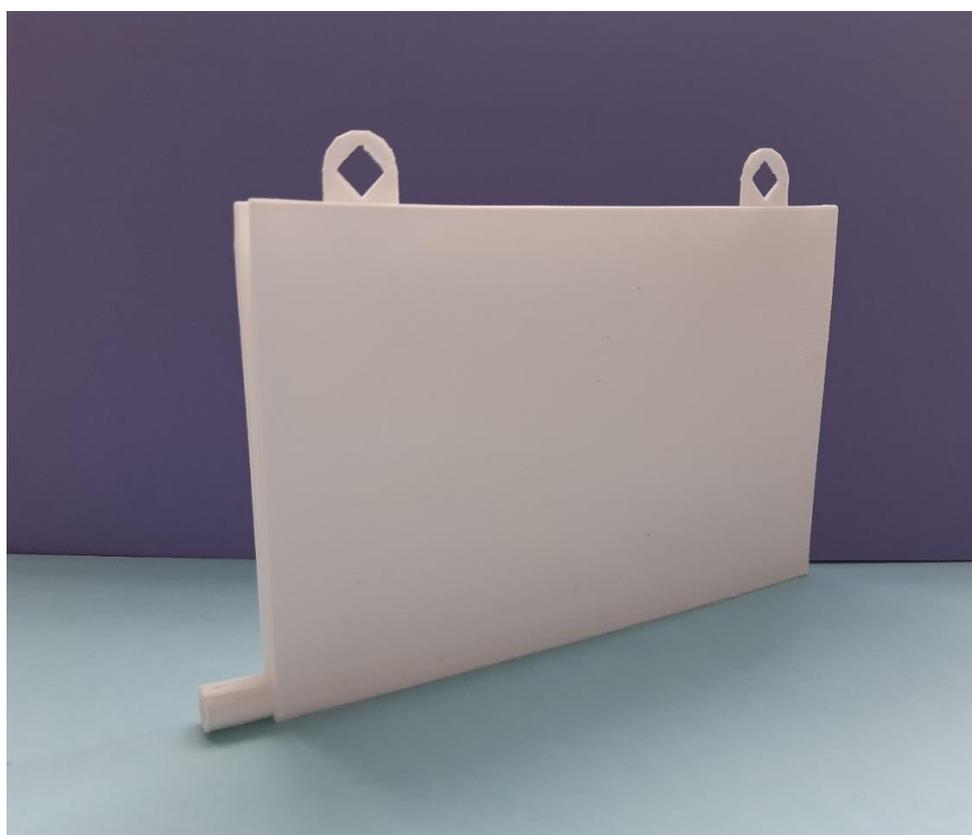


Figura 65 - Prototipo impreso en 3D.

5. Uso de equipos de enfriamiento evaporativo en exteriores

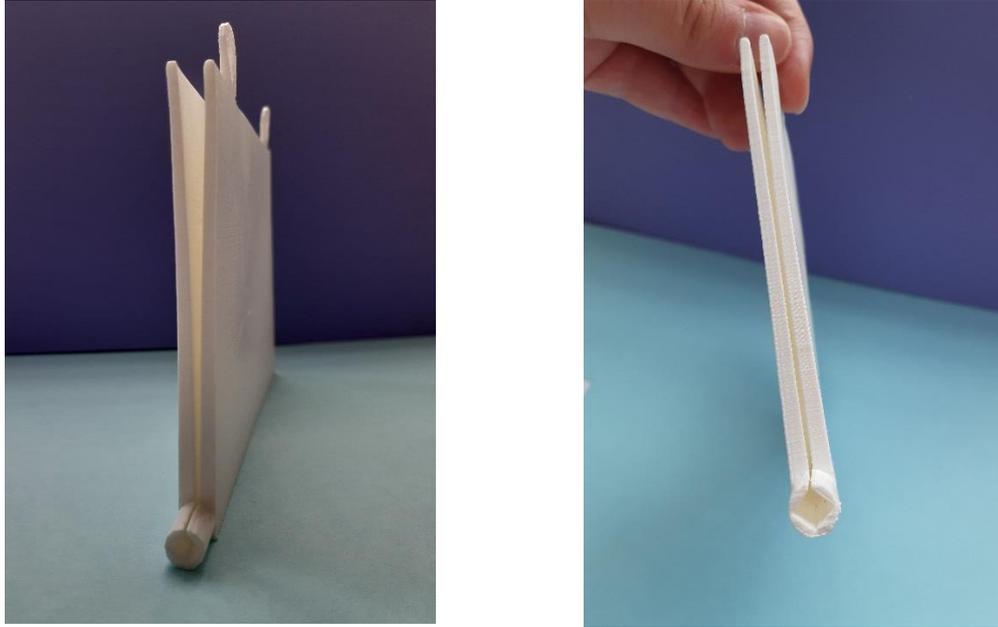


Figura 66 - Prototipo impreso en 3D.

6. CONCLUSIONES.

De los estudios de aplicación de equipos de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido en interiores y desde superficie húmeda textil en exteriores llevados a cabo en este trabajo de fin de grado podemos extraer las siguientes conclusiones:

El primer y más importante resultado que puede extraerse, después de los distintos ensayos durante los tres días de uso del equipo de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido, es la necesidad de procurar un flujo constante de aire fresco o de renovación (mediante la apertura de huecos) en la estancia donde se esté usando el equipo para mantener la humedad relativa dentro de unos límites en los que no se puedan generar efectos adversos en la salud o la posibilidad de deterioro de superficies por aparición de humedades, además de resultar en una mejora de la calidad del aire interior (aunque es necesario tener precaución en entornos donde la calidad del aire exterior no alcance unas condiciones tolerables).

Se ha observado que la ventilación cruzada favorece la renovación de aire durante los periodos de ventilación natural incluso en condiciones de mínimo movimiento del aire exterior. También, la posibilidad de contar o no con ventilación cruzada se mostraba interesante para saber si, teniendo una zona acondicionada de la casa con un equipo de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido, era posible que las zonas no acondicionadas se viesen afectadas; de los resultados obtenidos en términos de temperatura, en ninguno de los casos se observan cambios relevantes. A nivel de humedad relativa, sí que se observa que el equipo afecta a las zonas no acondicionadas de ambos casos, pudiendo ajustar las humedades relativas en las zonas no acondicionadas hacia rangos más aceptables. Por todo lo anterior, se concluye que la ventilación cruzada no es relevante durante el funcionamiento de los equipos.

Tampoco tiene relevancia el utilizar el equipo en periodos cortos de tiempo, ya que este uso no arroja resultados especialmente diferentes en cuanto a los saltos de temperatura (ni de humedad relativa) de forma global en comparación con los dos días anteriores. Cuando cesa la acción del equipo el aire vuelve a recuperar unas condiciones similares desde las que partía. Se puede concluir, por lo tanto, que los ocupantes pueden libremente poner en funcionamiento el equipo, indistintamente en un periodo largo o varios periodos cortos, ya que no supone un mayor efecto ninguna de las opciones.

El equipo de enfriamiento evaporativo directo de relleno rígido con el que se ha trabajado está sobredimensionado para las estancias de estudio y, puesto que hemos concluido que la ventilación cruzada durante el funcionamiento del equipo no tiene especial relevancia, podemos extraer dos resultados:

6. Conclusiones

1. Se comprueba que el equipo, a pesar de poder cubrir una superficie mayor a la de las estancias, a nivel térmico solo actúa de manera local, es decir, en el espacio que se encuentra, pero a nivel de humedad relativa sí que es capaz de favorecer unos valores más aceptables. Por lo tanto, el equipo acondiciona el ambiente en la zona climatizada y puede mejorar el de las zonas no acondicionadas.
2. Durante el funcionamiento del equipo, a pesar de que sí que se alcanzan las mejores categorías de confort térmico, debido a las corrientes generadas nos encontramos en todos los ensayos en una situación de malestar térmico local.

Y por último encontramos dos limitaciones en el uso de este tipo de equipos:

- Trabajan, principalmente, sobre el aire de la estancia, y no sobre los elementos presentes en el entorno (paredes, suelo, mobiliario, etc.) y por lo tanto no afectan a la inercia térmica de la estancia; es decir, alteran de manera relevante la temperatura seca del aire, pero no tienen influencia sobre la temperatura radiante, por lo que cuando cesa la acción del equipo el aire vuelve a recuperar unas condiciones similares desde las que partía.
- Solo podemos llegar a enfriar el aire de la estancia acondicionada hasta la temperatura de saturación adiabática si el equipo tuviera una eficiencia del 100%. Esta temperatura depende de las condiciones de la entrada de aire al equipo. Si ese aire ya tiene una humedad relativa alta no seremos capaces de evaporar gran cantidad de agua en la corriente de aire y por lo tanto la disminución de temperatura será limitada.

Los sistemas de enfriamiento evaporativo desde superficie húmeda textil para exteriores han demostrado resultados satisfactorios a la hora de modificar las condiciones ambientales del entorno, sobre todo en lo que respecta a la temperatura radiante en la que otros equipos no pueden influir y en una mínima introducción de humedad relativa en el ambiente. Pero las estrategias utilizadas en la distribución de agua hacia el medio textil no han resultado prácticas, lo cual ha propiciado el diseño de un dispositivo de distribución de agua alternativo sobre el cual existe una solicitud de patente.

7. PROPUESTAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

En este apartado se proponen diferentes actuaciones que derivan de los resultados arrojados por el presente estudio, y que constituyen la línea recomendada de trabajo futuro:

- Realizar un estudio dedicado al correcto dimensionado de los equipos en función del espacio a acondicionar, para a continuación reproducir los ensayos que se han realizado en este trabajo con equipos específicamente seleccionados para tales aplicaciones.
- Completar el dispositivo experimental de los ensayos incluyendo una sonda de entrada de aire colocada directamente en la parte posterior del equipo, para alcanzar un conocimiento más detallado del comportamiento del aire tratado.
- Realizar un estudio del confort térmico usando este tipo de equipos de enfriamiento evaporativo mediante el método adaptativo, ya que este método es más adecuado para los espacios sin refrigeración mecánica.
- Producir más unidades del distribuidor modular diseñado para construir un dispositivo a escala real y reproducir los ensayos de acondicionamiento de terrazas mediante el distribuidor modular diseñado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] International Energy Agency, “Consumo mundial de energía por sector.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser/?country=WORLD&fuel=Energyconsumption&indicator=TFCSHareBySector>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [2] O. Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, TU Wien, TEP Energy, IREES *et al.*, “Mapping and analyses of the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel deployment - Executive summary,” 2016.
- [3] Eurostat, “Energy consumption and use by households,” 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200626-1>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [4] Eurostat, “Heating and cooling degree days - statistics,” 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Heating_and_cooling_degree_days_-_statistics&stable=0#Heating_and_cooling_degree_days_at_EU-27_level. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [5] Eurostat, “Disaggregated final energy consumption in households - quantities.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/nrg_d_hhq. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [6] European Commission, “Energy performance of buildings directive.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [7] Eurostat, “Energy prices in 2019. Household energy prices in the EU increased compared with 2018,” no. May, pp. 1–6, 2019.
- [8] J. R. Watt, *Evaporative air conditioning handbook*, Second edi. 1963.
- [9] “Impluvium en la Casa del Fauno, Pompeya, Italia,” 2005. [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Impluvium>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [10] M. de Sanidad, “Guía técnica para la Prevención y Control de la Legionelosis en instalaciones.” pp. 1–23, 2003.
- [11] “Palacio del Generalife, Granada.” [Online]. Available: <https://www.alhambraGranada.org/es/info/galeriadefotosalhambra/galeriafotosgeneralife.asp>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [12] A. Tejero-González, “Reducción del consumo energético y emisiones de anhídrido carbónico en edificios combinando enfriamiento evaporativo, enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire.,” Universidad de Valladolid, 2012.
- [13] P. Puckorius, P. Thomas, and R. Augspurger, “Why Evaporative Coolers have

Referencias bibliográficas

- not caused Legionnaire's Disease," *ASHRAE J.*, 1995.
- [14] J. Alarcia *et al.*, "Guía de suelo radiante." 2017.
- [15] A. Tejero González, P. M. Esquivias Fernández, F. J. Rey Martínez, J. F. San José Alonso, J. M. Rey Hernández, and E. Velasco Gómez, *Tecnologías de enfriamiento evaporativo: hacia una climatización descarbonizada y eficiente.* 2021.
- [16] V. García González, "Estudio teórico del enfriamiento adiabático y caracterización experimental de un sistema de enfriamiento evaporativo con relleno rígido," 2010.
- [17] "Sistemas de micropulverización de agua." [Online]. Available: <https://termigo.com/fog/>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [18] "Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis." 2003.
- [19] European Commission, "Indoor air pollution: new EU research reveals higher risks than previously thought," *Eur. Com.*, no. September, p. IP/03/1278, 2003.
- [20] AENOR, "UNE 171330-1:2008 'Calidad ambiental en interiores. Parte 1: Diagnóstico de calidad ambiental interior.'" 2008.
- [21] AENOR, "UNE-EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005)." 2006.
- [22] Ministerio de la Presidencia, "Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios." 2007.
- [23] "Biocool modelo Eolus mini." [Online]. Available: <http://climatizacion365.com/evaporativos-portatiles/23-eolus-mini.html>. [Accessed: 06-Jul-2021].
- [24] A. V. Arundel, E. M. Sterling, J. H. Biggin, and T. D. Sterling, "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments," *Environ. Health Perspect.*, vol. VOL. 65, no. 3, pp. 351–361, 1986.
- [25] P. Wolkoff, "Indoor air humidity, air quality, and health – An overview," *Int. J. Hyg. Environ. Health*, vol. 221, no. 3, pp. 376–390, 2018.
- [26] E. Andrés González, "Estudio experimental de la mejora del confort térmico en terrazas," 2017.

ANEXO A: CALIBRACIONES DE LAS SONDAS *TESTO* *175H1.*

Caso A.

Tabla 38 - Calibraciones de las sondas utilizadas en el caso A.

Posición sonda	Recta de ajuste	Humedad	Temperatura
Entrada de aire (P2)	Pendiente	1.109071459	0.968559616
	Ordenada	-6.797849086	0.920548787
	R ²	0.999958618	0.999021437
Zona ocupada (O4)	Pendiente	1.054113603	0.962097777
	Ordenada	-3.227415067	0.91663708
	R ²	0.999962305	0.999360331
Zona no ocupada (S8)	Pendiente	1.11871709	1.005256022
	Ordenada	6.599129759	-0.082730289
	R ²	0.999917653	0.999562833
Zona no acondicionada (O5)	Pendiente	1.053348416	0.929244298
	Ordenada	-7.418113122	1.774950915
	R ²	0.999996063	0.999022922

Caso B.

Tabla 39 - Calibraciones de las sondas utilizadas en el caso B.

Posición sonda	Recta de ajuste	Humedad	Temperatura
Entrada de aire (P1)	Pendiente	1.048742182	0.99644785
	Ordenada	5.894813505	0.26163067
	R ²	0.999927716	0.99754806
Zona ocupada (O1)	Pendiente	1.0790767	1.04225884
	Ordenada	4.31471761	0.91050278
	R ²	0.99999581	0.99376189
Zona no ocupada (O2)	Pendiente	1.098681715	1.033620926
	Ordenada	-5.091469369	-1.040053972
	R ²	0.999957731	0.993858044
Zona no acondicionada (O3)	Pendiente	1.103947169	1.01202694
	Ordenada	-4.422604763	-0.33984167
	R ²	0.999998436	0.99482492

ANEXO B: TEMPERATURAS DE SATURACIÓN ADIABÁTICA.

Como se ha explicado en varios apartados de este trabajo, una de las limitaciones de funcionamiento de los equipos de enfriamiento evaporativo es la temperatura de saturación adiabática, que depende de las condiciones de entrada al equipo.

En las figuras y tablas que se presentan a continuación (organizadas por días de ensayos) se encuentran representadas las temperaturas de saturación adiabática dependientes de las condiciones del exterior proporcionadas por el edificio LUCIA y las dependientes de las condiciones registradas por las sondas colocadas en las entradas de aire de los ensayos. Los datos para estas gráficas han sido generados gracias a una herramienta de una hoja de cálculo que ha sido desarrollada por el Laboratorio de Calor y Frío de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid.

Estas representaciones justifican las condiciones de confort térmico que se han podido alcanzar durante los ensayos. Recordemos que, si el equipo de enfriamiento evaporativo tuviera un 100% de eficiencia, la mínima temperatura a la que se conseguiría enfriar el aire es la temperatura de saturación adiabática.

Día 1.

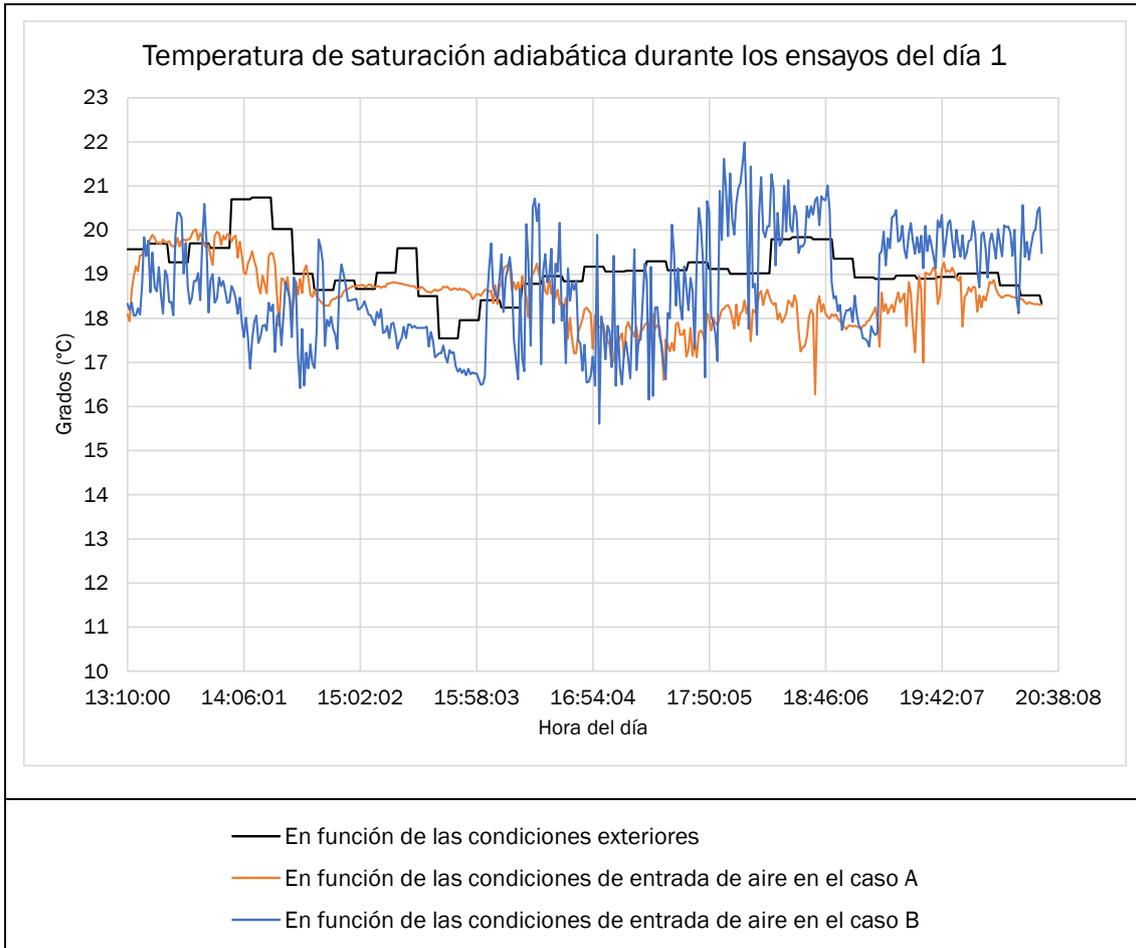


Figura 67 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 1 según diferentes condiciones de entrada.

Tabla 40 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 1 según diferentes condiciones de entrada.

Parámetro	Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 1 (°C).		
	Según condiciones exteriores	Según entrada aire en el caso A	Según entrada aire en el caso B
Promedio	19,1	18,5	18,7
Mínimo	17,5	16,3	15,6
Máximo	20,7	20	21,9

Tabla 41 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 1.

Mínima temperatura obtenida en la zona ocupada durante los ensayos (°C)	Caso A	Caso B
	22,9	24,5

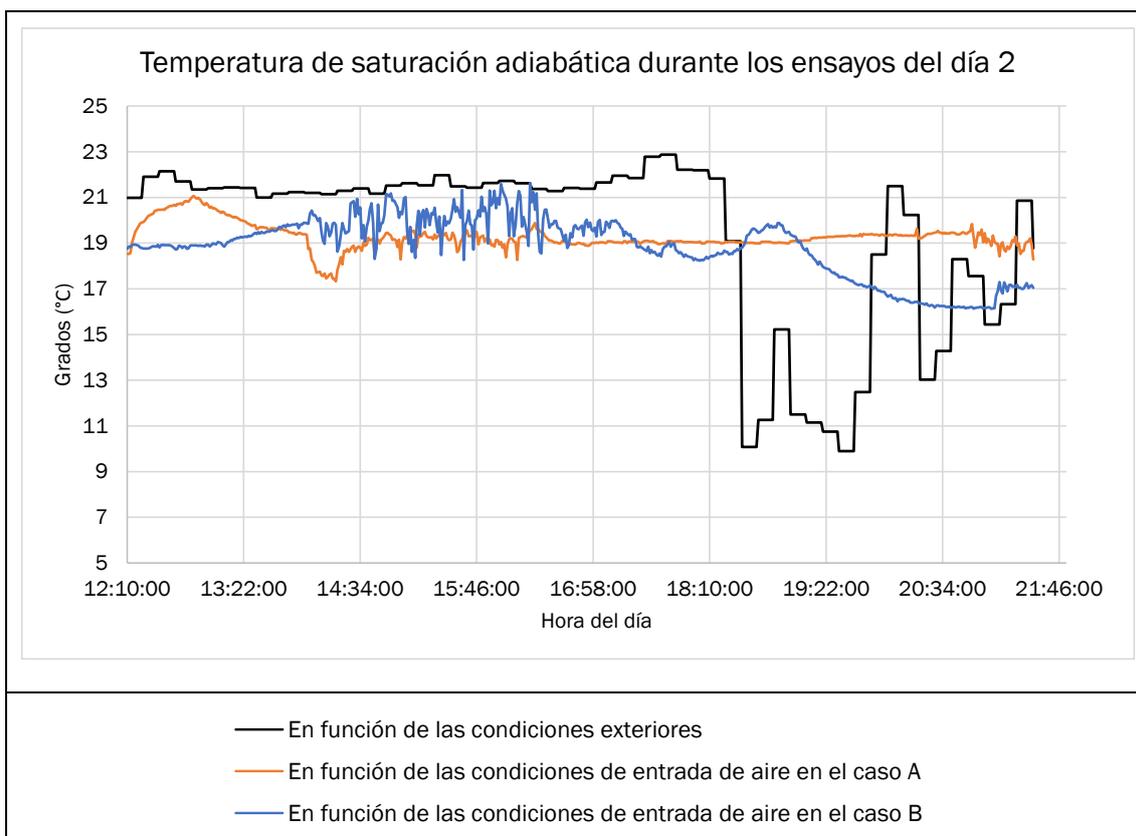
Día 2.

Figura 68 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 2 según diferentes condiciones de entrada.

Tabla 42 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 2 según diferentes condiciones de entrada.

Parámetro	Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 2 (°C).		
	Según condiciones exteriores	Según entrada aire en el caso A	Según entrada aire en el caso B
Promedio	19,4	19,3	18,8
Mínimo	9,9	17,3	16,1
Máximo	22,	21,1	21,6

Tabla 43 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 2

Mínima temperatura obtenida en la zona ocupada durante los ensayos (°C)	Caso A	Caso B
	23,2	25

Día 3.

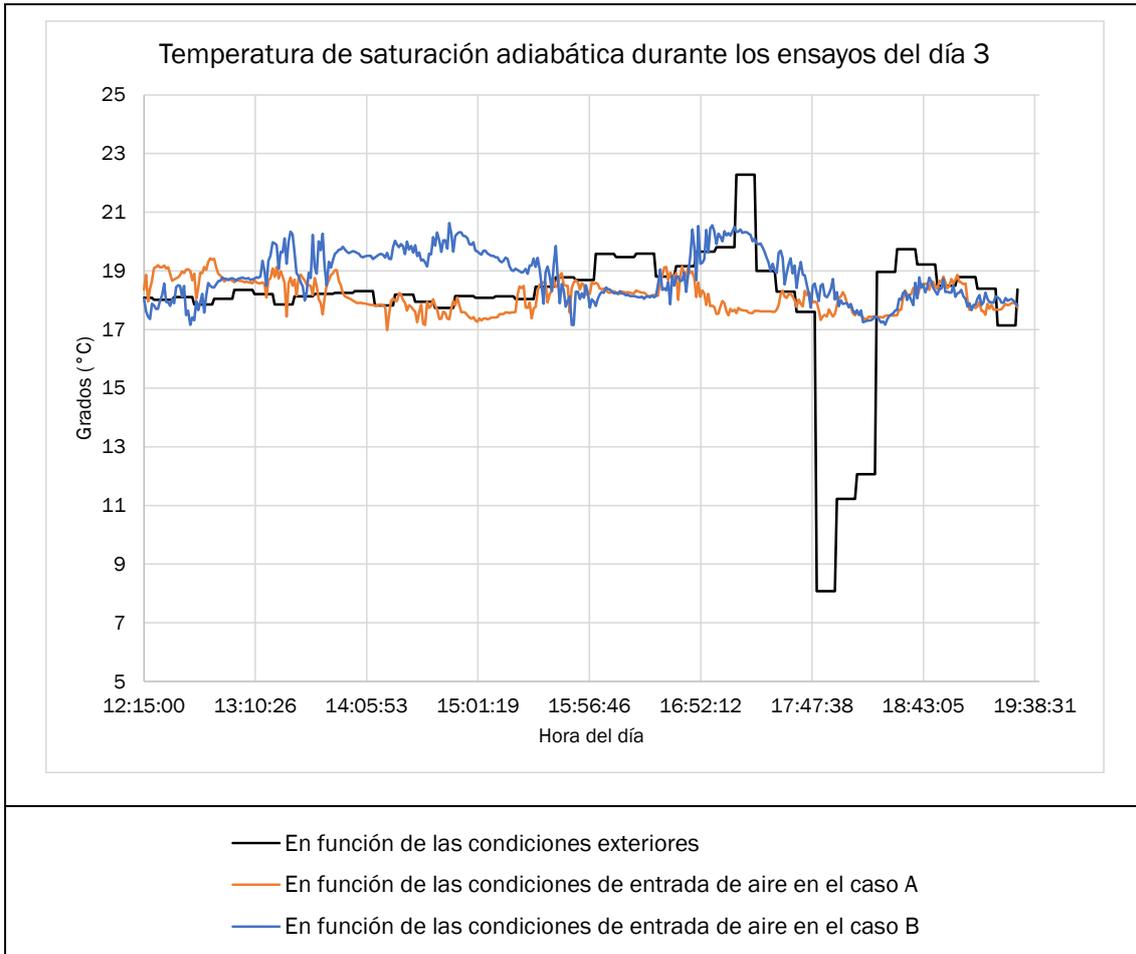


Figura 69 - Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 3 según diferentes condiciones de entrada.

Tabla 44 - Valores promedio, mínimo y máximo de las temperaturas de saturación adiabática durante los ensayos del día 3 según diferentes condiciones de entrada.

Parámetro	Temperatura de saturación adiabática durante los ensayos del día 3 (°C).		
	Según condiciones exteriores	Según entrada aire en el caso A	Según entrada aire en el caso B
Promedio	18,0	18,1	18,8
Mínimo	8,1	16,9	17,2
Máximo	22,3	19,4	20,6

Tabla 45 - Mínimas temperaturas alcanzadas durante los ensayos del día 3.

Mínima temperatura obtenida en la zona ocupada durante los ensayos (°C)	Caso A	Caso B
	22,6	24,4

