



**UNIVERSIDAD DE SEVILLA**  
**POLITECNICO DE BARI**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTIÓN INTEGRAL DE LA EDIFICACIÓN**

---

**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN**  
**CONSTRUCCIÓN BIOCLIMÁTICA Y BIOCONSTRUCCIÓN**

**“SISTEMAS DE ENVOLVENTES ADAPTABLES CON**  
**PERMEABILIDAD VARIABLE AL AIRE CONTROLADO POR**  
**NIVELES DE HUMEDAD RELATIVA. ANALISIS DE**  
**RENDIMIENTO ENERGETICO”**

**“Adaptive envelope system with variable air permeability controlled by relative**  
**humidity levels. Performance energy analysis”**

**Tutores:**

**Prof. Jacinto Enrique CANIVELL GARCÍA DE PAREDES**

**Prof. Carlos RUBIO BELLIDO**

**Cotutor:**

**Prof. Ing. Francesco FIORITO**

**Doña:**

**Mariaclara DELVECCHIO**

---

**Año Académico 2020-2021**

# Índice

Abstract.....	3
1. Introducción .....	5
2. Estado de la cuestión.....	7
2.1 El cambio climático y la construcción .....	7
2.2 La calidad del ambiente interior.....	11
2.2.1 El confort termo higrométrico .....	12
2.2.2 La calidad del aire interior.....	15
2.2.3 Impactos de evaluación de confort en interiores .....	16
2.3 Estrategias para la reducción de la humedad relativa .....	18
2.3.1 Humedad relativa y permeabilidad al vapor.....	18
2.3.2 Sistemas pasivos .....	21
2.3.2.1 Características de los materiales higroscópicos.....	22
2.3.2.2 Materiales higroscópicos sostenibles.....	26
2.3.2.3 Diseño de envolventes adaptables .....	31
2.3.3 Sistemas activos: secado por sistemas tecnológicos .....	41
2.3.3.1 Calefacción y ventilación.....	41
2.3.3.2 Deshumidificación por condensación.....	42
2.3.3.3 Deshumidificación por absorción .....	43
3.Objetivos.....	45
4. Metodología.....	46
4.1 Estudio bibliográfico del caso .....	46
4.2 Estudio de las características del panel .....	47
4.3 Preparación del modelo caso de estudio .....	47
4.4 Simulaciones .....	48
4.5 Análisis de los resultados .....	48
5. Herramientas .....	50
6. Descripción del prototipo del panel.....	52
6.1 Metal Organic Frameworks (MOF) .....	55

6.2 Las nanofibras y el electrohilado .....	56
6.3 Puntos fuertes de las membranas nanofibrosas MOF .....	59
6.4 Capa desecante PAN MIL @ LiCl NFM .....	62
6.4.1 Absorción de la humedad del panel.....	66
6.5 Capa fotométrica PAN / CB NFM .....	70
6.6 Doble capa biomimética PML-PC NFM.....	71
6.6.1 Posible aplicación de la doble capa biomimética PML-PC NFM.....	73
6.6.2 Ventajas de la doble capa biomimética PML-PC NFM .....	75
7. Caso de estudio .....	76
7.1 Descripción de la construcción del modelo de aplicación .....	76
7.2 Análisis previos .....	85
8.Resultados .....	90
8.1 Resultados en condiciones climáticas extremas.....	91
8.2 Resultados de las condiciones mensuales .....	104
9. Conclusiones .....	107
10. Desarrollos futuros.....	109
Referencias.....	110
Anexo.....	116
A. Enero .....	116
B. Febrero.....	122
C. Marzo.....	128
D. Abril .....	134
E. Mayo .....	140
F. Junio.....	147
G. Julio .....	153
H. Agosto .....	159
I. Septiembre .....	165
L. Octubre .....	171
M. Noviembre .....	177
N. Diciembre .....	183

# Abstract

El presente estudio se centra en el control de uno de los parámetros que regula los componentes de la calidad ambiental de los ambientes interiores (Indoor Environmental Quality - IEQ): la humedad relativa. Para mantener un nivel de humedad relativa entre el 40% y el 60% es necesario adoptar estrategias de diseño de los edificios para que tengan una adecuada deshumidificación de los ambientes, que se puede alcanzar mediante diferentes estrategias.

En particular el sistema estudiado en el presente trabajo es un panel compuesto de una doble capa biomimética llamado (PML-PC) NFM definido como una membrana nanofibrosa NFM MOF súper higroscópica a energía solar para la deshumidificación interna. Inspirándose en la estructura jerárquica de la madera, se ha desarrollado esta doble capa NFM MOF biomimética similar a la madera para la absorción de la humedad y la evaporación del vapor de agua. En particular, la primera capa desecante es responsable de la absorción de la humedad del aire interior y las moléculas de agua absorbidas son expulsas por el calor generado por conversión térmica solar de la segunda capa fotométrica, bajo radiación solar. El panel biomimético es capaz de realizar una deshumidificación continua de los ambientes internos bajo irradiación solar. Resumidamente, la fabricación comienza la fabricación de la primera capa desecante tramite la tecnología del electrohilado del panel (PAN/MIL) NFM que más tarde se impregna de la solución LiCl para obtener (PAN/Mil@licl) NFM. Posteriormente, se pasa a la segunda capa fotométrica donde las nanofibras del panel (PAN/CB) se electrifican en el sustrato nanofibroso (PAN/Mil@licl) NFM para constituir así la doble capa biomimética (PML-PC) NFM.

El uso del panel en el interior de un edificio ha sido simulado con ayuda del software WUFI PLUS. A través de la inserción de las características del panel dentro del programa se realizaron las simulaciones sin el uso del panel y sucesivamente después del tratamiento de los datos obtenidos, se realizaron las simulaciones con la activación del panel. El período del año considerado es el año 2020 se realizaron

primero las simulaciones en el día más frío y más caliente del año y posteriormente se identificó un día representativo para cada mes del año para obtener así una evaluación del comportamiento del panel durante todo el año. Comparando los datos obtenidos antes y después de la activación del panel en los días del año seleccionados se ve cómo el uso de este panel para la deshumidificación de los ambientes internos, sin el uso de energía, traiga los niveles de humedad interior relativa dentro de los límites de comodidad, también mediante el aumento de la comodidad en determinadas épocas del año.

# 1. Introducción

Tema central a nivel mundial en los últimos años es el energético: el 40% de la energía se utiliza en el sector de la construcción y provoca una cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> del 36%. Este tema está estrechamente relacionado con el bienestar habitativo, es decir a la calidad medioambiental de los interiores (Indoor Environmental Quality - IEQ). El IEQ depende, de hecho, de cuatro componentes básicos que son: el confort termohigrométrico, la calidad del aire, la calidad acústica y la calidad e intensidad luminosa. Uno de los parámetros que regula estos componentes es la humedad relativa, que representa un papel fundamental para el bienestar termohigrométrico de los ocupantes de un entorno. Son muchas las tecnologías innovadoras de bajo o nulo consumo energético que permiten de restablecer la humedad relativa entre el 40 y el 60% como recomienda la sociedad americana de los ingenieros de la calefacción, de la refrigeración y del aire acondicionado (ASHRAE).

En este trabajo de tesis se analizaron estrategias pasivas para el control de la humedad interna, en particular mediante sistemas de envolventes adaptables capaces de absorber la humedad del interior y transportarla hacia el exterior para ajustar el nivel interno y devolverla a los niveles de confort. En efecto, la problemática principal de las envolventes existentes en las construcciones de los años 70, que representan la mayor parte del patrimonio inmobiliario italiano, es la imposibilidad de eliminar el exceso de humedad debido a los bajos niveles de transpirabilidad de los materiales que los componen. Esto genera claramente, un aumento de la humedad relativa del ambiente interno que favorece el crecimiento de mohos y otros hongos. Además, la exposición prolongada a hongos tóxicos puede provocar enfermedades infecciosas o un aumento de los síntomas alérgicos.

El objeto del estudio consiste de hecho en una membrana nanofibrosa que por su elevada higroscopicidad y reciclabilidad es capaz de absorber una elevada cantidad de humedad de los ambientes internos y expulsar esta cantidad acumulada por evaporación bajo la iluminación permitiendo la reducción de la humedad relativa

de los ambientes interiores. Este panel llamado PML-PC es una doble capa biomimética compuesta por una capa secante y una capa fotométrica. La capa de secado muestra una elevada capacidad de absorción de la humedad y velocidad de transporte, permitiendo la recogida del agua atmosférica. La capa fototérmica muestra una elevada absorción solar del 93%, una eficiente conversión solar térmica y una buena permeabilidad a la humedad, favoreciendo así la evaporación del agua.

Para estudiar su eficacia, se han efectuado análisis en un modelo de referencia, intentando reproducir el comportamiento del panel analizado primero en condiciones climáticas extremas y luego a lo largo de todo el año. Se seleccionó el software WUFI PLUS de la empresa alemana Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics) para obtener evaluaciones fiables y lo más precisas posible. WUFI PLUS permite simular el comportamiento dinámico higrotérmico de todo el edificio y luego evaluar su confort, la calidad del aire interior, los daños a los componentes en función de las cargas de refrigeración y calefacción, la necesidad de humectar o deshumidificar y el consumo de energía.

## 2. Estado de la cuestión

### 2.1 El cambio climático y la construcción

El cambio climático y el calentamiento global han adquirido especial importancia en los últimos años y están afectando cada vez más rápidamente a nuestro planeta. Estos fenómenos tienen por objeto un constante aumento de la temperatura media en la Tierra (creando así el fenómeno de las "islas de calor urbano"). Esto se debe principalmente a la excesiva concentración de CO<sub>2</sub> y de otros gases presentes en la atmósfera debido en gran parte a las emisiones de combustibles fósiles (alrededor del 75%) y a la deforestación que contribuye al aumento del dióxido de carbono.<sup>[1]</sup>

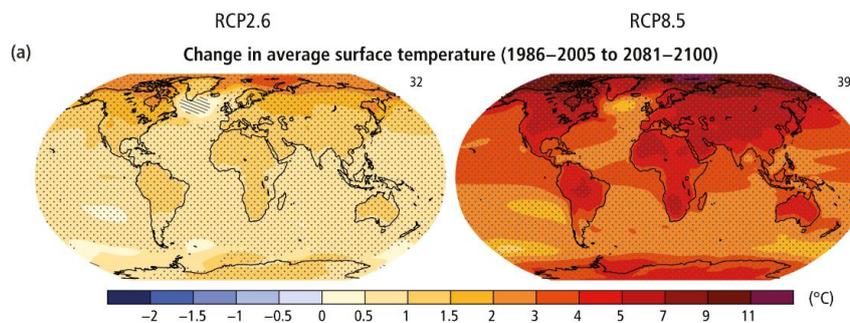


Figura 1 Aumento de la temperatura global.<sup>[2]</sup>

Este aumento de las temperaturas desencadena una serie de procesos naturales que están llevando al sistema Tierra al colapso. Entre ellos se incluyen el derretimiento de los glaciares y del casquete polar, el aumento del nivel de los mares, la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, el riesgo hidrogeológico y las inundaciones, la sequía y el consiguiente riesgo de incendios, los daños a la biosfera y la consiguiente variación en la distribución de los hábitats animales, la extinción de especies y, por último, la variación de la productividad agrícola y de la calidad nutricional que podría conducir a un aumento de las enfermedades y muertes de la población.<sup>[3]</sup>

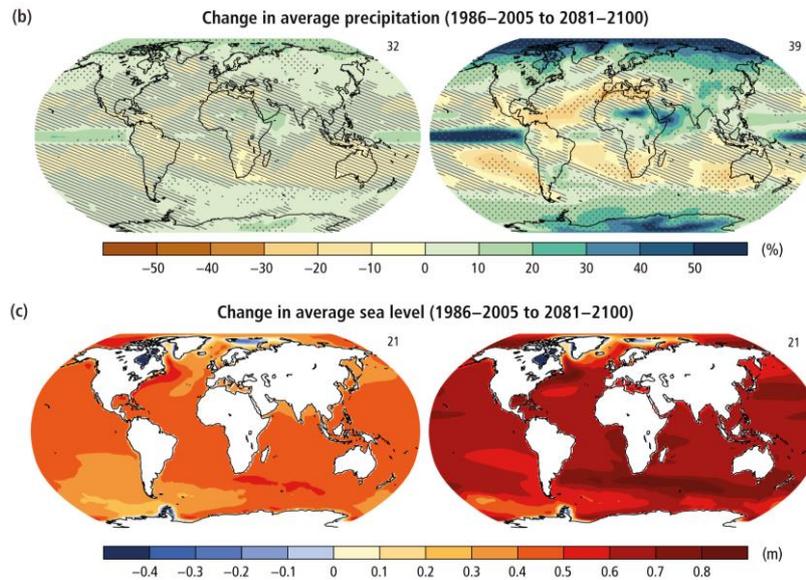


Figura 2 Aumento de las precipitaciones y del nivel del mar. [2]

La creciente amenaza de estos eventos ha aumentado la conciencia de la relación directa entre el crecimiento económico de los países, el consumo de energía y los correspondientes contaminantes ambientales. Ha habido, de hecho, considerables aumentos en el uso de la energía en los países en desarrollo, y se espera que esta tendencia continúe en un futuro próximo. [4]

El sector de la construcción es un sector que representa una parte importante del uso de la energía en comparación con el consumo total de energía global, a pesar del aumento de la producción industrial y del transporte en muchos países en desarrollo. [5] En efecto, los edificios representan aproximadamente el 40 % del consumo global de energía y representan más del 30 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [4]

Gran parte de esta energía se utiliza para el confort térmico en los edificios. En particular, en un edificio construido con tecnologías tradicionales, la actividad doméstica que requiere una mayor cantidad de energía es la necesaria para calentar los ambientes (como se muestra en la figura 3). [5]

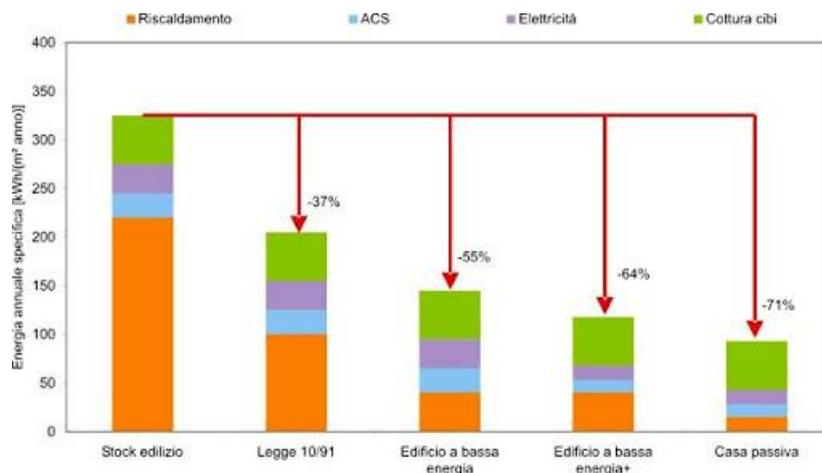


Figura 3 Necesidades de un edificio residencial.[5]

Dicho esto, los edificios, además de ser corresponsables del calentamiento global, también están expuestos a las diversas consecuencias del cambio climático. Por lo tanto, es necesario garantizar el confort y la seguridad de las construcciones mediante el diseño de nuevos edificios y la adaptación de los ya existentes, de modo que sean cada vez más resistentes al cambio climático y puedan requerir una cantidad de energía cada vez menor.<sup>[4]</sup>

Los edificios actuales muestran un consumo energético muy elevado, sobre todo en el uso de las instalaciones y tecnologías necesarias para mantener la temperatura y la humedad de los ambientes dentro de valores confortables para el usuario.<sup>[5]</sup> Estos problemas podrían eludirse integrando en las tecnologías de construcción modernas materiales innovadores capaces de obtener óptimos resultados sin la utilización de instalaciones tecnológicas.<sup>[6]</sup> Entre las propiedades intrínsecas de muchos materiales, algunos garantizan un bienestar termo higrométrico óptimo:

- Inercia térmica: capacidad de un material para almacenar calor y luego liberarlo, manteniendo la temperatura interna casi constante. Los efectos más importantes de la inercia térmica son: el desplazamiento y la amortiguación. El desfase consiste en la liberación del calor desde el exterior hacia el interior de una superficie con un gran deslizamiento temporal, mientras el amortiguamiento es la reducción de la intensidad de la energía que atraviesa la estructura.

- Aislamiento térmico: capacidad de contener las pérdidas de calor por conducción.
- Transpirabilidad: capacidad de eliminar la humedad natural del aire en el interior de la vivienda. Estos materiales, gracias a su porosidad, permiten la higrorregulación del exceso de humedad en los ambientes, venciendo de manera definitiva mohos y problemas de condensación típicos de los tradicionales sistemas de capa.<sup>[7]</sup>

La utilización de estos materiales permite obtener tanto en verano como en invierno condiciones óptimas de temperatura y humedad en el interior de una vivienda, garantizando un alto nivel de calidad y contribuyendo a una reducción significativa de los costes de calefacción o refrigeración de los locales.<sup>[6]</sup>

Uno de los desafíos más críticos que se deben afrontar en los espacios interiores es la regulación de los crecientes niveles de humedad relativa. El exceso de humedad, a falta de medidas de control adecuadas, como la ventilación y la absorción, favorece el crecimiento de mohos y otros hongos.<sup>[8]</sup> Además, la exposición prolongada a hongos tóxicos puede provocar enfermedades infecciosas o un aumento de los síntomas alérgicos. Por lo tanto, para obtener un ambiente confortable en los espacios interiores de un edificio, es necesario mantener un nivel de humedad relativa interior (RH) que se ajuste a las necesidades de los usuarios. En las normas internacionales y según lo recomendado por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), este valor suele estar entre el 40 y el 60%.<sup>[9][10]</sup> En los capítulos siguientes se detallarán los parámetros que influyen en la calidad del aire hasta llegar a la problemática de la deshumidificación y su eliminación mediante tecnologías innovadoras.

## 2.2 La calidad del ambiente interior

El tema del ahorro energético está estrechamente relacionado con el bienestar de la vivienda, es decir, la calidad medioambiental de los interiores (Indoor Environmental Quality - IEQ).<sup>[11]</sup> Los requisitos esenciales para el bienestar de los ocupantes y la reducción del consumo de energía son: el microclima interno, el control de la humedad, la concentración de contaminantes en el aire o depositados en las superficies, la calidad y la intensidad luminosa y acústica.<sup>[6]</sup> La calidad global de los interiores es el producto de un correcto diseño, la selección de los materiales y el funcionamiento de las instalaciones, incluido su control y mantenimiento.<sup>[7]</sup> Por lo tanto, la gestión de la calidad del interior (IEQ) requiere una estrategia integrada de verificación y optimización de los diferentes componentes del entorno, desde la fase de diseño hasta la realización, el uso y el mantenimiento del edificio.<sup>[4]</sup>

Utilizando parámetros físico-ambientales como la temperatura, la humedad relativa, la ventilación, la acústica, la calidad del aire y la iluminación podemos definir la sensación de confort como la respuesta de los sentidos humanos a un conjunto de factores: medio ambiente, entorno físico, servicios y condiciones fisiológicas individuales como la salud, las relaciones sociales, la situación financiera.<sup>[6]</sup>

El concepto de confort y calidad global de los entornos ha cambiado considerablemente a lo largo de los años.<sup>[4]</sup> Las limitaciones regulatorias de algunos parámetros como la temperatura y la humedad han cambiado con el paso del tiempo, llegando a valores cada vez más reducidos. Mientras que antes muchos parámetros eran evaluados por separado sin considerar el confort en su globalidad, ahora esta mentalidad ha evolucionado, hasta el punto de llegar a evaluar la calidad interior en su globalidad, midiendo los diferentes parámetros que entran en juego.

Se puede concluir que la calidad de los entornos interiores a nivel global es la suma de la percepción y la medición de numerosos parámetros que pueden resumirse en cuatro componentes básicos:

1. El confort termo higrométrico

2. La calidad del aire
3. La calidad acústica
4. Calidad e intensidad luminosa.<sup>[6]</sup>

A efectos de este estudio, solo se analizaron detalladamente los dos primeros componentes.

### 2.2.1 El confort termo higrométrico

El confort o bienestar termo higrométrico del individuo puede definirse como *"el estado mental de satisfacción con respecto al ambiente térmico"*<sup>1</sup>; coincide con el estado en el que el sujeto no siente calor ni frío. Esta sensación de bienestar puede cambiar de un individuo a otro y depende de numerosos factores como la edad, el sexo, el metabolismo, los hábitos, etc.<sup>[12]</sup>

El cuerpo humano tiene normalmente una temperatura interna de aproximadamente 37 °C y para mantener la temperatura alrededor de este valor el cuerpo humano, como cualquier sistema termodinámico, intercambia calor y trabajo con el ambiente exterior.<sup>[13]</sup>

Podemos describir el balance térmico entre el cuerpo humano y el entorno externo mediante la siguiente ecuación:

$$S = M - W - E - E_{res} - C_{res} - C - R - K$$

donde:

S es la variación de la energía interna en la unidad de tiempo del cuerpo humano (potencia adquirida o cedida);

M es la potencia desarrollada por la actividad metabólica;

---

<sup>1</sup> UNI EN ISO 7730:2006 "Ergonomía de los ambientes térmicos - Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y de los criterios de bienestar térmico local"

W es la potencia mecánica intercambiada entre el cuerpo humano y el entorno para el desarrollo de la actividad laboral;

E es la potencia térmica perdida en la transpiración a través de la piel;

E<sub>res</sub> es potencia térmica cedida al medio ambiente en la respiración como calor latente;

E<sub>res</sub> es la potencia térmica cedida al medio ambiente en la respiración como calor sensible;

C es la potencia calorífica intercambiada por convección;

R es la potencia calorífica intercambiada por irradiancia;

K es la potencia calorífica intercambiada por conducción.

Para obtener un balance en este sistema cerrado, el parámetro S debe ser nulo Si S no es nulo, entonces el cuerpo se está calentando o enfriando.<sup>[14]</sup>

Así, en condiciones estacionarias, el bienestar termo higrométrico de las personas depende de cuatro magnitudes ambientales:

- temperatura del aire;
- temperatura radiante media de las superficies que delimitan el entorno;
- humedad relativa del aire;
- velocidad del aire

y dos magnitudes subjetivas que caracterizan a los individuos:

- el metabolismo energético, que depende de la actividad
- resistencia térmica de la ropa.<sup>[6][14]</sup>

En particular:

- La temperatura del aire es el valor suministrado por un sensor de temperatura, que debe estar en equilibrio con el aire y no estar expuesto a la radiación procedente de cuerpos a temperatura distinta de la del aire, por lo que debe protegerse adecuadamente.

- La humedad relativa o el grado higrométrico se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en una masa de agua y la cantidad máxima de vapor de agua que la misma masa de aire puede contener, en las mismas condiciones de temperatura y presión. La humedad relativa se expresa en %, haciendo que el nivel de saturación del aire sea del 100 %.
- La velocidad del aire define la velocidad y la dirección de los movimientos del aire en los ambientes. Este valor puede favorecer la pérdida de calor del cuerpo humano debido a la aceleración de los movimientos del aire enfriándolo rápidamente.
- La temperatura media radiante se define como la temperatura uniforme ideal de una cavidad negra en la que un sujeto intercambiaría la misma cantidad de calor por radiación que intercambia en el ambiente real en el que se encuentra. Esta temperatura se mide comúnmente con un globómetro y se expresa en °C.<sup>[14]</sup>

El control termo higrométrico de los ambientes interiores está ligado en primer lugar a un correcto diseño de las envolventes de los edificios (control termo higrométrico pasivo) y en segundo lugar a las instalaciones (control termo higrométrico activo). En la tabla siguiente se indican las condiciones de bienestar, en términos de temperatura y humedad relativa, más frecuentes en verano e invierno. Estos valores deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar correctamente las envolventes de los edificios y los sistemas de aire acondicionado.<sup>[15]</sup>

velocità dell'aria = 0.10 ÷ 0.25 m/s				
Attività fisica	Estate		Inverno	
	T [°C]	U.R. [%]	T [°C]	U.R. [%]
Trascurabile	26	50	20	50
Leggera	25	50	19	50
Pesante	24	50	18	50

Tabla 1 Condiciones de bienestar termo higrométrico en función de la actividad física del usuario [15]

## 2.2.2 La calidad del aire interior

La calidad del aire (Indoor Air Quality - IAQ) en los interiores desempeña un papel fundamental para la salud de los ocupantes. Para que la calidad del aire sea "aceptable", es necesario que en su interior no se encuentren contaminantes a una concentración superior a los límites impuestos por la ley y que al menos el 80% de las personas ocupantes no exprese malestar.<sup>[6]</sup> En efecto, cantidades demasiado elevadas de sustancias nocivas en el interior del aire pueden provocar sensaciones de malestar y ser vehículo de agentes patógenos potencialmente peligrosos para la salud humana.<sup>[8]</sup>

El hombre tiende a alterar la composición del aire aumentando la cantidad de dióxido de carbono, disminuyendo la de oxígeno, produciendo humos y olores que inevitablemente modifican la calidad del aire.<sup>[8]</sup> Además de la actividad humana, hay otras fuentes que pueden causar la contaminación del aire interior, entre ellas los materiales de construcción, los muebles, desodorantes, sistemas de calefacción, acondicionamiento o humidificación que no se manipulen adecuadamente, alfombras o moquetas húmedas que contengan moho, aire del exterior, etc.<sup>[15]</sup>

Todas estas fuentes pueden generar numerosos contaminantes internos, cuya concentración máxima admisible dentro del medio ambiente se rige por numerosos decretos y reglamentos también de carácter internacional.<sup>[6]</sup>

Pueden resumirse en tres categorías principales:

1. Contaminantes **químicos**: monóxido de carbono (CO), humo de tabaco, compuestos orgánicos volátiles (COV), amianto, humo de leña, fibras de lana sintéticas (lana de roca y lana de vidrio), plaguicidas, óxidos de azufre y nitrógeno, ozono (emitido por algunas impresoras láser y fotocopiadoras), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP);
2. Contaminantes **físicos**: radón, radiación no ionizante, ruido, humedad;
3. Contaminantes **biológicos**: bacterias, ácaros, alérgenos animales, mohos y hongos, virus, polen.<sup>[6]</sup>

Para lograr una calidad del aire aceptable, debe introducirse en el medio ambiente un caudal de aire de renovación adecuado. Por tanto, es necesario adoptar estrategias que permitan una ventilación adecuada del interior.<sup>[15]</sup>

Las normas italianas que se ocupan de determinar los niveles aceptables de calidad del aire y los correspondientes índices de ventilación en el interior de los edificios son la UNI EN 15251 y la UNI EN 13779.<sup>[16][17]</sup> En cambio, en el ámbito internacional se encuentran varias normativas, entre las cuales las normas ASHRAE 62.1 y 62.2, actualizada en 2019, reconocidas por el diseño del sistema de ventilación y la calidad del aire interior aceptable (IAQ).<sup>[9][10]</sup>

### 2.2.3 Impactos de evaluación de confort en interiores

Los índices internacionalmente reconocidos para la evaluación del confort global interior son la calificación media prevista (PMV) y el porcentaje previsto de insatisfacción (PPD).<sup>[4]</sup> El PMV evalúa el estado de bienestar de un individuo utilizando una escala de valores que varía de -3 a +3, donde cero representa la sensación de bienestar térmico, -3 una sensación de demasiado frío y +3 una sensación de mucho calor. En cambio, el PPD expresa el porcentaje de personas insatisfechas en relación con el valor de PMV cuyo módulo es igual o superior a  $\pm 2$ .<sup>[14]</sup>

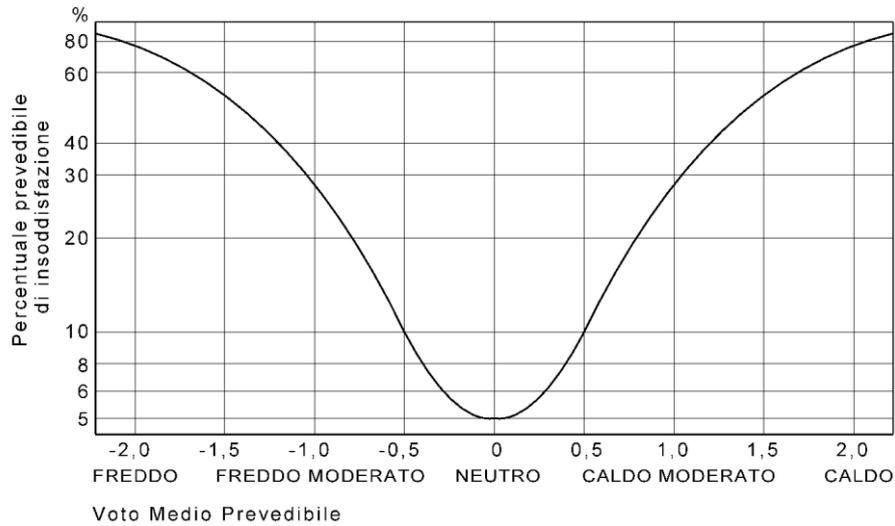


Figura 4 Relación entre PMV y PPD [14]

Al valor de  $PMV=0$  corresponde un  $PPD=5\%$  y esto demuestra que es imposible realizar una única condición ambiental capaz de satisfacer a todas las personas que allí residen.<sup>[14]</sup>

La norma UNI EN ISO 7730 recomienda que el valor de PMV en un entorno se incluya en el rango  $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$  con un  $PPD \leq 10\%$ .<sup>[12]</sup> La norma UNI 10339 prevé un rango de aceptación más amplio, es decir  $-0,8 \leq PMV \leq +0,8$  con un  $PPD \leq 20\%$ .<sup>[4][14]</sup>

## 2.3 Estrategias para la reducción de la humedad relativa

A la luz de lo expuesto en los capítulos anteriores, para garantizar el confort y la salubridad óptimas de los ambientes interiores, es necesario mantener un nivel de humedad relativa tal que la calidad del aire sea aceptable para los ocupantes.<sup>[6][8]</sup> Por lo tanto, conviene diseñar los edificios de tal manera que se garantice, cuanto más se pueda, la ventilación natural y, en caso de que no se satisfaga, aumentarla mediante sistemas mecanizados. Por ejemplo, mediante la implementación de sistemas de aire acondicionado HVAC.<sup>[4]</sup>

Con el paso de los años, la cantidad mínima de cambios mínimos de aire exterior ha aumentado. Esto nace como consecuencia de la crisis energética, hoy aún más apremiante, y de las llamadas "Síndrome del Edificio Enfermo" (Sick Building Syndrome) y "Enfermedades Relativas a los Edificios" (Building Related Illness)<sup>2</sup>.<sup>[15]</sup>

Para resolver todos estos problemas, es necesario adoptar estrategias de diseño de edificios que tengan como parámetro de diseño la calidad del aire, de tal manera que se estudien todos los mecanismos útiles para mantener un determinado nivel tanto de temperatura como de humedad relativa y aportando el adecuado recambio de aire.<sup>[6]</sup> Por lo tanto, será necesario prever una adecuada deshumidificación de los ambientes, que se puede alcanzar mediante diferentes estrategias. Antes de pasar a la descripción de estos métodos, conviene ofrecer una definición más detallada de humedad relativa y permeabilidad al vapor.<sup>[15]</sup>

### 2.3.1 Humedad relativa y permeabilidad al vapor

El aire atmosférico es una mezcla de gas y vapor de agua, cuya cantidad depende de la temperatura y la presión.

---

<sup>2</sup> Indican un cuadro sintomático definido, que se manifiesta en un número de ocupantes en edificios dotados de sistemas de ventilación mecanizada y de aire acondicionado.

La cantidad de vapor de agua contenida en el aire contribuye al bienestar de las personas. En efecto, depende principalmente de la cantidad de vapor que el aire contiene en relación con la máxima cantidad de vapor que podría contener a la misma temperatura. Lo anterior corresponde a la definición de humedad relativa, medida en porcentaje, que puede resumirse con la siguiente fórmula:

$$UR = \frac{mv}{msat} 100 = \frac{pvV}{RvT} \frac{RvT}{psatV} 100 = \frac{pv}{psat} 100$$

El aire con una humedad relativa del 100% se denomina saturado. La humedad relativa está estrechamente relacionada con la temperatura, pues la cantidad de vapor que puede contener una masa de aire disminuye a medida que disminuye la temperatura, lo que corresponde a un aumento de la humedad relativa. En el momento en que se enfría una cantidad de aire, se asistirá a la disminución de su temperatura y a un aumento de la humedad relativa, hasta alcanzar el 100%, que corresponde a la condición de aire saturado. La temperatura a la que UR=100% se define como Temperatura de Rocío, que indica el momento en que el vapor contenido en el aire comienza a condensarse. Las transformaciones del aire húmedo se representan y analizan en el diagrama psicrométrico.<sup>[14]</sup>

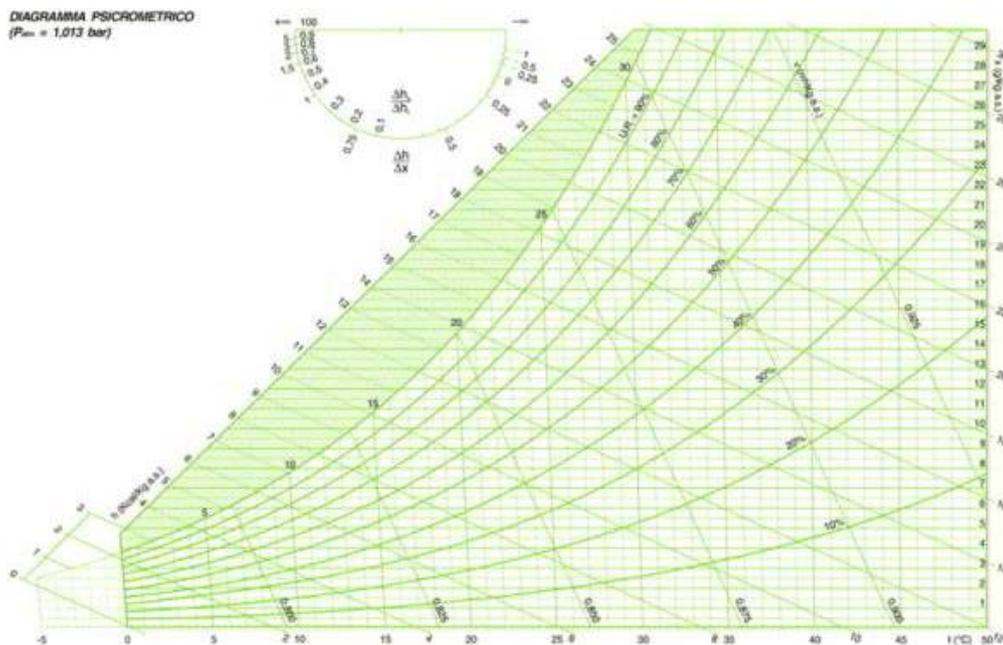


Figura 5 Diagrama psicrométrico [18]

En la práctica, este gráfico proporciona información sobre el nivel actual de humedad en relación con el nivel máximo posible. Su control es fundamental para evitar efectos negativos sobre la salud humana relacionados con la calidad del aire, así como para evitar fenómenos de condensación tanto de los componentes de construcción como de los muebles.<sup>[15]</sup>

Para llevar a cabo esta comprobación es necesario estudiar la transpirabilidad de los materiales y evaluar su permeabilidad al vapor de agua.<sup>[14]</sup> La permeabilidad mide el comportamiento de un material al pasar la humedad. Por lo tanto, este valor indica la cantidad de vapor de agua que pasa a través de los materiales por unidad de tiempo y de superficie y espesor unitario, sometido a una diferencia de presión de vapor unitaria.<sup>[14]</sup>

Las diferentes y complejas unidades de medida utilizadas en cada país han dado lugar a la determinación de un factor adimensional que es el Factor de Resistencia al vapor de agua o factor  $\mu$ , que indica la relación entre la permeabilidad del aire y la permeabilidad al aire del material.<sup>[14]</sup>

Factor de resistencia al vapor del agua ( $\mu$ ):

$$\mu = \frac{\delta_{\text{aire}}}{\delta_{\text{producto}}}$$

donde:

$\delta_{\text{aire}}$  es la permeabilidad al vapor del agua del aire

$\delta_{\text{producto}}$  es la permeabilidad al vapor de agua del producto

Una vez comprobados estos aspectos básicos, es posible seguir evaluando algunas de las estrategias de mitigación de la humedad relativa en el interior de los edificios.

## 2.3.2 Sistemas pasivos

Una primera estrategia útil para el control de la humedad interior de los edificios es el diseño correcto de los diferentes componentes de los edificios. Por lo tanto, es fundamental el uso de estrategias "pasivas" para reducir el consumo de energía:

- estudio de los escudos solares fijos o móviles;
- superficies acristaladas correctamente dimensionadas según la orientación del edificio;
- utilización de invernaderos solares;
- diseño correcto de las envolventes;
- utilización de materiales de elevada inercia térmica, transpirabilidad y aislamiento en el diseño de las envolventes de los edificios;
- ventilación natural;
- la orientación correcta del edificio;

Entre las estrategias enumeradas, las que más influyen en la eliminación de la humedad en el interior de los ambientes son las envolventes y su correcto diseño. En general, es fundamental diseñar envolventes de alta eficiencia energética compuestos de materiales que tengan las siguientes características:

- eco compatibilidad con el medio ambiente;
- alto rendimiento de absorción acústica;
- excelentes prestaciones de aislamiento acústico;
- alta transpirabilidad;
- excelente protección contra incendios;
- elevada inercia térmica;

Se ha decidido de centrar el estudio en la importancia del diseño de envolventes de alto rendimiento, compuestas de materiales sostenibles y transpirables, ya que esta característica, ligada a la acumulación térmica, permite la creación de envolventes permeables al vapor de agua, capaz de regular la humedad relativa de los espacios interiores.

### 2.3.2.1 Características de los materiales higroscópicos

En la construcción tradicional, sobre todo la de los años 70, predominó el uso de envolventes compuestos de materiales impermeables que tenían la misión de crear una barrera entre el ambiente interior y el exterior, sin evaluar los beneficios existentes en la interacción de ambos entornos.

Se han realizado numerosos estudios sobre la posibilidad de utilizar materiales porosos e higroscópicos para mitigar los niveles de humedad relativa interna. En efecto, los materiales higroscópicos están dotados de un volumen interior vacío muy elevado, su porosidad permite absorber mayores cantidades de vapor que los materiales no higroscópicos.<sup>[19]</sup> Estas propiedades permiten extraer la humedad del ambiente, acumularla en sus cavidades y liberarla al medio ambiente una vez disminuida, permitiendo la reducción del consumo de energía y, por tanto, también la reducción de las emisiones contaminantes.<sup>[20]</sup>

Las actividades experimentales son fundamentales para medir las propiedades higroscópicas de los materiales y para la definición de modelos numéricos de transporte de calor, aire y humedad (heat, air and moisture HAV) en interiores.

La capacidad de acumulación higroscópica de estos materiales se define como: Moisture buffer capacity (MBC), donde el material actúa como "tampón higroscópico" capaz de amortiguar las variaciones de humedad relativa aprovechando de su porosidad y de la capacidad de absorber la humedad.<sup>[21]</sup>

Han sido numerosas las investigaciones realizadas sobre materiales de construcción o utilizados en muebles para decorar con estas características, para la evaluación de su rol en la mitigación de la humedad y del bienestar termohigrométrico interno.

Fue necesario determinar una magnitud normalizada para caracterizar la capacidad de absorción de la humedad de estos materiales. Esto trajo muchas universidades<sup>3</sup>,

---

<sup>3</sup> La Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) (como jefe de proyecto); VTT, Finlandia; Byggforsk, Noruega (NBI); y la Universidad de Lund, Suecia (LTH). Además, el proyecto va seguido de un grupo de referencia internacional con participantes de otros seis institutos de investigación.

durante el programa de investigación NORDTEST, seguir un único protocolo para la definición de un nuevo índice y un procedimiento experimental bien definido.<sup>[22]</sup>

El índice es el Moisture Buffering Value (MBV), es una magnitud práctica de comparación de la capacidad higroscópica de los materiales y por lo tanto de evaluar su capacidad de funcionamiento como "tampón higroscópico".<sup>[21]</sup>

*“El práctico Moisture Buffer Value ( $Mbv_{practical}$ ) indica la cantidad de agua que se transporta dentro o fuera de un material de superficie abierta, durante un determinado período de tiempo, cuando está sujeto a variaciones de humedad relativa del aire circundante. Cuando el intercambio de humedad durante el período se indica por superficie abierta y por variación % de humedad relativa, el resultado es el MBV práctico. La unidad para  $Mbv_{practical}$  es  $kg / (m^2 \cdot \%UR)$ .”*<sup>[22]</sup>

El método experimental prevé que las muestras de materiales, colocadas en una cámara climática, se sometan a tensiones cíclicas de 24 horas, de las cuales 8 horas con una humedad relativa del 75% (fase de adsorción) y 16 horas con una humedad relativa del 33% (fase de desorción). Durante las pruebas, es importante que el equipamiento sea capaz de efectuar cambios rápidos de humedad relativa. El ensayo debe realizarse siempre a 23 °C como referencia. Se utilizarán al menos tres muestras y se utilizará una balanza precisa, ya que las muestras se pesarán de forma continua o intermitente durante el ensayo. Se realizarán al menos tres ciclos y la amplitud del peso no deberá variar en más de un 5 % de un día para otro. Estos ciclos se definen como estables y se caracterizan por el hecho de que las cantidades diarias de absorción y de liberación de humedad se acercan. Además, la variación de la masa deberá normalizarse por  $m^2$  y por la variación de la humedad relativa para proporcionar el MBV.<sup>[21][22]</sup>

El protocolo también proporciona una clasificación de los materiales en función del  $Mb_{v\text{practical}}$ , sintetizados en la siguiente imagen:

MBV <sub>practical</sub> class	Minimum MBV level	Maximum MBV level
	[g/(m <sup>2</sup> % RH) @ 8/16h]	
Negligible	0	0.2
Limited	0.2	0.5
Moderate	0.5	1.0
Good	1.0	2.0
Excellent	2.0	...

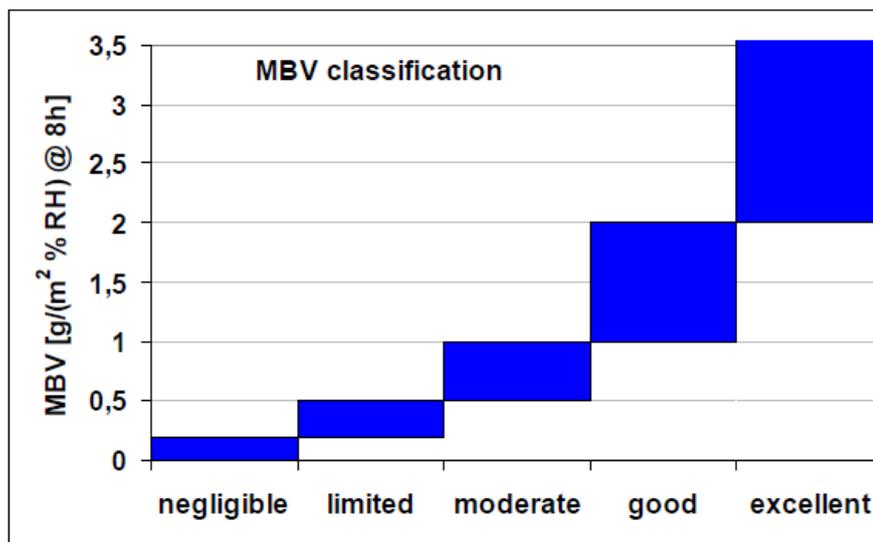


Figura 6 Clases de  $Mb_{v\text{practical}}$  de materiales [21]

Entre los diferentes laboratorios que forman parte del proyecto NORDTEST se ha realizado un Round Robin test, para probar la validez del protocolo y evaluar la posibilidad de obtener valores similares con diferentes instrumentos y operaciones. Se han probado varios materiales de construcción presentes del diagrama siguiente con los respectivos  $Mb_{v\text{practical}}$  como media de los valores obtenidos por los diferentes laboratorios.<sup>[21][22]</sup>

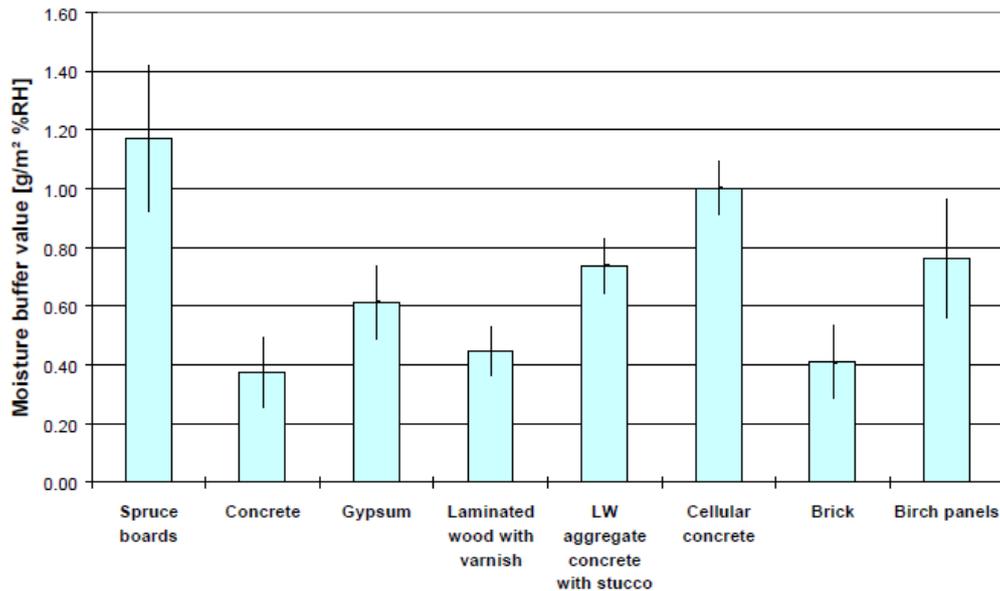


Figura 7  $MVB_{\text{practical}}$  de algunos materiales ensayados en diferentes laboratorios [22]

No obstante, existen otras metodologías experimentales para evaluar la absorción y el desabsorción de la humedad relativa como consecuencia de las variaciones de humedad relativa:

- JIS A 1470-1 (2002) “Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity-Part 1: Response method of humidity”.<sup>[23]</sup>
- ISO 24353:2008 “Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation”. También define la eficiencia de absorción y desabsorción de los materiales, valorada como la variación de masa de una muestra desplazada de un espacio a otro con diferente humedad relativa e igual temperatura.<sup>[24]</sup>
- UNI EN ISO 12571:2013 “Rendimiento igrotérmico de los materiales y productos de construcción - Determinación de las propiedades de absorción higroscópica”. En una cámara climática, se someten un mínimo de tres muestras a una variación de humedad relativa. Las probetas se pesarán hasta que se alcance el equilibrio con el entorno adyacente. Una vez calculado el

contenido de humedad de cada probeta en el equilibrio para los diferentes niveles de humedad relativa, se traza la curva de desabsorción y absorción del material.<sup>[25]</sup>

### 2.3.2.2 Materiales higroscópicos sostenibles

Se han realizado numerosas pruebas para evaluar el comportamiento "buffer" de muchos materiales sostenibles desde el punto de vista ecológico, que han tenido buenas propiedades para la absorción o la liberación de vapor de agua. Entre estos se encuentran los revestimientos en tierra cruda, la madera, el hormigón celular, revestimientos con capas delgadas de yeso, materiales orgánicos como el cáñamo, lino, paja y fibras de coco asociados a aglutinantes minerales. Se analizan en detalle los análisis de algunos de estos materiales.

Podtield y Jensen realizaron sus estudios antes de la creación del protocolo NORDTEST y estudiaron el comportamiento absorbente de materiales de fácil acceso en la naturaleza y que también tenían costes moderados: ladrillos de tierra cruda, madera y hormigón celular.<sup>[26][27]</sup> La experimentación se realizó en una cámara climática constituida por un pozo cilíndrico con una superficie interna de acero inoxidable que resultaba inerte a la humedad.<sup>[26]</sup> La muestra de ensayo se ha colocado horizontalmente, con un diámetro máximo de 800mm.<sup>[26]</sup> El calentamiento de la cámara se hizo a través de una resistencia eléctrica, mientras que el enfriamiento se hizo a través del agua que circulaba en una bobina.<sup>[26]</sup> La humedad relativa fue creada por la evaporación del agua en un pequeño depósito de cobre con los bordes aislados, cuya temperatura se controlaba mediante un dispositivo termoeléctrico.<sup>[26]</sup> Los materiales se expusieron a valores de humedad relativa entre el 50 y el 60% y posteriormente se midió la variación de peso debida al intercambio de vapor con el espacio circundante.<sup>[26]</sup> Al término de este estudio, se constató que los tableros de madera de grano fino tienen una capacidad de absorción mejor que la humedad relativa ambiental.<sup>[27]</sup>

Material utilizado	Agua absorbida (g)
Lana de madera, 70mm	10,3
Madera de grano fino, 30 mm	21,8
Lana de madera, diámetro 160mm detras del retardante	5,5
Paneles de yeso, 13mm con retardante e 160mm de lana	5,8
Paneles de yeso	5,5

Tabla 2 Valores resultantes de un cambio ciclos de UR en un día

Otra experimentación importante fue llevada a cabo en la Politécnica de Bari, por los investigadores Stefanizzi y Liuzzi, los cuales evaluaron el comportamiento higrotérmico de algunos materiales siguiendo el protocolo NORDTEST y determinando por lo tanto su MBV.

Los materiales utilizados para las pruebas fueron: fibra de madera, tierra cruda, tierra-paja, tierra-cal, toba y yeso.<sup>[28]</sup> En particular, la tierra cruda se compone de 15% de arcilla, 25% de limo, 58% de arena, 2% de piedrecillas.<sup>[28]</sup> Para el compuesto tierra-paja se han añadido al compuesto de tierra cruda de las fibras de paja con un porcentaje de 4% con relación al peso total del compuesto.<sup>[28]</sup> En cambio, para el compuesto tierra-cal se ha añadido un 4% de cal.<sup>[28]</sup> Estas adiciones han permitido reducir el fenómeno de la retirada, causado por la evaporación del agua, mejorar la capacidad de aislamiento térmico, de regulación de la humedad y de resistencia a tracción y compresión.<sup>[28]</sup>

Se prepararon dos muestras de cada material y se sellaron por todas las caras, excepto una con adhesivos de aluminio.<sup>[28]</sup> A continuación, se resumen las características de las muestras en una tabla.<sup>[28]</sup>

Materiale	densità [kg/m <sup>3</sup> ]	area superficie esposta [cm <sup>2</sup> ]	spessore [cm]
Fibre di legno-MDF (L)	257	194	1,6
Terra cruda (TC)	1980	176	4,8
Terra-Paglia (TP4)	1384	176	5,3
Terra-Calce (TC4C)	1726	160	5,3
Tufo (TU)	1830	185	3,2
Gesso (G)	693	180	1,7

Figura 8 Características de las probetas [28]

Los análisis se realizaron en la cámara climática Perani AC520, con una temperatura de 23 °C y una humedad relativa del 50%. Cada ciclo duró 24 horas, 8 horas con una humedad relativa del 75% y 16 horas con una humedad relativa del 33%.<sup>[28]</sup>

Se han realizado ocho ciclos para cada material y en el diagrama de los valores de  $Mb_{V_{practical}}$ , tanto en la fase de absorción como en la de desabsorción, se ha observado que en los últimos cuatro ciclos las cantidades de humedad absorbidas y las liberadas tienden a igualarse y a mantenerse constantes con el tiempo.<sup>[28]</sup> El  $Mb_{V_{practical}}$  de los materiales analizados se calculó como media de los MBV, tanto en la fase de humidificación como en la fase de deshumidificación. Se han clasificado sobre la base de este valor y se muestra la tabla resumen.<sup>[28]</sup>

Materiale	$MBV_{pratico}$ [g/(m <sup>2</sup> %RH)]	Classe
Legno-MDF (L)	2,36	eccellente
Terra cruda (TC)	1,88	buono
Terra-Calce (TC4C)	1,84	buono
Terra-Paglia (TP4)	1,80	buono
Gesso (G)	0,75	moderato
Tufo (TU)	0,65	moderato

Figura 9 Clasificación de las materias según la Nordtest [28]

La madera resultó el mejor material higroscópico con un  $\text{moistur buffer value}$  igual a 2,36, siguen en orden decreciente del  $\text{Mbv}_{\text{practical}}$  la tierra-cruda, tierra-cal, tierra-paja, yeso y toba.<sup>[28]</sup>

Se ha realizado otro estudio sobre materiales biológicos. Más concretamente, se estudiaron los hormigones de cal-cáñamo (HLC) y cal-lino (FLC). El aglutinante utilizado para la formulación es el Tradical PF 70 que contiene una base de cal hidratada (CL-90S), aglutinantes hidráulicos y pozos.<sup>[29]</sup>

El hormigón de cáñamo tiene un bajo impacto ambiental y el análisis del ciclo de vida de este material demuestra que tiene una huella de carbono muy baja.<sup>[29]</sup> Las características físicas e higrotérmicas han demostrado que este material tiene una baja conductividad, que reduce la difusión del calor, y que tiene una elevada capacidad de amortiguación de la humedad que puede mantener el confort igrotérmico en el interior.<sup>[29]</sup> El hormigón de lino también tiene un bajo impacto ambiental y una conductividad térmica ligeramente superior a la del hormigón a base de cáñamo. Además, el poder aislante de estos dos materiales es mucho más alto que el hormigón normal.<sup>[29]</sup>

Estos materiales han sido probados por su capacidad para amortiguar las variaciones de humedad relativa interna gracias a su potencial de absorción utilizando el protocolo del proyecto Nordtest. El objetivo de las pruebas es determinar la isoterma de absorción, la permeabilidad al vapor y el MBV.<sup>[29]</sup>

Para los análisis se ha utilizado una cámara climática CL2 Biaclimatic Type-25, la temperatura se ha mantenido constante a 23 °C, mientras que la regulación de la humedad relativa (75%, 33%) en la cámara climática sigue siempre el esquema 8/16 h y se ha efectuado manualmente. Se prepararon tres muestras con un volumen total de  $100\text{m}^3$  y espesores de 3cm, 5cm y 7cm respectivamente.<sup>[29]</sup><sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Las longitudes laterales de las muestras expuestas son superiores al valor recomendado en el protocolo de Nordtest.

A continuación, se presentan los valores de MBV calculados a partir de los análisis de las seis muestras.<sup>[29]</sup>

Concrete	e [cm]	MBV [g/(m <sup>2</sup> %RH)]		
		Middle humidity level [33/75%RH]	Low humidity level [33/55%RH]	MBV <sub>ideal</sub>
HLC	3	1.84	1.83	2.66
	5	1.86	1.85	
	7	2.02	1.98	
FLC	3	2.16	2.13	2.89
	5	2.24	2.19	
	7	2.27	2.24	

Figura 10 MBV en función de los diferentes niveles de humedad relativa y espesores [29]

Ambos materiales biológicos han demostrado un rendimiento "excelente" de amortiguador de humedad. En el gráfico siguiente se comparan estos dos materiales con otros materiales basados en cemento. Se nota que el cemento y el ladrillo entran en la categoría más baja, en la categoría moderada encontramos el yeso y en la categoría buena el hormigón celular.<sup>[30]</sup>

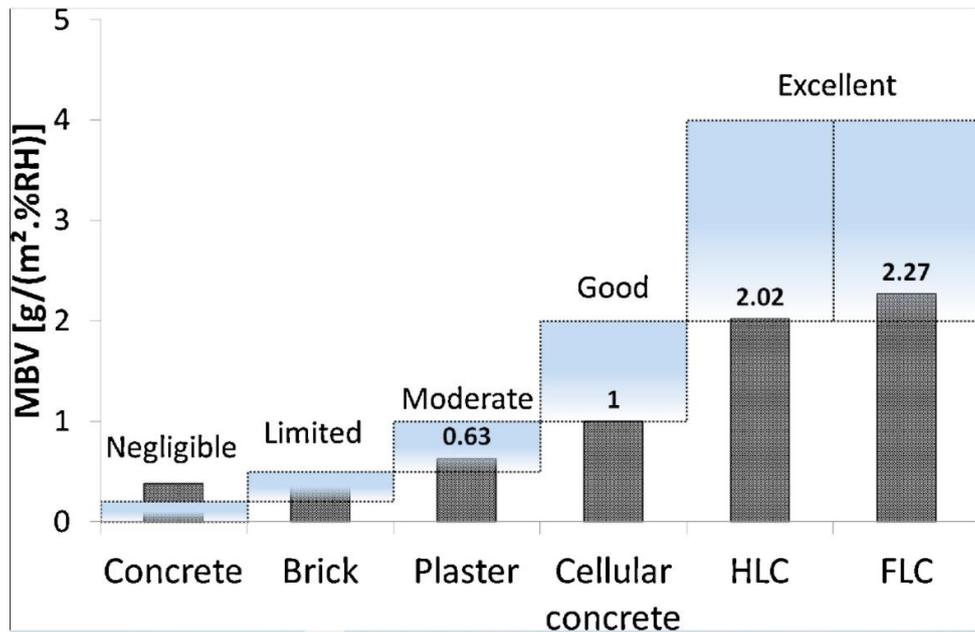


Figura 11 MBV de materiales biológicos [29]

Estos datos representan sólo una parte de los estudios realizados con algunos materiales de fácil acceso en la naturaleza, que tengan un coste bajo o moderado y que ofrezcan excelentes prestaciones en términos de eliminación pasiva de la humedad relativa de los ambientes interiores.

### 2.3.2.3 Diseño de envolventes adaptables

El uso de materiales de alto rendimiento en cuanto a transpirabilidad, inercia térmica y conductividad no es suficiente. Hay que aprovechar al máximo estas propiedades y para ello es necesario diseñar las envolventes de manera correcta para obtener un confort y una salubridad del aire adecuadas.

El primer paso es sin duda evaluar las condiciones ambientales del lugar donde se va a construir la estructura, para evaluar la mejor exposición solar y forma arquitectónica relacionadas con las características de temperatura, dirección del viento, de los ruidos, de la radiación solar.

Dependiendo de las características del clima exterior y el microclima interno requerido, ya sea por la normativa<sup>5</sup> que, por los usuarios, pueden determinar una serie de opciones de diseño que tratan de crear el equilibrio adecuado entre el clima exterior, los materiales y la tecnología constructiva.<sup>[12][31][32][33]</sup> A continuación, se va a elegir la ingesta solar adecuada para aprovechar la radiación solar en invierno para la calefacción de los edificios, diseñar los escudos solares de manera que el aporte solar sea menor en verano, instalar ventanas con baja transmitancia y posicionarlas de tal manera que favorezcan la ventilación natural y diseñar envolventes de alto rendimiento.

Antes de proceder con el diseño de las envolventes, es necesario cambiar el modo de pensar y comprender que estos elementos no son partes fijas que dividen el ambiente exterior del interior, sino que son elementos capaces de adaptarse a las variaciones ambientales, tanto estacionales como diarios.

Teniendo en cuenta los parámetros que determinan las condiciones termo higrométricas y, por tanto, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y los repuestos de aire, es posible estudiar envolventes cada vez más eficaces que sean capaces de controlar estos parámetros de manera que no se utilicen las instalaciones del edificio, o como máximo de utilizarlas sólo para pequeñas contribuciones.<sup>[34]</sup>

Esto contribuye a una notable reducción de la demanda energética del edificio, como ya se ha analizado en los párrafos anteriores.

Las envolventes de los edificios llamadas "adaptables" son capaces de cambiar su configuración reaccionando a la temperatura, la humedad o la radiación solar garantizando el confort interno y el ahorro energético para la calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación.<sup>[35]</sup>

---

<sup>5</sup>Como: la UNI EN ISO 6946:2008 para el cálculo de la transmitancia térmica, el Decreto Legislativo 311/2006 para determinar los valores límite de transmitancia, UNI EN ISO 7730, para la determinación de la comodidad y los CAM (criterios ambientales mínimos).

Estas envolventes tienen la capacidad de adaptarse al clima y cambiar de forma reversible sus funcionalidades, características y comportamientos según las condiciones del contorno y para mejorar y mantener el rendimiento del edificio. Gracias a la evolución tecnológica, a los materiales innovadores sostenibles y a la necesidad de reducir el impacto ambiental, es posible utilizar nuevas soluciones constructivas y, por tanto, cambiar totalmente la forma de diseñar y gestionar la construcción de un edificio.<sup>[35]</sup>

Los mecanismos adaptables de los envolventes se pueden dividir en dos clases, dependiendo de si tienen un comportamiento dinámico en macro-escala o micro-escala.

El primer tipo se define como "envolventes cinético", ya que se genera un movimiento. Este tipo de adaptación genera cambios en los envolventes del edificio a través de partes móviles. El segundo tipo prevé modificaciones que afectan a la estructura interna del material. Por lo tanto, pueden producirse cambios en las propiedades termofísicas ópticas o a través del intercambio de energía. Los materiales inteligentes, como las aleaciones con memoria de forma o los polímeros sensibles a la temperatura, se aplican a menudo para lograr este tipo de adaptación.<sup>[35]</sup>

Un estudio importante que está cambiando el concepto de envolventes es el de la biomimética. Consiste en estudiar los comportamientos de la naturaleza con el fin de reproducir su funcionamiento para mejorar el comportamiento de los edificios y hacerlos más eficientes y eficaces. De este modo, es posible crear fachadas que tengan un comportamiento similar al de los organismos vivos o de la naturaleza.<sup>[35]</sup>

La naturaleza se convierte en un ejemplo, algo que conocer, profundizar y de lo que aprender. Son varios los casos en los que se ha aplicado la biomimética y, en cierto sentido, uno de los primeros es la máquina voladora de Leonardo, que se inspiraba precisamente en el vuelo de las aves.<sup>[36]</sup>

Sin embargo, son muchas las aplicaciones modernas de estos envolventes adaptables biomiméticos como, por ejemplo, las Al Bahr Towers del Abu Dhabi Investment Council.<sup>[37]</sup>



Figura 12 Al Bahr Towers [37]

Las dos torres fueron diseñadas para tener un estilo contemporáneo, pero teniendo en cuenta las tradiciones arquitectónicas locales. En efecto, el uso de combinaciones geométricas con forma circular y principio de rotación son coherentes con la cultura islámica para el concepto de unidad con los acontecimientos de la naturaleza y con la ciencia bioclimática.<sup>[37]</sup> El arquitecto Aedas ha desarrollado las dos torres con una forma cilíndrica que ha permitido reducir el impacto del sol sobre las porciones de elevaciones más expuestas.<sup>[37]</sup> El cilindro se ha modelado de forma que presente una sección más pequeña en la base y en la parte superior.<sup>[37]</sup> También se han previsto jardines colgantes para reducir más la exposición solar de algunas paredes.<sup>[34]</sup> Para proteger mejor el edificio del sol se ha integrado la "mashrabiya", un tipo de rejilla de madera utilizada mucho en la arquitectura islámica que sirve para preservar la privacidad, reducir tanto el impacto visual como el térmico.<sup>[37]</sup> El

arquitecto ha desarrollado una serie de elementos en forma de paraguas que se abren o cierran en función de la radiación solar. Estos dispositivos permiten no colocar vidrios oscurecidos y, por lo tanto, disminuir los aportes solares al menos en un 50% y los costes derivados del uso de iluminación artificial.<sup>[38]</sup>



Figura 13 Tecnología de la fachada [38]

Otro ejemplo interesante es el edificio Kuggen de la Universidad de Tecnología Chalmers de Gotemburgo, Suecia, diseñado por Wingårdh arkitektkontor Kuggen. Kuggen utiliza una tecnología de construcción ecológica en cuatro niveles diferentes: ventilación adaptable, iluminación adaptativa, sistemas interactivos de calefacción y refrigeración e iluminación diurna eficaz.<sup>[39]</sup> Los paneles cerámicos utilizados para la fachada han sido elegidos por su longevidad. Las ventanas son triangulares permitiendo a la luz del día seguir el techo en profundidad en el edificio mientras que permanece en una relación baja (30%) de la superficie de elevación. El resultado es un edificio que busca un consumo de energía de 60 kW / a / m<sup>2</sup> muy por debajo de lo que se considera un edificio verde, proporcionando al mismo tiempo un confort de vanguardia (la temperatura en el interior de las oficinas varía entre 22 y 26 °C).<sup>[39]</sup>



Figura 14 Prospecto del edificio Kuggen [39]

Estos son sólo algunos de los numerosos ejemplos de envolventes adaptables que utilizan los principios de funcionamiento de la biomimética para el control de la calidad de los entornos interiores utilizando en su propio beneficio las características climáticas de los lugares donde se ubican los edificios.

En relación con el tema de estudio en cuestión y, por tanto, con la posibilidad de crear envolventes que sean capaces de gestionar la humedad y la temperatura de los ambientes interiores, se han realizados numerosos estudios sobre algunos materiales innovadores para crear fachadas adaptables en este ámbito.

Una investigación llevada a cabo por la Universidad de Berkley, todavía en fase de desarrollo, prevé el desarrollo de un envoltorio SABER (Self-activated building envelope regulation) que se inspira en el funcionamiento de la piel humana.<sup>[35]</sup>

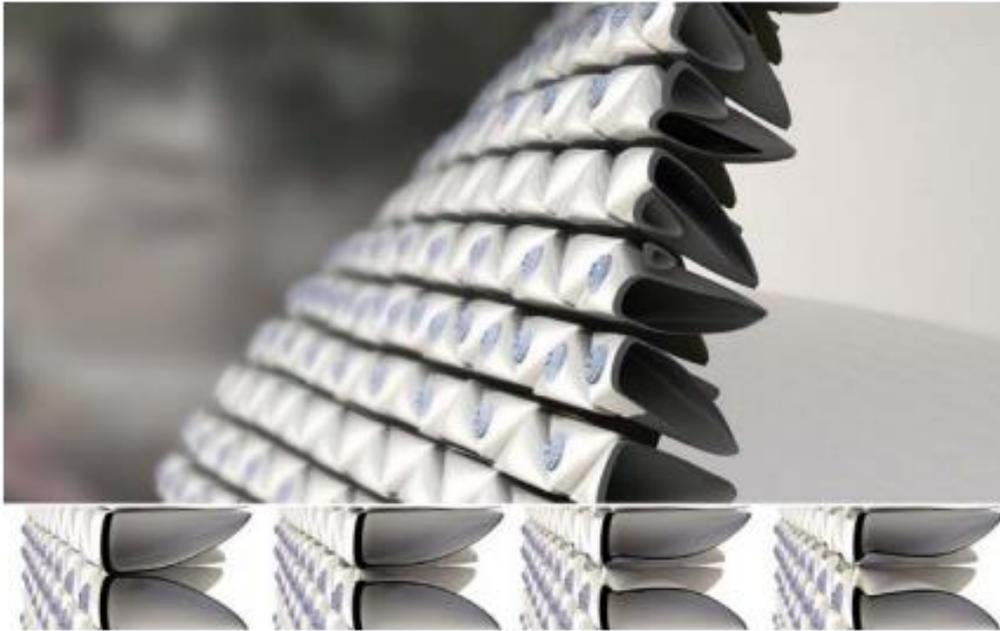


Figura 15 Morfología de la envolvente SABER [35]

La estructura está compuesta de retículas geométricas de Poli(N-isopropilacrilamida), un termo-polímero, mientras que el revestimiento puede variar su estructura en función de la temperatura, la humedad y la iluminación. La contracción y dilatación de la estructura permite el control de la temperatura y de la humedad en los ambientes internos.<sup>[35]</sup>

Otro estudio interesante es el de los revestimientos water-reacting compuestos de materiales a base de polímeros y siliconas que logran regular la humedad interna explotando las propiedades hidromorfas de estos materiales.

Hay numerosos prototipos, incluyendo la fachada water-reacting del diseñador de productos chino Chao Chen. Esta fachada imita el funcionamiento de las piñas que se abren en ambiente seco y se cierran para proteger los pinos cuando llueve.<sup>[40]</sup>



Figura 16 Funcionamiento de las piñas [40]

Esta fachada permite el paso de aire y luz cuando el clima es favorable e impide que el agua y la humedad entren en caso de lluvia. Este funcionamiento no requiere un gasto de energía porque las láminas de las que está compuesto son capaces de medir el nivel de humedad y cambiar su posición en función de ella sin ningún control desde el exterior.<sup>[41]</sup>

Claramente el funcionamiento en las ciudades lluviosas es inverso, es decir, cuando llueve las fachadas inteligentes se abren, según las temperaturas y la humedad exterior, permitiendo la entrada de la luz solar, mientras que en los días de sol intensos los azulejos impiden la entrada de la radiación solar y evitan el sobrecalentamiento de los ambientes internos.<sup>[41]</sup>

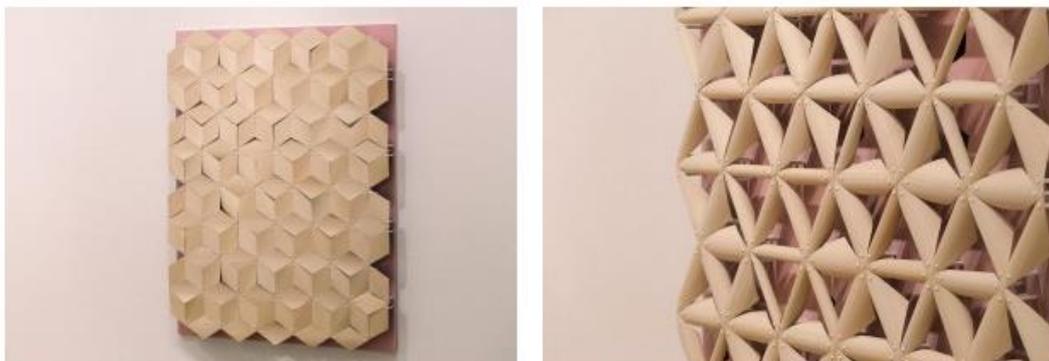


Figura 17 Morfología de la pared [41]

Chao Chen ha utilizado la misma tecnología implantada en las fachadas inteligentes para crear un instrumento válido para jardines y paredes verdes; un indicador que cambia de forma y color según el grado de humedad del suelo, este es un buen soporte para los mantenedores para averiguar si es necesario regar o no las plantas.<sup>[41]</sup>

Otro tipo de revestimiento capaz de moderar la temperatura y la humedad interna es el revestimiento auto-refrescante de hidrocerámica, un material compuesto formado por dos capas cerámicas transpirables (perforadas o porosas) y una capa de hidrogel, que se inspiran en los mecanismos de termorregulación de la temperatura corporal a través de la sudoración.<sup>[42]</sup>



Figura 18 Pared auto-refrescante [42]

El dispositivo funciona mediante refrigeración por evaporación, reduciendo la temperatura hasta 6 °C ajustando el grado de humedad.<sup>[42]</sup>

La estructura del prototipo desarrollado refleja la de las paredes sándwich:

- la primera capa estará compuesta de arcilla, cuya superficie tendrá numerosos orificios de forma cónica para permitir el acceso del agua y del aire a la capa de hidrogel;

- sigue una capa de tejido, que absorbe el agua y transmite el líquido, y que, gracias a su propiedad elástica, permite variaciones del volumen en el hidrogel y al mismo tiempo lo mantiene en su posición;
- la última capa compuesta siempre de arcilla con un espesor inferior a la primera capa, la superficie es perforada de modo que maximizar el efecto de enfriamiento.<sup>[42]</sup>

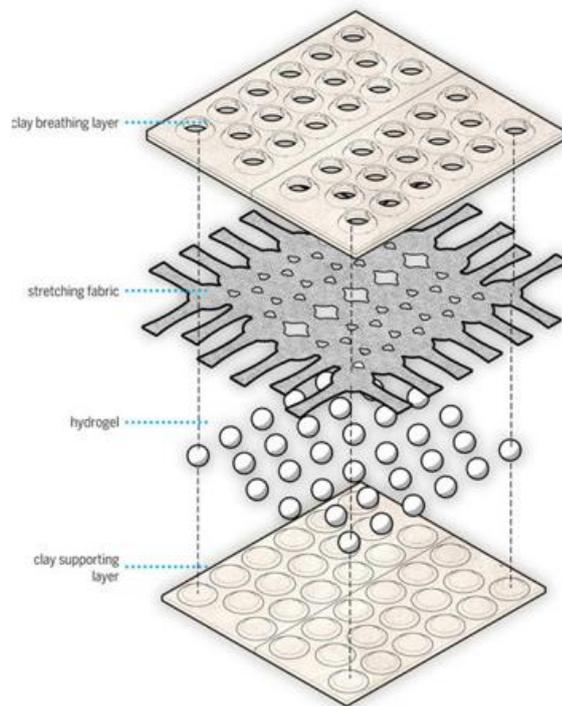


Figura 19 Estructura del prototipo [42]

La tecnología resulta especialmente interesante en relación a los costes, extremadamente bajos, y a las perspectivas de desarrollo vinculadas a la evolución de los materiales.<sup>[42]</sup>

Otros estudios están desarrollando revestimientos dinámicos que aprovechan las propiedades higroscópicas de los polímeros para obtener un rendimiento similar. El objeto de estudio de este trabajo es precisamente compuesto por una matriz polimérica electrohilada súper higroscópica y el mecanismo de funcionamiento se describirá en los capítulos siguientes.<sup>[43]</sup> (la descripción del prototipo del panel

utilizado en este estudio para la deshumidificación del ambiente interior se encuentra en el apartado 6). Todas estas tecnologías innovadoras que aún se están probando podrían aplicarse a los edificios analizando la oferta y la demanda tecnológica de los países en lugar de las necesidades energéticas y los costes de implementación.

### 2.3.3 Sistemas activos: secado por sistemas tecnológicos

En los edificios existentes, muy a menudo, la elección de materiales y las tecnologías de construcción de los envolventes no se ajustan a lo dicho para los sistemas adaptables. Por tanto, es necesario adoptar otras estrategias para reducir la cantidad de vapor presente en el aire a valores aceptables para los usuarios. Un soporte válido es el uso de sistemas "activos" como instalaciones tecnológicas para humidificar o deshumidificar los ambientes. Hay varias instalaciones que permiten el secado del aire: entre las varias tipologías encontramos:

- Calefacción y ventilación
- Deshumidificación por condensación
- Deshumidificación por absorción

#### 2.3.3.1 Calefacción y ventilación

Es el aumento de la temperatura y la ventilación. Este mecanismo depende en gran medida de la temperatura exterior, cuanto más baja sea la temperatura exterior más alta será la temperatura del entorno deshumidificado y más satisfactorio será el resultado. Por eso se obtienen mejores resultados durante el invierno. Sin embargo, este método conlleva elevados costes, tanto por su menor eficacia en la deshumidificación como por la necesidad de crear una notable diferencia de

temperatura y, por tanto, una demanda muy elevada de la potencia de calentamiento.<sup>[44]</sup>

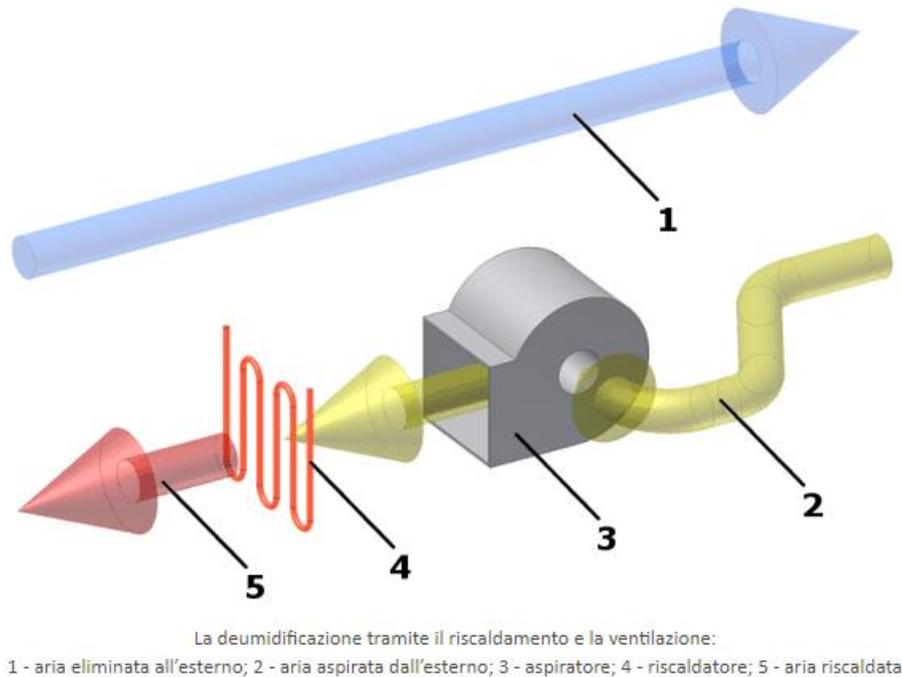
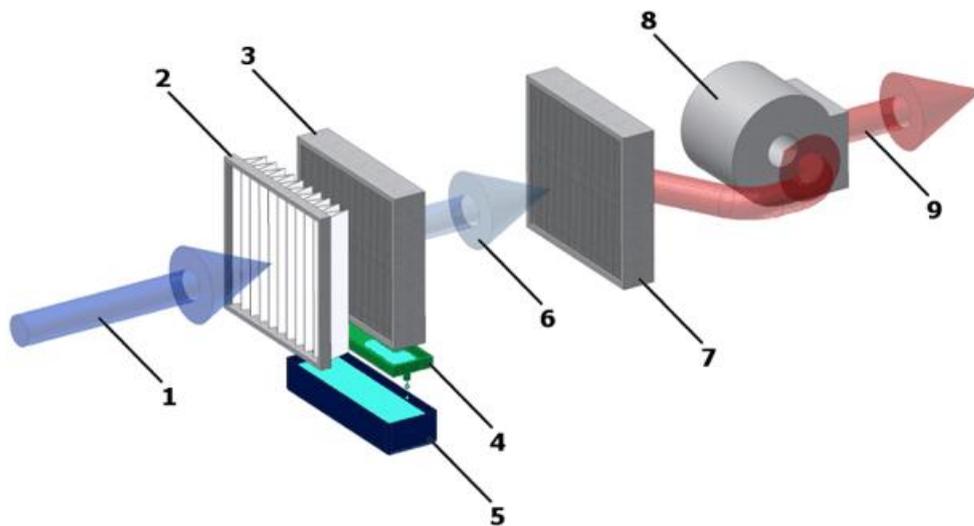


Figura 20 Deshumidificación mediante calefacción y ventilación [44]

### 2.3.3.2 Deshumidificación por condensación

Este sistema enfría el aire por debajo de la temperatura del rocío, lo que provoca la condensación. El funcionamiento entra en el ámbito de la recirculación de aire y de la aspiración continua de vapor del medio ambiente. Esta constante circulación del aire se produce a través de un sistema de refrigeración que sustrae al aire húmeda el vapor de agua transformándolo en aire recogido en un recipiente o eliminado mediante un escape directo. Este proceso se realiza hasta que se alcanza el valor de humedad del aire deseado. Éste es el sistema de deshumidificación más ventajoso y económico.<sup>[44]</sup>

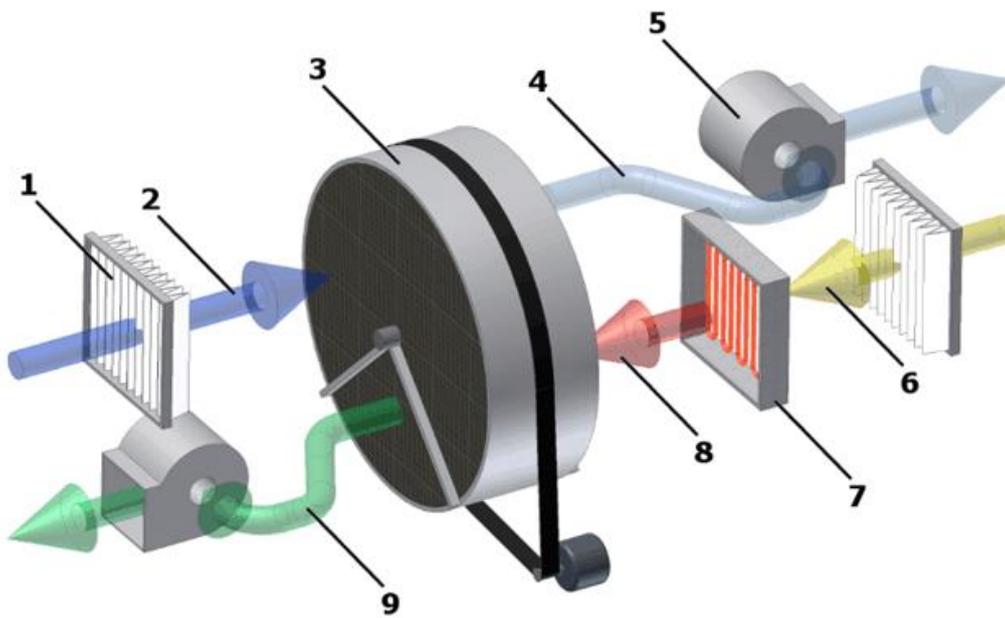


Deumidificazione a condensazione:  
 1 - aria umida; 2 - filtro; 3 - evaporatore; 4 - vasca di raccolta; 5 - serbatoio della condensa;  
 6 - aria deumidificata e raffreddata; 7 - condensatore; 8 - ventilatore; 9 - aria riscaldata e deumidificata

Figura 21 Deshumidificación por condensación [44]

### 2.3.3.3 Deshumidificación por absorción

El método consiste en la eliminación de la humedad mediante su absorción por parte de un material higroscópico. El elemento principal es un rotor de hojas de aluminio cuya superficie está cubierta por una sustancia higroscópica, que permite una absorción más eficaz de la humedad. Este dispositivo se pone en movimiento por una correa y está compuesto por una zona desecante y una regenerativa. Durante la rotación la parte higroscópica recoge la humedad, llevándola a la parte regenerativa donde el flujo de aire caliente procedente del exterior la quita. Este sistema resulta ser el más ventajoso de los tres por su notable resistencia, la autolimpieza y la eliminación de las bacterias y la posibilidad de secarse sin enfriamiento.<sup>[44]</sup>



Deumidificazione tramite assorbimento:  
 1 - filtro; 2 - aria umida; 3 - rotore; 4 - aria deumidificata; 5 - ventilatore; 6 - aria rigenerata;  
 7 - riscaldatore; 8 - aria rigenerata calda; 9 - aria rigenerata umida

Figura 22 Deshumidificación por absorción [44]

### 3.Objetivos

El propósito de este trabajo es demostrar cómo el uso de tecnologías innovadoras y adaptativas son capaces de transportar la humedad, desde el ambiente interno al externo o viceversa, explotando la permeabilidad y características de los materiales que componen las envolventes. En concreto, en el presente trabajo se analizan en detalle el potencial de una de estas tecnologías: el panel compuesto de una capa biomimética denominado (PML-PC) NFM definido como una membrana nanofibrosa NFM MOF súper higroscópica a energía solar para la deshumidificación interna. También será posible evaluar cómo esto es capaz de:

- regular los niveles de humedad relativa dentro de los límites de confort aprovechando las capacidades intrínsecas de los materiales que lo componen;
- obtener, con el uso de estas tecnologías, una mejora en términos de confort termo higrométrico en el ambiente confinado;
- optimizar el consumo de energía contribuyendo al ahorro de energía a gran escala y a pequeña escala;
- demostrar cómo los materiales biomiméticos ofrecen una posible solución a los problemas medioambientales actuales;
- utilización de estas tecnologías también fuera del ámbito de la construcción.

## 4. Metodología

El desarrollo de la temática del trabajo de este máster fue elegido para evaluar las posibles estrategias innovadoras para reducir la cantidad de humedad relativa, i reconducirla entre los límites de confort, en ambientes interiores sin desperdiciar energía y aprovechando las capacidades de las envolventes. Han sido muchas fases de este trabajo que se pueden resumir en:

- Fase 1: Estudio bibliográfico del caso
- Fase 2: Estudio de las características del panel
- Fase 3: Preparación del modelo caso de estudio
- Fase 4: Simulaciones
- Fase 5: Análisis de los resultados

### 4.1 Estudio bibliográfico del caso

Las plataformas más utilizadas para buscar artículos y revistas científicas fueron Scopus y Google Scholar. El estudio bibliográfico se centró, en un primer momento, en las posibles estrategias de humidificación y deshumidificación a través de envolventes comerciales, y se analizaron las potencialidades de los materiales utilizados en estas tecnologías. Existen numerosos ámbitos de aplicación y estudios sobre diversos materiales, como la madera, el cáñamo, la tierra cruda, etc. Todos los materiales que han mostrado una elevada higroscopicidad y porosidad permiten la absorción y la acumulación del agua contenida en el aire para favorecer la absorción de la humedad. A continuación, se prestó atención a las tecnologías innovadoras de las carcasas de construcción adaptables de permeabilidad variable del aire para el control de la humedad relativa, que a menudo basan su funcionamiento en los principios biomiméticos. Evaluadas las grandes potencialidades de estos sistemas de deshumidificación pasivos se ha profundizado sucesivamente el estudio de uno de estos: el panel compuesto de una capa biomimética denominado (PML-PC) NFM.

## 4.2 Estudio de las características del panel

El objeto del estudio es el panel compuesto de una capa biomimética denominado (PML-PC) NFM definido como una membrana nanofibrosa súper higroscópica que se inspira en el mecanismo de transpiración de la madera, llamada PML-PC.<sup>[43]</sup> Ha sido elegido por su tecnología innovadora, por su elevada higroscopicidad y reciclabilidad que le permite absorber una elevada cantidad de humedad de los ambientes interiores y la expulsión de esta por evaporación bajo la iluminación solar, reduciendo así la humedad relativa de los interiores. Este proceso permite obtener una deshumidificación de los ambientes internos continua que, unida a las propiedades de los materiales del panel, permiten casi la evaporación inmediata del agua absorbida.

## 4.3 Preparación del modelo caso de estudio

Para evaluar los efectos de la membrana innovadora nanofibrosa MOF, fue necesario simular en la manera más posible su comportamiento. Se han recogido y analizado los datos de los artículos científicos sobre los componentes del panel, con el soporte de un software, y se ha evaluado su capacidad de absorción de humedad relativa dentro de una habitación.

Para simular el comportamiento del panel y evaluar su eficiencia energética, se eligió un software que apoyara dicho estudio. Para obtener evaluaciones fiables y lo más precisas posible, se seleccionó el software WUFI PLUS de la empresa alemana Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics). Una vez definida la geometría de la sala, se estudió la forma más adecuada de instalar el panel y operar su funcionamiento. Antes de realizar las simulaciones fue necesario realizar análisis para calcular algunos de los parámetros necesarios para predecir la activación del mecanismo de deshumidificación del panel y su correcto funcionamiento.

## 4.4 Simulaciones

Una vez definido el modelo y los parámetros, las simulaciones se realizaron primero sin la utilización del panel y luego con la activación del panel. De esta forma se pudo comprender si el panel producía realmente una reducción de la humedad relativa interna y un aumento simultáneo del confort interior. Las simulaciones se realizaron primero evaluando las condiciones climáticas más extremas del año 2020, es decir, el día más frío y cálido del año, y posteriormente se realizaron en un día representativo de cada mes del año 2020 para poder evaluar los beneficios del panel durante todo el período de tiempo elegido.

Los días seleccionados son los siguientes: 7 enero, 7 febrero, 14 marzo, 21 abril, 12 mayo, 16 junio, 17 julio, 20 agosto, 12 septiembre, 3 octubre, 14 noviembre, 10 diciembre.

Además de realizar las simulaciones en diferentes días, se cambió la exposición del panel considerando el Sur, Oeste y Este a excepción del Norte donde no hay radiación solar directa del panel.

## 4.5 Análisis de los resultados

Los resultados extrapolados del programa y analizados para evaluar el comportamiento del panel fueron la temperatura operativa <sup>6</sup> y la humedad relativa del ambiente interior y dos índices de confort que tienen en cuenta estas dos variables que son el PMV (Predicted mean vote o Voto Medio Esperado) y el PPD (Predicted percentage of dissatisfied o porcentaje esperado de insatisfechos). Se organizaron comparando los datos de los cuatro parámetros tomados en consideración con y sin el uso del panel para evaluar los efectos generales y

---

<sup>6</sup> la definición de temperatura operativa dada por la norma UNI 10375:2011: "La temperatura de funcionamiento representa la temperatura uniforme de un ambiente en el que un ocupante cambiaría por irradiación y convección la misma potencia calorífica intercambiada en el entorno de ensayo de forma no uniforme."

comprender en qué períodos del año era más apropiado utilizar el panel para la deshumidificación del medio ambiente.

## 5. Herramientas

Los programas utilizados para el desarrollo de los análisis y simulaciones son esencialmente tres:

1. Microsoft Excel
2. Inkscape
3. WUFI PLUS

El primero Microsoft Excel es un programa producido por Microsoft, dedicado a la producción y gestión de hojas de cálculo. Permitió en este estudio calcular ecuaciones en la parte de análisis y crear gráficos que permitieron hacer legibles los datos extrapolados por el software luego de realizar las simulaciones.

Mientras Inkscape es un software de gráficos vectoriales gratuito basado en el formato Scalable Vector Graphics (SVG), multiplataforma pero especialmente enfocado a sistemas GNU / Linux. El objetivo del proyecto es proporcionar una poderosa herramienta gráfica, que ofrezca compatibilidad total con los estándares XML, SVG y CSS y que brinde compatibilidad hacia atrás con los formatos propietarios de Adobe Illustrator, Macromedia FreeHand, Corel Draw. se eligió porque permitía la vectorización de dos gráficos y para obtener un tercer gráfico que comparara los dos parámetros útiles para los propósitos del proyecto con la mayor precisión posible.

Por último WUFI PLUS de la empresa alemana Fraunhofer IBP (Institute of Building Physics) es parte de la familia de software de WUFI y es la herramienta de simulación más completa entre ellos. De hecho, permite simular el comportamiento dinámico higrotérmico de todo el edificio y luego evaluar su confort, la calidad del aire interior, los daños a los componentes en función de las cargas de refrigeración y refrigeración, la necesidad de humidificar o deshumidificar y el consumo de energía. Además de la simulación dinámica igrotérmica del edificio, WUFI Plus también se puede utilizar para el diseño y la certificación de Casa Pasiva y para verificar el aislamiento térmico estival según la norma alemana DIN 4108-2.

La interfaz del software es común a la de otros softwares de cálculo dinámico termo higrométrico, en las primeras secciones es posible insertar los datos de diseño, el tipo de cálculo, su exactitud y el período a tener en cuenta. Partiendo de la construcción del modelo tridimensional, en las diferentes subsecciones, es posible elegir la composición de los distintos elementos, definir los posibles puentes térmicos, insertar superficies acristaladas, instalaciones y otros parámetros adicionales.

## 6. Descripción del prototipo del panel

Los sistemas de secado presentados desempeñan un papel fundamental en la deshumidificación y en la recogida de agua. Para que los interiores sean confortables, a menudo es necesario reducir los niveles de humedad relativa a sus valores límite de confort (del 40 al 60%).<sup>[8]</sup>

Se propone en este trabajo de tesis una membrana nanofibrosa NFM MOF súper higroscópica a energía solar para la deshumidificación interna. Este sistema ha sido estudiado por numerosos investigadores de la Universidad de Shanghai (China) y publicado un artículo en la revista Nature Communication.<sup>[43]</sup>

Utilizando los sistemas de deshumidificación antes descritos, se ha observado que un factor común es el gasto energético de las instalaciones tecnológicas. Además, entre las soluciones vistas resulta más eficaz en términos tanto económicos como medioambientales adoptar decisiones inteligentes tanto sobre la tecnología como sobre la elección de los materiales a utilizar para la construcción de las envolventes.<sup>[45]</sup> Por lo tanto, es necesario desarrollar sistemas de control de la humedad que sean independientes para lograr un equilibrio óptimo entre el consumo de energía y el confort interno.<sup>[46]</sup>

Sabemos que la humedad, según la teoría de la termosmosis, puede ser transportada por un ambiente de baja humedad hacia un ambiente de alta humedad, a través de una membrana porosa, bajo la acción motriz de los gradientes térmicos de los dos ambientes.<sup>[43]</sup> Este modo de transporte de la humedad, combinado con los estudios realizados sobre la alta eficiencia de la energía solar para la calefacción localizada en superficie para la generación de vapor, han dado vida a esta tecnología de deshumidificación innovadora.<sup>[47]</sup>

La fabricación de este material se ha inspirado en la madera. De hecho, la madera natural muestra una estructura con redes celulares jerárquicas horizontales y canales interconectados verticales que permiten transportar el agua del suelo a las hojas a través del mecanismo de transpiración.<sup>[43]</sup>

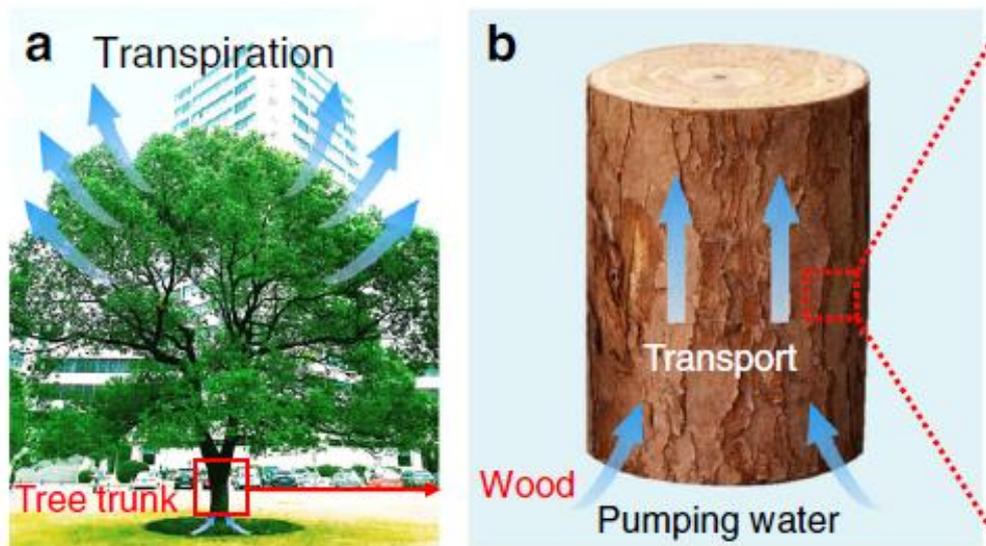


Figura 23 Mecanismo de transpiración de la madera [43]

Inspirándose en estas estructuras, se ha desarrollado una doble capa NFM MOF biomimética similar a la madera para la absorción de humedad y la evaporación del vapor de agua.<sup>[43]</sup>

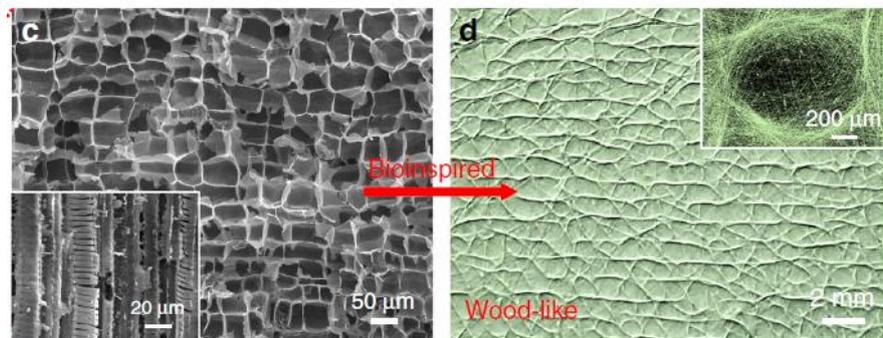


Figura 24 Estructura de red celular de la madera y del NFM biomimético [43]

En particular, la primera capa desecante es responsable de la absorción de la humedad del aire interior y las moléculas de agua absorbidas son expulsas por el calor generado por conversión térmica solar de la segunda capa fotométrica, bajo iluminación solar.<sup>[43]</sup> A continuación, las moléculas de agua se transportan desde el interior hacia el exterior, pasando primero por la capa de desecación y luego por la capa fotométrica.<sup>[43]</sup> De este modo, la doble capa biomimética es capaz de realizar

una deshumidificación interna continua de los ambientes internos bajo irradiación solar.<sup>[43]</sup>

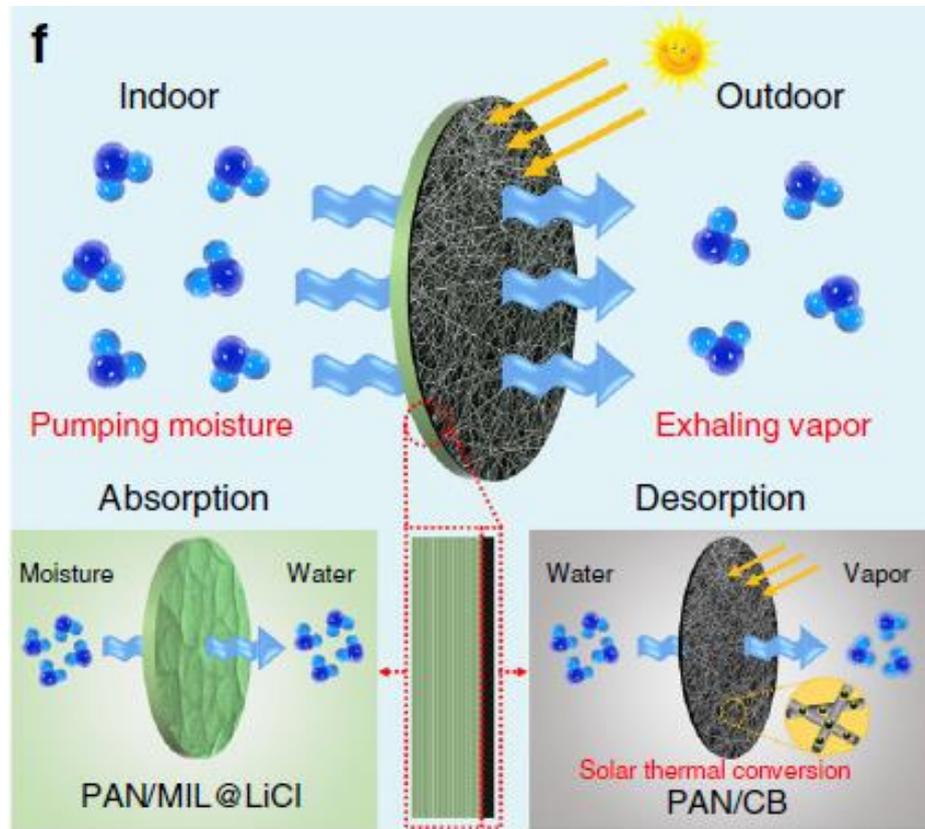


Figura 25 Principio de funcionamiento de la doble capa biomimética [43]

En resumen, la fabricación comenzó con el electrohilado<sup>7</sup> del panel (PAN/MIL) NFM que más tarde fue impregnado de la solución LiCl para obtener (PAN/Mil@licl) NFM.<sup>[43]</sup> Posteriormente, las nanofibras del panel (PAN/CB) se han electrohilado en el sustrato nanofibroso (PAN/Mil@licl) NFM para constituir así la doble capa biomimética (PML-PC) NFM. A continuación, se muestra un esquema sintético de este proceso.<sup>[43]</sup>

<sup>7</sup> En la industria de los polímeros, es un proceso que permite obtener filamentos continuos de material sintético con un diámetro inferior al micrón. Las fibras así obtenidas son tan finas que permiten la producción de materiales con una elevada relación superficie/volumen y una elevada porosidad.



Figura 26: Esquema de montaje de la doble capa biomimética [43]

Específicamente la capa de secado muestra una capacidad de absorción de humedad sin precedentes de  $3.01 \text{ g g}^{-1}$  a 90% de Humedad Relativa, una rápida absorción y velocidad de transporte, permitiendo así la recogida del agua atmosférica.<sup>[43]</sup> La capa fotométrica, en cambio, muestra una elevada absorción solar del 93%, una eficiente conversión solar térmica y una buena permeabilidad a la humedad, favoreciendo así la evaporación del agua.<sup>[43]</sup>

Antes de analizar en detalle las características y la morfología de ambas capas del panel, analizaremos más a fondo las potencialidades del material base que compone ambas capas: las estructuras metal-orgánicas (MOF) y las nanofibras (NFM).

## 6.1 Metal Organic Frameworks (MOF)

Los MOF (Metal Organic Frameworks), llamados estructuras metal-orgánicas, son polímeros de coordinación y están constituidos por un retículo cristalino tridimensional compuesto esencialmente por dos iones o clusters metálicos (llamados "node") y por aglutinantes orgánicos (llamados "linkers").<sup>[48]</sup> Tienen la particularidad de ser muy porosos, gracias a la forma en que los clusters inorgánicos y los grupos orgánicos se unen.<sup>[48]</sup> De este modo se obtiene un material que alcanza

un espacio vacío interior del 90% con respecto a su volumen total y a su superficie, que a menudo supera los 5000 m<sup>2</sup>/g.

Los iones metálicos pueden estar constituidos por un solo ion metálico o por clusters polinucleares: SBU (Secondary Building Units). Las SBU, por su unión a través de los enlaces orgánicos, forman una estructura geométrica determinada. El uso de diversos enlaces en la unión del cluster puede generar MOF con diversas propiedades.<sup>[48]</sup>

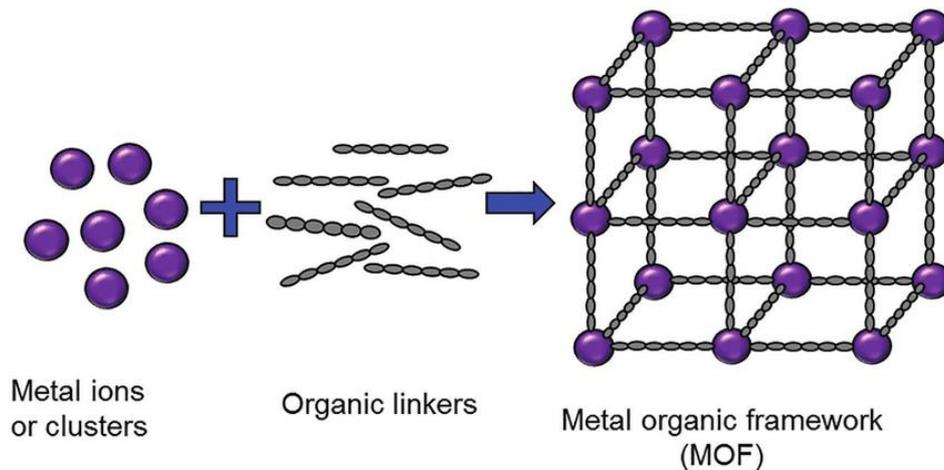


Figura 27 Estructura MOF [49]

Esta característica permite la utilización de este producto en varios ámbitos, como por ejemplo en el almacenamiento de gas, como fuentes adsorbentes, en el diseño de sensores, en procesos de separación química.<sup>[49]</sup> Además, entre sus propiedades fundamentales, más allá de su elevada porosidad, se encuentra una baja densidad, estabilidad térmica y, sobre todo, una regulación de las funciones químicas.<sup>[49]</sup>

## 6.2 Las nanofibras y el electrohilado

Las nanofibras son fibras sólidas finas con diámetros muy pequeños, normalmente del orden de los 100 nanómetros.<sup>[50]</sup> El método de producción es el electrohilado, utilizado en la industria de los polímeros, que permite obtener filamentos continuos de material sintético de diámetro inferior al micrón.<sup>[50]</sup> El electrohilado permite

crear nanofibras poliméricas bajo la guía de un sistema electrostático que permite controlar la disposición de las capas.<sup>[51]</sup> Además, ofrece la posibilidad de crear nanofibras con poros interconectados compuestos tanto por polímeros naturales como sintéticos.

El equipo utilizado para el electrohilado consta esencialmente de cuatro componentes:

1. una bomba
2. una jeringa y una boquilla
3. un generador de tensión
4. colector.<sup>[52]</sup>

La jeringa, que contiene la solución polimérica, está unida a una bomba que empuja la solución, que sale por la boquilla, con una cierta velocidad.<sup>[51]</sup> El generador de tensión produce un campo eléctrico de alto voltaje entre la boquilla y el colector enviando una carga eléctrica a la superficie de la solución.<sup>[51]</sup> A medida que aumenta la intensidad del campo eléctrico, el fluido adquiere una forma cónica y alargada llamada cono de Taylor. Mientras la solución sale de la boquilla, el disolvente de la solución se evapora y las nanofibras se colocan sobre el colector.<sup>[51]</sup>

Es posible obtener fibras de diferentes geometrías utilizando diferentes colectores, con un colector plano se obtienen fibras que tienen una distribución aleatoria,

mientras que utilizando dos colectores planos o un husillo giratorio se obtienen fibras alineadas a lo largo de una determinada dirección.<sup>[52]</sup>

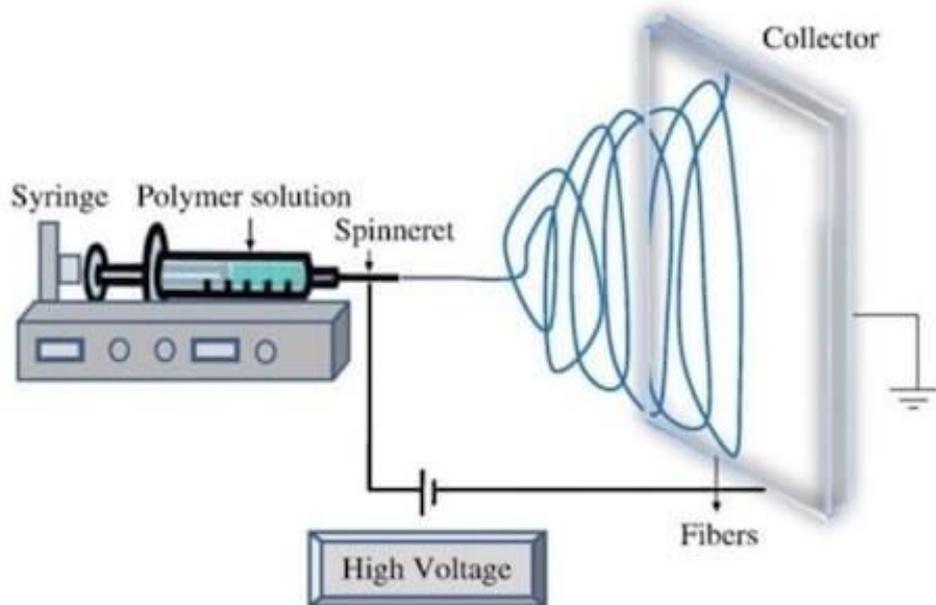


Figura 28 Esquema sintético del proceso de electrohilado [52]

Para la producción de estas nanofibras entran en juego numerosos parámetros, tanto los ligados a la solución polimérica, como la viscosidad, la conductividad eléctrica, la volatilidad del disolvente, el módulo elástico del polímero, como los determinados por las condiciones del proceso, es decir, tensión aplicada, distancia boquilla-colector, diámetro de la boquilla, forma del colector, además de las condiciones ambientales en las que tiene lugar el proceso, precisamente humedad relativa, temperatura y presión.<sup>[50]</sup>

Entre los puntos fuertes de estas estructuras se encuentran: la elevada opacidad, la elevada porosidad y por lo tanto una elevada relación superficie-volumen, baja densidad aparente, gran superficie de cohesión y elevada superficie específica, robustez mecánica y flexibilidad.<sup>[53]</sup> Estas características, unidas a la posibilidad de crear diferentes variedades de nanofibras mediante la modificación de los parámetros analizados anteriormente, permiten el uso de este material en numerosas aplicaciones en diferentes sectores.<sup>[53]</sup>

## 6.3 Puntos fuertes de las membranas nanofibrosas MOF

Teniendo en cuenta el gran potencial de las nanofibras y los MOF, resulta interesante evaluar el efecto combinado de ambos. Numerosos estudios han confirmado que la combinación con materiales poliméricos hace mucho más eficaz el funcionamiento de las estructuras MOF.<sup>[54]</sup> De hecho, el polímero que actúa como aglutinante mejora la flexibilidad mecánica y garantiza una mayor estabilidad química.<sup>[53]</sup> Además, el proceso de electrohilado ha sido evaluado como un enfoque útil para modelar MOF en materiales híbridos con una porosidad multiescala y funcionalidades adicionales.<sup>[53]</sup>

Las nanofibras MOF combinan las ventajas de ambos materiales, por lo tanto, la elevada flexibilidad de la estructura, la ligereza, la elevada relación superficie-volumen, la elevada porosidad y dimensión de los poros variable.<sup>[54]</sup> En particular, la estructura de las nanofibras MOF altamente abierta e interconectada permite el paso de fluidos y por lo tanto el transporte de gases y líquidos, mientras que la matriz polimérica mejora la regeneración del material después de su plegado.<sup>[55]</sup> Esta combinación única de propiedades hace que las estructuras de nanofibras MOF porosas sean muy interesantes en los campos de las aplicaciones energéticas y ambientales.<sup>[56]</sup> Entre los distintos campos de aplicación encontramos especialmente usos como la acumulación y la conversión de energía electroquímica, pero también para la filtración de contaminantes atmosféricos, el tratamiento de las aguas, el almacenamiento y la separación de los gases.<sup>[53]</sup>



Figura 29 Resumen de las aplicaciones de las nanofibras [53]

La producción de nanofibras de polímero MOF puede realizarse de dos maneras: la electrohiladora directa o la "decoración superficial" de las nanofibras con MOF.<sup>[53]</sup>

El primer tipo de producción se lleva a cabo mediante un simple procedimiento en tres fases: síntesis de partículas de polvo MOF, preparación de una suspensión polimérica MOF y electrohilado directo de la suspensión.<sup>[53]</sup> Las partículas MOF se unen a un sistema de polímero-disolvente<sup>8</sup> para formar una suspensión polimérica que se utilizará en el electrohilado, siempre que se garantice la compatibilidad química entre MOF, disolvente y polímero.<sup>[53]</sup>

Las estratificaciones de nanopartículas MOF pueden producirse como estructuras independientes o solapadas en diferentes sustratos según el ámbito de aplicación del material.<sup>[53]</sup> Además, el diámetro de las nanofibras MOF, la porosidad y el tamaño de los poros pueden controlarse optimizando el proceso de electrohilado, como la tensión eléctrica aplicada y la velocidad de flujo, obteniendo nanofibras MOF con diferentes microestructuras.<sup>[53]</sup> En la siguiente imagen se puede observar cómo las diversas combinaciones de MOF y polímeros y parámetros de electrohilado generan nanofibras MOF con características diferentes.<sup>[53]</sup>

<sup>8</sup> Se han identificado varios sistemas de polímero-disolvente, como el poliestireno (PS) en tetrahidrofurano (THF), el PVP en etanol (Etoh) y el poliacrilonitrilo (PAN) en dimetilformamida (DMF).

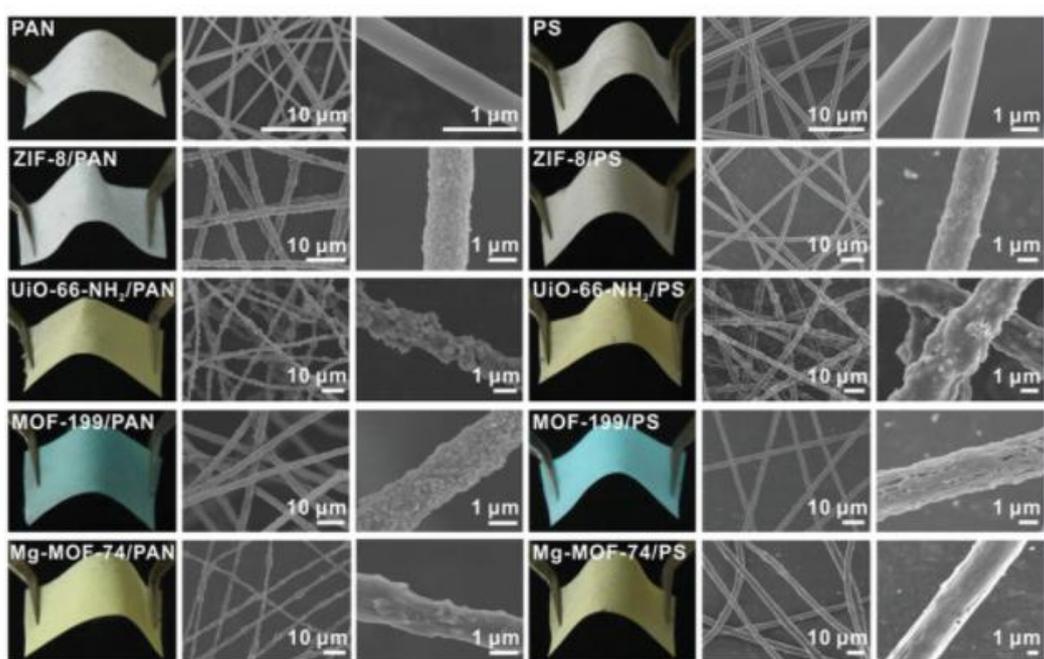


Figura 30 Electrohilado de diferentes tipos de NFM MOF para difernets [53]

El otro método, la "decoloración de la superficie" de las nanofibras con MOF, prevé el crecimiento de nanopartículas MOF en la superficie de las nanofibras (anteriormente producidas por electrohilado). "Hay diferentes procesos de mecanizado para la aplicación del crecimiento in situ de las estructuras MOF en la superficie de las nanopartículas:

- los cristales MOF se incorporan a las nanofibras poliméricas durante el electrohilado y el crecimiento de los MOF se realiza por inmersión de las nanofibras en la solución precursora MOF.
- los componentes del MOF se añaden a la matriz de polímeros por electrohilado y la cristalización del MOF se realiza por inmersión de la nanofibra de polímero precursor y otra solución.
- en el crecimiento solvo directo o hidrotermal, un MOF se cultiva directamente en la superficie de una nanofibra polimérica mediante la inmersión en una solución precursora MOF (ion metálico y ligando orgánico en un disolvente). La nanofibra polimérica generalmente tiene que ser activado para el crecimiento in situ por un pretratamiento superficial

*de la nanofibra para obtener un apego suficiente. La aplicación de precursores MOF puede realizarse en un solo paso (iones metálicos y ligando orgánico) o en una secuencia.”).*<sup>[53]</sup>

En general, aparte del método de uso para el desarrollo de la nanofibra MOF, estos materiales son aplicables en varios campos de investigación debido a sus propiedades de alto rendimiento.

En nuestro caso de estudio, han resultado indispensables para el desarrollo de esta membrana desecante con una estructura altamente porosa, su permeabilidad y con un elevado número de "lugares activos" para la absorción de humedad relativa en interiores o para la recogida de agua del exterior.

Veamos en detalle las potencialidades de las dos capas que componen la doble capa biomimética (descrita brevemente en los párrafos anteriores), compuesta por una membrana electrohilado de nanofibras MOF utilizada para deshumidificar los ambientes interiores bajo energía solar mediante la absorción de la humedad, el paso por ella y la evaporación del agua absorbida gracias a su eficiente conversión solar térmica.

## 6.4 Capa desecante PAN MIL @ LiCl NFM

La morfología de partida es la del panel biomimético PAN /MIL NFM, cuya estructura se puede observar en la imagen siguiente.

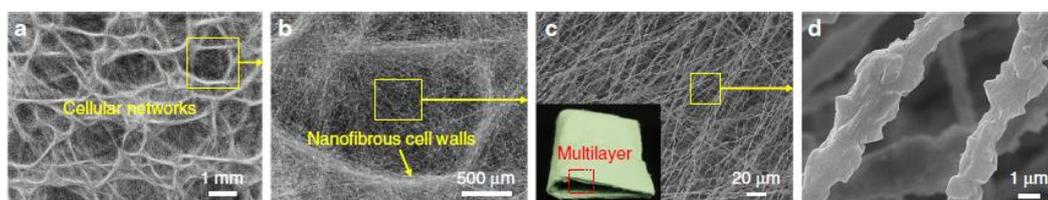


Figura 31 Morfología PAN/MIL NFM [43]

El proceso de fabricación del panel se realizó a través del siguiente desarrollo: "*PAN / MIL NFM fue fabricado mediante técnica de electrohilado. En resumen, el 22%*

*en peso de nanopartículas MIL-101 (Cr) se ha añadido en DMF y luego se dispersa bajo tratamiento ultrasónico durante 2 horas. A continuación, se añadió un 8% en peso de PAN a la solución anterior con agitación magnética. La solución mezclada se agitó vigorosamente durante 12 horas. PAN / MIL NFM se preparó a través de una máquina de electrohilado DXES-3 (Shanghai Oriental Flying Nanotechnology Co., Ltd, China). La solución PAN / MIL se ha cargado en jeringas de plástico y se ha mantenido la distancia del rodillo de 15 cm. La velocidad de alimentación de  $1 \text{ ml h}^{-1}$  y una tensión estable de 16 kV se han aplicado y el proceso de hilado duró 3 horas. La temperatura ambiente y el UR se mantuvieron respectivamente a  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $46 \pm 3\%$ . Por último, el PAN / MIL NFM verde claro así preparado con una estructura reticular multicapa similar a la madera se ha secado a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  al vacío."*

[43]

El uso del electrohilado ha permitido crear una estructura celular ordenada compuesta de células unitarias, con paredes celulares de nanofibras interconectadas y alineadas uniformemente yendo a imitar la estructura de la madera a lo largo de la dirección horizontal y vertical.<sup>[43]</sup> El mecanismo de ensamblaje de esta estructura fue posible gracias a la tensión superficial y a la fuerza repulsiva de las nanofibras ensambladas en húmedo, que llevó a los distintos clusters de las nanofibras a fusionarse y doblarse en un patrón ordenado formando una estructura de tres ramas, que luego se ensambló hasta formar una multicapa tridimensional.<sup>[43]</sup>

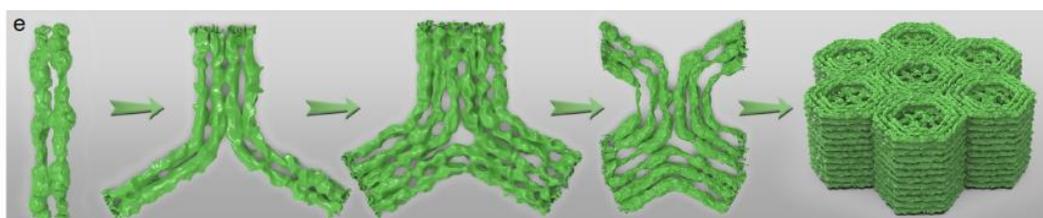


Figura 32 Estructura tridimensional multicapa [43]

El aumento de la conductividad ha sido posible gracias a la adición de MIL-101 (Cr) a la solución inicial que, junto con la formación de pequeños campos microelectrónicos diferenciales y la evaporación del disolvente, ha formado estas redes celulares con la forma antes descrita.<sup>[57]</sup>

El electrohilado ha permitido seguramente la creación de un material con una gran capacidad de absorción y desorción de la humedad, pero las partículas MIL-101 (Cr) han reducido la capacidad de deshumidificación. Por lo tanto, para mejorar la sensibilidad del panel a la humedad, fue cargado de LiCl que es muy sensible a la humedad.<sup>[58]</sup> La estructura en el NFM MOF ha sido de soporte para el estacionamiento del LiCl que ha permitido mantener las capacidades de absorción de la humedad típicas de los secadores a pesar de la probable precipitación de la sal y la presencia de posibles aglomeraciones (pueden utilizarse soluciones diluidas de LiCl para resolver este problema).<sup>[43]</sup>

Así pues, la compresión de las nanopartículas, de los MOF y del LiCl ha permitido diseñar el secador PAN / MIL-101(Cr) @ LiCl, abreviado en PAN / MIL @ LiCl NFM, que conserva su elevada flexibilidad para un espesor de aproximadamente 980 $\mu\text{m}$ .<sup>[43]</sup>

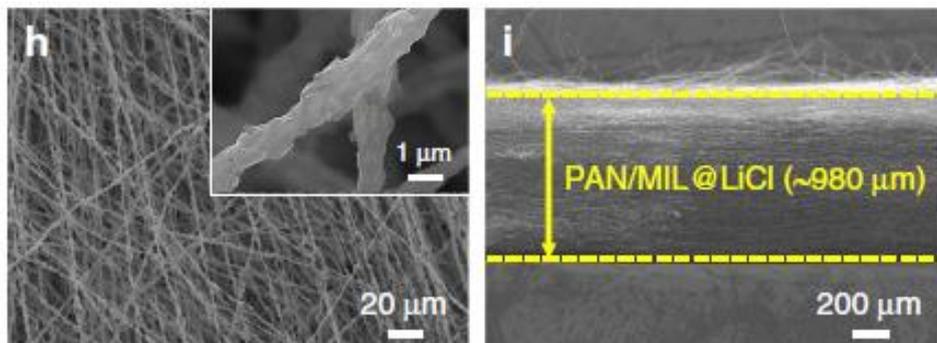


Figura 33 Estructura de las nanofibras y tamaño [43]

Las características que hacen de este material un secado excelente son sin duda su elevada higroscopicidad y reciclabilidad y altas tasas de absorción y desorción de la humedad.

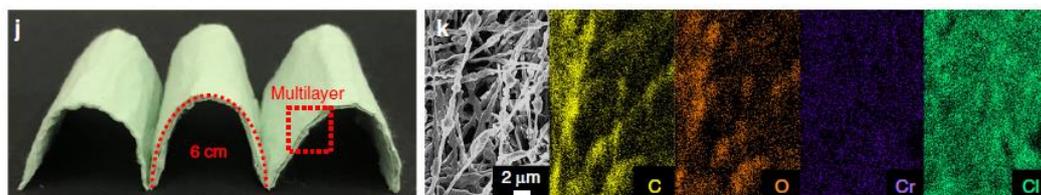


Figura 34 Flexibilidad [43]

Se han realizado análisis y se ha comprobado que todas las isothermas no muestran ciclos de histéresis. La rápida absorción de la humedad se explica analizando los microporos del material. En efecto, del gráfico que indica la distribución de los poros se desprende que las dimensiones de los microporos eran aproximadamente 0.40-0.75 nm, por lo tanto, más grandes que el diámetro cinético de las moléculas de agua, que es aproximadamente 0.27-0.32 nm.<sup>[43]</sup> También se ha observado que la superficie específica ha disminuido tras la adición de LiCl, lo que permite comprender que esto ha bloqueado algunos poros.<sup>[43]</sup>

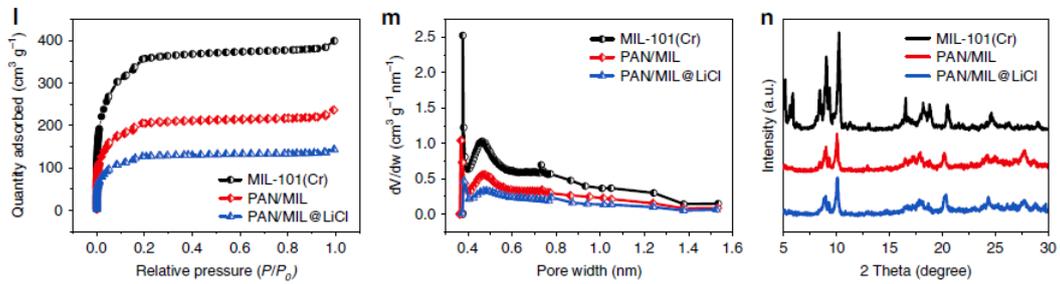


Figura 35 Diagramas para el análisis de los microporos y la absorción [43]

## 6.4.1 Absorción de la humedad del panel

El comportamiento absorbente de PAN / MIL @ LiCl NFM secado se ha estudiado con condiciones ambientales de temperatura de 25 °C y diferentes niveles de humedad relativa en particular:

- UR=60% absorción de humedad igual a 1.03 g g<sup>-1</sup>,
- UR=70% absorción de humedad igual a 1.64 g g<sup>-1</sup>,
- UR=80% absorción de humedad igual a 2.72 g g<sup>-1</sup>,
- UR=90% absorción de humedad igual a 3.01 g g<sup>-1</sup>.<sup>[43]</sup>

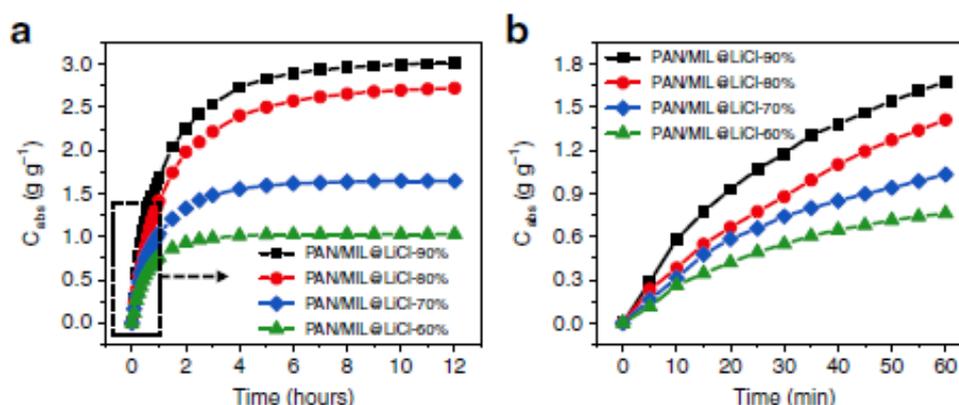


Figura 36 Diagramas para el análisis del comportamiento absorbente [43]

Con el aumento de la humedad relativa, el contenido de agua absorbida y el tiempo útil se incrementan gradualmente. Por lo tanto, se nota que esta capa desecante es súper higroscópica y cómo la estructura nanoporosa ha aumentado vertiginosamente la absorción de humedad y su velocidad de transporte.<sup>[43]</sup> Además, el consumo de energía es prácticamente irrisorio y para mantenerlo es necesario realizar una deshumidificación continua de los ambientes.<sup>[43]</sup>

Comparando el panel objeto de examen con un panel PAN @LiCl (sin la adición de MOF MIL-101 (Cr)) y comparando su capacidad de absorción aparece inmediatamente claro en el gráfico siguiente como PAN / MIL @ LiCl tiene una capacidad absorbente netamente superior a la de PAN @ LiCl.<sup>[43]</sup> Esto confirma lo esencial que es la combinación de las nanofibras con las estructuras MOF. Se

observa que al 70% de UR la absorción de PAN / MIL @ LiCl NFM ha mantenido el 99,4% de su capacidad absorbente inicial.<sup>[43]</sup>

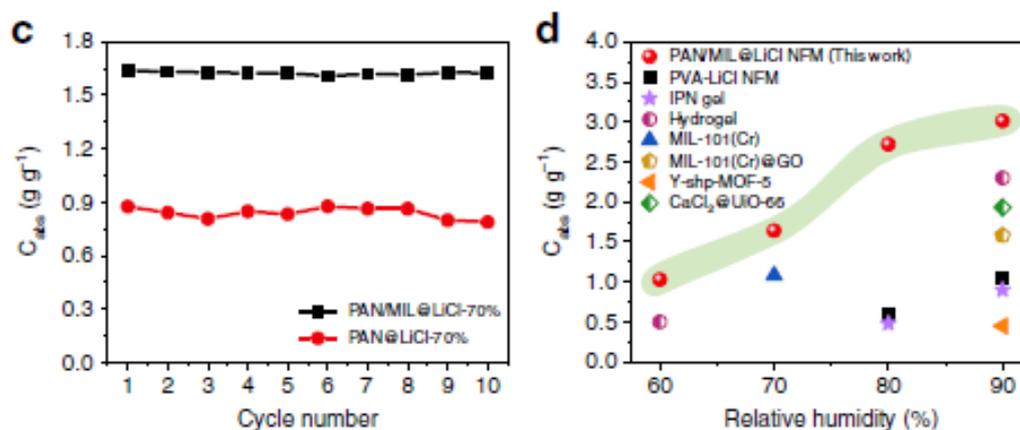


Figura 37 Análisis de la absorción de PAN @LiCl y como PAN / MIL @ LiCl (Yufei Zhang, et al, 2020)

En comparación con otros secadores PAN / MIL @ LiCl NFM ha mostrado una absorción sin precedentes en comparación, por ejemplo, con otros desecantes sólidos granulados. Por lo tanto, se puede utilizar en casos prácticos y a temperatura ambiente.



Figura 38 Absorción y transpiración del agua [43]

En la figura 37 se colocó el desecante en un ambiente con 90% de humedad relativa y temperatura de 25 °C, la absorción fue muy rápida, después de 3 minutos el panel comenzó a cambiar de color precisamente por la presencia de agua en su interior, mientras después de 3 horas, el agua empezó a gotear y apareció después de 6 horas. En el siguiente esquema se resume el comportamiento absorbente de la humedad y de trasudación del agua de PAN / MIL @ LiCl NFM.<sup>[43]</sup>

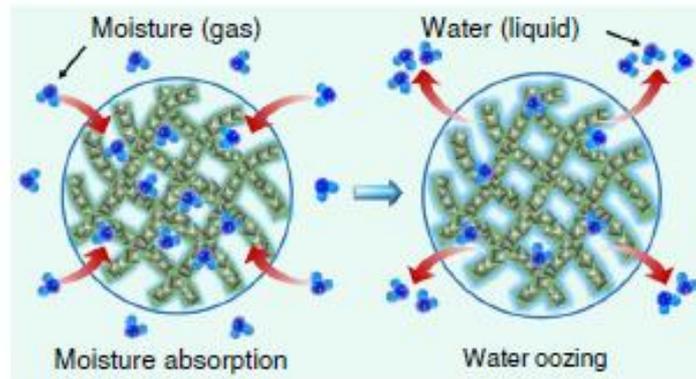


Figura 39 Paso del agua del estado gaseoso al líquido [43]

Gracias a su gran higroscopicidad y a su porosidad, las moléculas de agua han sido absorbidas por la humedad, transformando así el agua desde el estado gaseoso al estado líquido y permitiendo su permanencia en el interior del panel, todo sin consumo de energía aprovechando sólo el calor latente de evaporación y condensación.<sup>[43]</sup>

Las moléculas de agua existentes en el aire han sido absorbidas químicamente en los sitios activos de las NFM formando grupos hidroxilos por disociación, en un segundo momento estos grupos absorbieron moléculas de agua a través de dobles enlaces al hidrógeno yendo a formar una primera capa de absorción. Al final del proceso, la contención de las moléculas de agua ha alcanzado la saturación provocando el goteo del agua.<sup>[43]</sup>

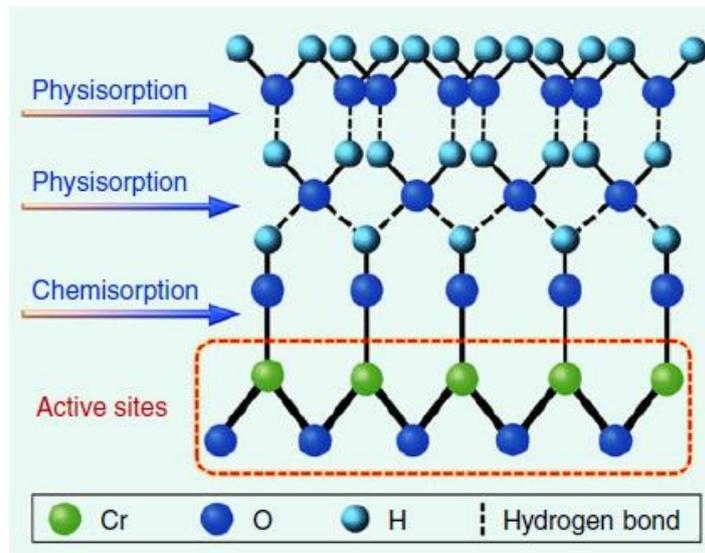


Figura 40 Proceso de absorción de agua [43]

Otro aspecto de gran interés es que el monocapa PAN / MIL @ LiCl NFM bajo la luz solar natural se secó en 1 minuto, eso va a confirmar su alta permeabilidad y velocidad de evaporación bajo la acción del sol.<sup>[43]</sup>

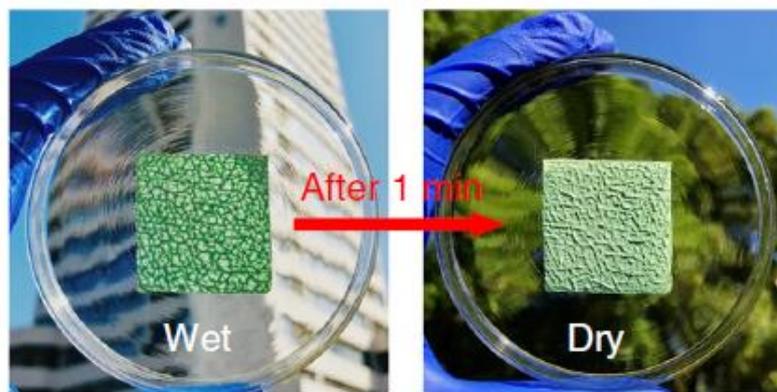


Figura 41 Deseccación del panel bajo irradiación solar (Yufei Zhang, et al, 2020)

Esto confirma hasta qué punto la aplicación de PAN / MIL @ LiCl NFM puede abrir grandes posibilidades en el campo de la eficiencia térmica y de la conversión del agua.

## 6.5 Capa fotométrica PAN / CB NFM

Por lo tanto, una vez creado el panel que se ocupa de la absorción de las moléculas de agua del aire húmedo transformándolas del estado gaseoso al estado líquido, es necesario prever la evaporación del vapor de agua bajo la iluminación solar.

A continuación, se fabricó otro panel para esta función, el proceso de producción se desarrolló de la siguiente manera: “PAN / CB NFM se preparó mediante la técnica de electrohilado. En resumen, el 6% en peso de nanopartículas CB se ha añadido en DMF y luego se dispersa por ultrasonido durante 1 hora. A continuación, se añadió un 10% en peso de PAN a la solución anterior. La solución mezclada se agitó vigorosamente durante 12 horas. Posteriormente, se aplicó la máquina de electrohilado y la solución PAN / CB se transfirió en cinco jeringas de plástico y se mantuvo la distancia entre los rodillos de la punta de 15 cm. Se aplicó la velocidad de alimentación de  $1 \text{ mL h}^{-1}$  y una tensión estable de 20 kV y el proceso de hilado duró 6 horas. El PAN / CB NFM así preparado fue depositado en un rodillo recubierto de papel brillante. Además, la temperatura ambiente y la humedad relativa eran  $23 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $46 \pm 3\%$ , respectivamente. Por último, el PAN / CB NFM negro se ha secado al vacío a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ .”<sup>[43]</sup>

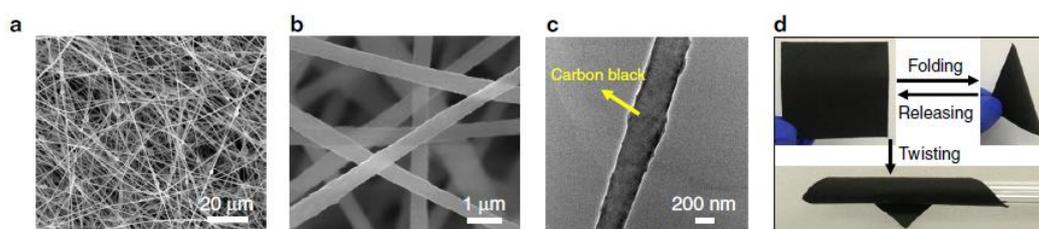


Figura 42 Estructura de la capa fotométrica [43]

Como se puede observar, la capa fotométrica de aproximadamente  $180 \mu\text{m}$  está formada por redes de nanofibras muy porosas, como la capa anterior, a las que se han añadido nanopartículas CB para formar una superficie rugosa.<sup>[43]</sup> De este modo, se ha mejorado considerablemente la difusión de la luz en la capa, mejorando así la absorción de la radiación solar y creando menos dispersión del calor dentro del panel para favorecer una evaporación eficaz del agua acumulada.

PAN / CB NFM presenta una absorción solar del 93% dentro de una amplitud de onda que varía de 250 a 2500 nm en un espectro solar estándar (AM1,5G), muy superior al panel sin la adición de nanofibras de carbono.<sup>[43]</sup>

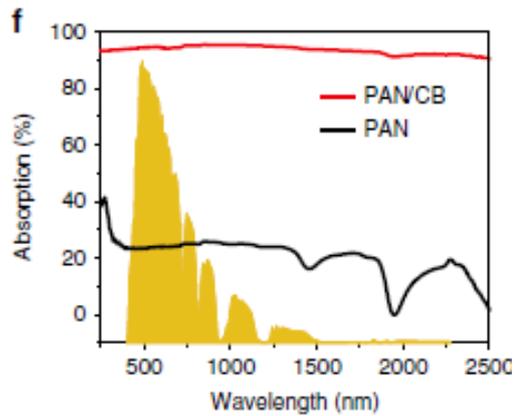


Figura 43 Absorción solar [43]

## 6.6 Doble capa biomimética PML-PC NFM

La capa fotométrica conduce a la formación de un panel con características y prestaciones sin precedentes. El proceso de fabricación del doble panel biomimético fue el siguiente: *“Preparación de la solución PAN / CB y ajuste de los parámetros de hilado de PAN / CB NFM como se describe en el párrafo anterior. De lo contrario, el PAN / MIL @ LiCl NFM biomimético fue cubierto en el rodillo metálico conectado a tierra para la electrohilado de PAN / CB. Después de 6 horas, la doble capa NFM obtenida se ha secado a 100 °C durante 2 horas al vacío. Por último, la doble capa PAN / MIL @ LiCl-PAN / CB NFM preparado se conoce como PML-PC NFM de doble capa.”* <sup>[43]</sup>



Figura 43 Funcionamiento de la doble capa biomimética [43]

En la figura 44 se puede observar el funcionamiento de la doble capa biomimética, el transporte y la evaporación de la humedad a través de PML-PC NFM bajo irradiación solar.

Por lo tanto, tanto la capa desecante como la fotométrica tienen una buena permeabilidad a la humedad, y en general la doble capa presenta un excelente aislamiento térmico. Bajo irradiación de baja intensidad, presenta una conversión solar que favorece la evaporación del agua mediante energía solar. Esta última función, fundamental para el proceso de deshumidificación, se ha confirmado registrando las temperaturas superficiales de PML-PC NFM y PAN / MIL @ LiCl NFM bajo iluminación solar con una cámara de infrarrojos con una temperatura inicial igual a 20,5 °C. La temperatura superficial de PML-PC NFM después de 60 minutos alcanzó una temperatura de 74,3 °C.<sup>[43]</sup>

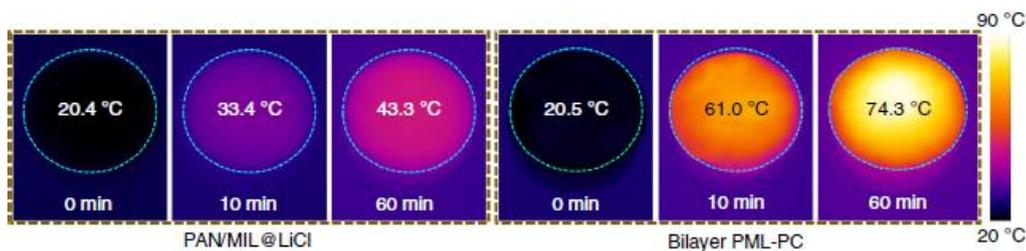


Figura 44 Temperatura bajo iluminación solar [43]

Para estudiar en cambio las prestaciones de evaporación, se han cuantificado las pérdidas de masa acumuladas siempre de PML-PC NFM y PAN / MIL @ LiCl NFM bajo irradiación solar de 1 kWm<sup>-2</sup>. La pérdida de masa fue lineal durante los

primeros 10 minutos, pero PML-PC NFM mostró después de sólo 20 minutos una tasa de evaporación de  $1.47 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .<sup>[43]</sup>

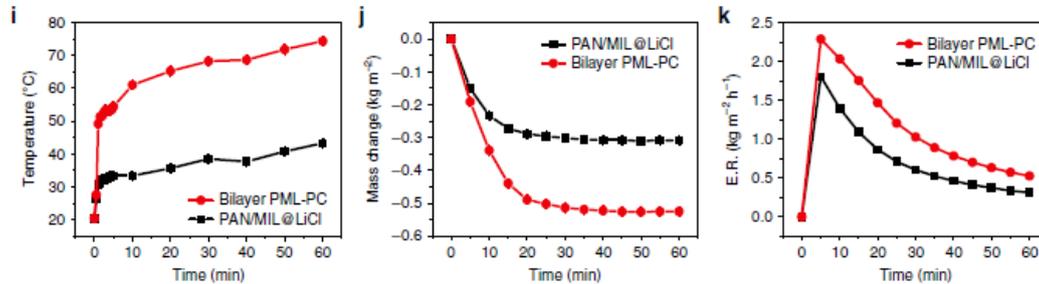


Figura 45 Diagramas para el estudio de la evaporación del agua [43]

## 6.6.1 Posible aplicación de la doble capa biomimética PML-PC NFM

La flexibilidad de PML-PC NFM hace que el panel sea útil para aplicaciones ambientales. Además, el electrohilado permite fabricar la doble capa para un área de 70x40 cm y un espesor mínimo de aproximadamente 1160  $\mu\text{m}$ .<sup>[43]</sup>

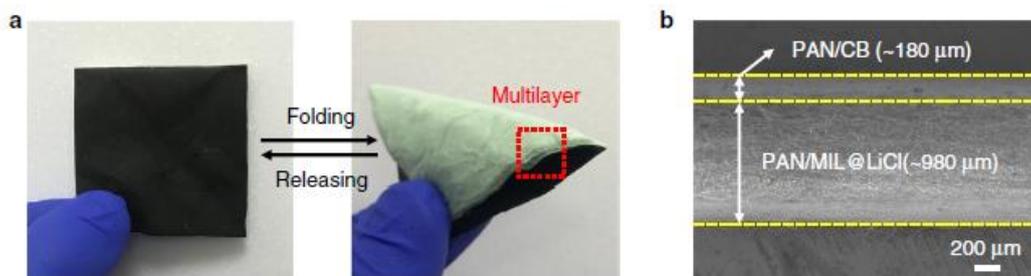


Figura 46 Tamaño y flexibilidad de la doble capa biomimética [43]

Una aplicación interesante es utilizar este panel para la deshumidificación interna de los ambientes. Ha sido probado creando un modelo a escala reducida de una habitación de dimensiones 40x50x40 cm y una ventana de 6x6 cm diseñada para instalar la doble capa biomimética.<sup>[43]</sup> El modelo fue irradiado a través de un simulador solar. Se puede observar en el diagrama de la figura 48 el transporte activo de la humedad de un ambiente de alta humedad a uno con media o alta humedad a través del panel biomimético irradiado por los rayos solares.<sup>[43]</sup>

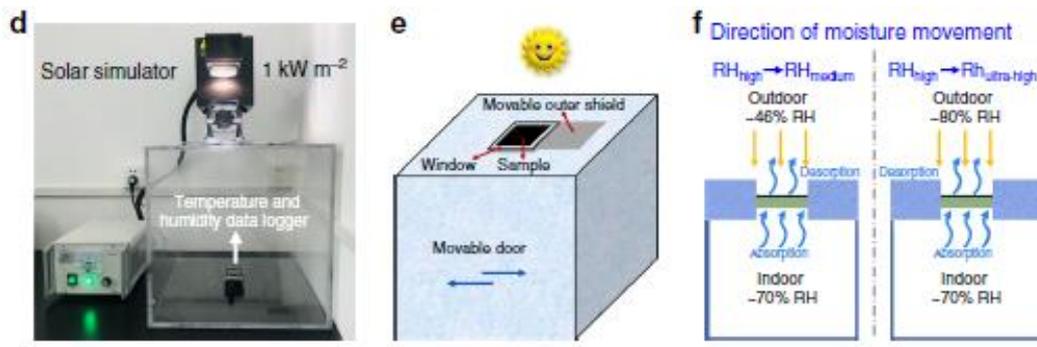


Figura 47 Uso de la doble capa como bomba de humedad [43]

Otros análisis se han realizado variando la humedad externa y manteniendo la interna al 70% y comparando los efectos de la deshumidificación entre la doble capa biomimética y la única capa desecante.<sup>[43]</sup>

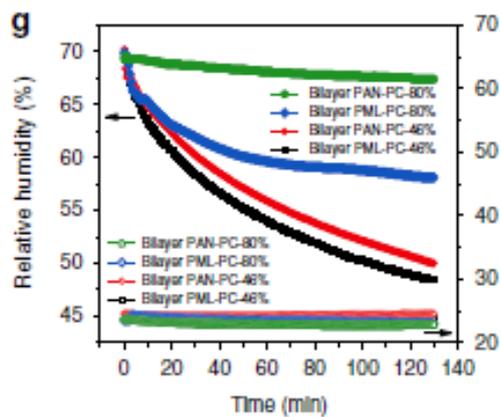


Figura 48 Diagrama para evaluar la reducción de la humedad relativa [43]

En sólo dos horas la humedad relativa interna, utilizando la doble capa biomimética, ha pasado del 70 al 58,3%.<sup>[43]</sup> Es importante destacar que la temperatura del ambiente interno ha permanecido casi constante a pesar de los efectos del calor de adsorción. Utilizando la bomba de humedad PML-PC NFM fue posible devolver la humedad interior a los valores de confort (40-60%) independientemente de la humedad del ambiente exterior.<sup>[43]</sup>

## 6.6.2 Ventajas de la doble capa biomimética PML-PC NFM

Ambas capas del panel tienen requisitos importantes para el efecto final del panel. La capa desecante, combinando el efecto de MIL-101 (Cr) y LiCl, ha obtenido una excelente higroscopicidad y capacidad de absorción y desorción de la humedad. Mientras que la capa fotométrica permitió la conversión térmica y la evaporación de las moléculas de agua.

La posibilidad de transformar el agua de estado gaseoso a estado líquido puede permitir el desarrollo de desecantes y bombas de humedad con un bajo contenido energético y una gran reciclabilidad.

Estas características se pueden utilizar en varios campos y entre las aplicaciones más interesantes encontramos la utilización de la capa desecante como posible filtro de recogida de agua atmosférica o como una ventana inteligente permeable a la humedad.

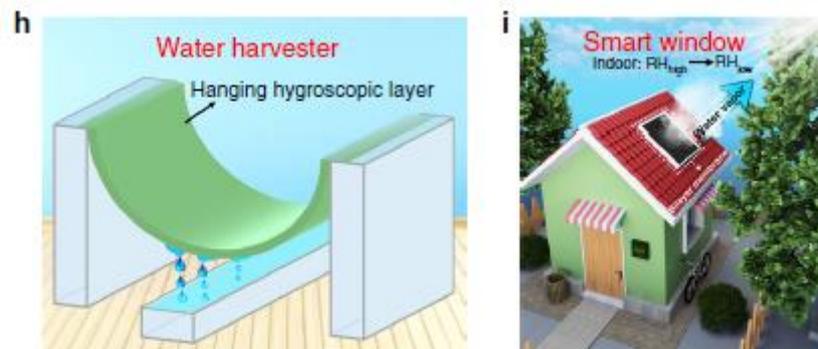


Figura 49 Escenarios de uso futuros [43]

## 7. Caso de estudio

Luego de un análisis detallado de las características y el gran potencial del panel, se eligió el método de aplicación de este último para comprender directamente si su uso puede ser realmente ventajoso para la deshumidificación de las estancias y al mismo tiempo contribuir al ahorro energético, a la mejora del confort interno y a la reducción del impacto ambiental.

### 7.1 Descripción de la construcción del modelo de aplicación

En primer lugar, se ha elegido el modelo de referencia para realizar las encuestas y construyéndolo dentro del software WUFI PLUS. Teniendo en cuenta los análisis experimentales realizados sobre el panel y sus capacidades, se ha decidido simular su funcionamiento sobre un modelo habitación.

Como primer paso se ha definido la geometría de la habitación con dimensiones en planta de 5x5m y de altura 3m, techo plano y base que se apoya sobre el terreno. En esta sección es posible también asignar la orientación de la fachada principal y se ha atribuido según las direcciones cardinales primero hacia Sur luego hacia Oeste y Este.

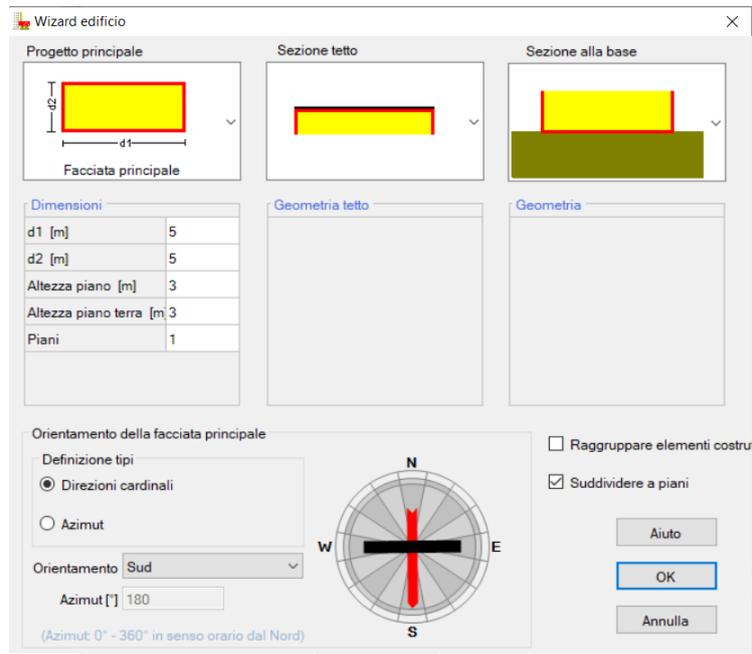


Figura 50 Definición de la geometría y la exposición

De esta manera se pudo visualizar inmediatamente, en la sección 3D, el modelo creado.

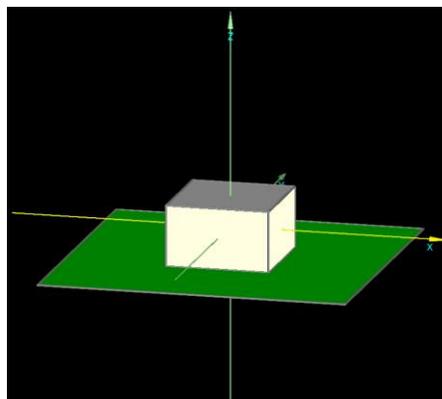


Figura 51 Geometría básica del modelo

Una vez definida la geometría se ha localizado geográficamente el edificio y luego se han incluido las características climáticas del lugar elegido. Hay dos formas de introducir datos climáticos. El primero es a partir de la base de datos de clima WUFI que presenta en su interior los datos climáticos de ciudades importantes de todo el mundo. La segunda, utilizada para este trabajo, es mediante la inserción de archivos

climáticos wbc<sup>9</sup>, algunos de estos ya presentes dentro del software y fue elegido localizarlo en la ciudad metropolitana de Bari.

Asignación de la zona interior como zona de simulación, se han definido las características de los componentes del modelo. Es necesario aclarar que, para respetar lo que son las transmitancias límite de los componentes de construcción en Italia, las estratigrafías de todas las estructuras opacas verticales y horizontales y de las superficies acristaladas han sido seleccionadas dentro de la base de datos de WUFI seleccionando aquellas con una transmitancia menor que el límite admisible definido por la normativa. Por lo tanto, según el apéndice A de la Orden Ministerial de 26 de junio de 2015 "Aplicación de las metodologías de cálculo del rendimiento energético y definición de los requisitos y requisitos mínimos de los edificios" que define, en función de las diferentes zonas climáticas en las que está situado el edificio, los niveles máximos de transmitancia que deben poseer los componentes de los edificios.

la ciudad de Bari vuelve a entrar en la zona climática de tipo C, en las imágenes siguientes se pondrán de relieve los valores de transmitancia máximos admisibles de los componentes de los edificios según el Decreto ministerial del 26 de junio de 2015.

---

<sup>9</sup> La extensión del nombre del archivo .wbc es conocida principalmente por su asociación con el tipo de archivo Webshots Collection (.wbc). permite a los usuarios compartir, organizar y ver las imágenes; contiene una colección de .JPEG de imágenes almacenadas en un formato propietario; utilizado para organizar múltiples imágenes en una sola colección; a menudo contienen datos cifrados.

<b>Zona climatica</b>	<b>U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	
	<b>2015<sup>(1)</sup></b>	<b>2019/2021<sup>(2)</sup></b>
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabla 3 Transmitancia térmica U de las estructuras opacas verticales, hacia el exterior, los ambientes no climatizados o contra tierra [33]

<b>Zona climatica</b>	<b>U (W/m<sup>2</sup>K)</b>	
	<b>2015<sup>(1)</sup></b>	<b>2019/2021<sup>(2)</sup></b>
A e B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

Tabla 4 Transmitancia térmica U de las estructuras opacas horizontales o inclinadas de cobertura hacia el exterior y los ambientes no climatizados [33]

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2019/2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,46	0,44
C	0,40	0,38
D	0,32	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabla 5 Transmitancia térmica U de las opacas horizontales de suelo, hacia el exterior, los ambientes no climatizados o contra tierra [33]

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2019/2021 <sup>(2)</sup>
A e B	3,20	3,00
C	2,40	2,20
D	2,00	1,80
E	1,80	1,40
F	1,50	1,10

Tabla 6 Transmitancia térmica U de los cierres técnicos transparentes y opacos y de los contenedores, incluidos los marcos, hacia el exterior y hacia ambientes no climatizados [33]

Para las estructuras opacas horizontales superiores se ha elegido una estratigrafía con transmitancia térmica igual a 0,181 W/m<sup>2</sup>K y un espesor total de 28,8 m. A partir del exterior hacia el interior, los elementos que componen este componente son:

- capa impermeable
- panel aislante mineral
- panel de coníferas
- barrera de vapor
- capa de aire
- panel aislante de fibra de madera

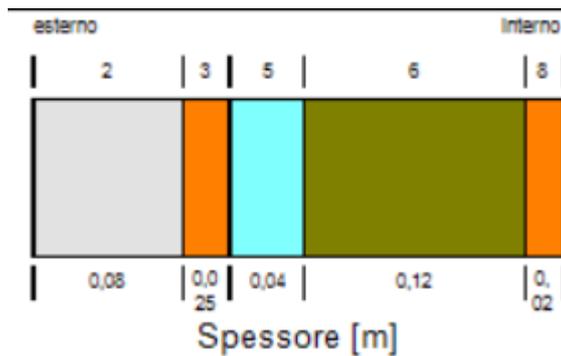


Figura 52 Estratigrafía de la estructura horizontal superior

En cambio, las estructuras opacas verticales tienen una transmitancia térmica de  $0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$  y un espesor de  $20,6 \text{ m}$  y desde el exterior hacia el interior presenta la siguiente estratigrafía:

- revestimiento de abeto rojo
- capa de aire
- capa impermeable
- panel de lana mineral
- membrana de polietileno
- yeso

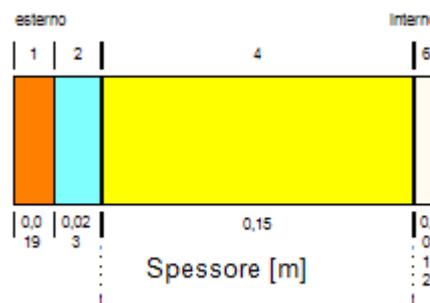


Figura 53 Estratigrafía de la estructura vertical

Por último, se ha elegido la composición de la estratigrafía de las estructuras opacas horizontales inferiores que posee una transmitancia térmica igual a  $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$  y un espesor total de  $27,1 \text{ m}$ . Partiendo desde el exterior hacia el interior, los elementos que la componen son los siguientes:

- hormigón
- panel de lana mineral
- barrera de vapor
- 3 capas de hormigón para la definición de la solera.

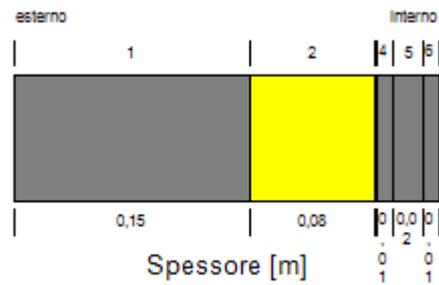


Figura 54 Estratigrafía de la estructura horizontal inferior

A continuación, se definieron las superficies acristaladas. Se ha colocado una abertura de ventanilla igual a 1/8 de la superficie interna expuesta al Sur, para obtener el mayor aporte solar. Esta porción tiene un tamaño de 1,48x2,1m y se ha elegido un triple acristalamiento que tiene una transmitancia de 1,76 W/m<sup>2</sup>K.

El último elemento introducido fue el panel PML-PC NFM. Como se explica en el capítulo anterior, el panel ha sido probado en el laboratorio, y se ha instalado dentro de una ventana diseñada para insertar el panel, de modo que funcione como una protección solar móvil sobre él.

Dentro del software no fue posible construir una estructura de este tipo, por lo que se construyó una superficie ventana adyacente a la anterior y de su tamaño. La superficie interior transparente ha sido sustituida por una superficie opaca que permite insertar la doble capa biomimética dentro de este elemento.

Una vez configurados estos parámetros, para la inserción del panel en el interior del componente se ha definido la estratigrafía.

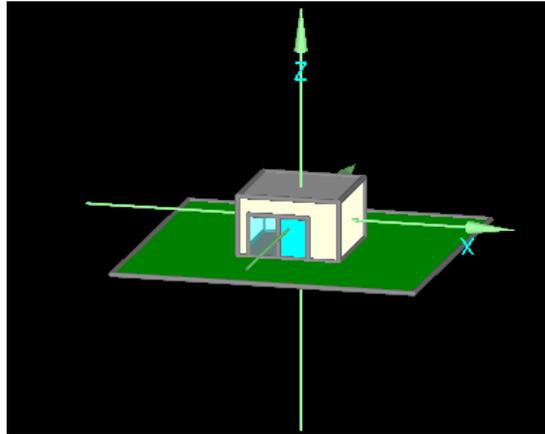


Figura 55 Geometría completa del modelo básico

A partir de los datos bibliográficos recogidos durante la fase de investigación, se ha creado la doble capa PML-PC NFM, incluyendo, dentro de la base de datos de materiales de WUFI PLUS, las dos capas que la componen.

Los datos introducidos en el software se recogieron a partir de los proporcionados por el artículo científico y analizando las características fundamentales de cada estrato, por lo tanto, la elevada porosidad, el comportamiento similar al de las estructuras leñosas, las características de los elementos utilizados para mejorar el comportamiento, primero absorbente y luego desecante, de la doble capa biomimética.

A la capa desecante, PAN/MIL @ LiCl, que tiene un espesor de 0,001m, se le han atribuido, dentro del software, las siguientes características:

Parametri base	
Densità a secco [kg/m³]	32
Porosità [-]	0.9
Inerzia termica edificio [J/kgK]	2400
Conducibilità termica, secco, 10°C/50°F [W/mK]	0.04
Coefficiente di resistenza alla diffusione di v	8
Valori aggiuntivi	
Contenuto d'umidità tipica del materiale [kg/kg]	500
Colore	

Figura 56 Parámetros básicos del arranque desecante

Mientras que, a la capa fotométrica, PAN/CB, de espesor 0,0002m, se le dieron los siguientes parámetros:

Parametri base	
Densità a secco [kg/m³]	32
Porosità [-]	0.9
Inerzia termica edificio [J/kgK]	2400
Conducibilità termica, secco, 10°C/50°F [W/mK]	200
Coefficiente di resistenza alla diffusione di v	8
Valori aggiuntivi	
Contenuto d'umidità tipica del materiale [kg]	500
Colore	

Figura 57 Parámetros básicos de la capa fotométrica

El único valor que se ha atribuido de forma diferente en las dos capas es la conductividad térmica que en la capa fotométrica resulta claramente superior a la de la capa desecante, por la adición de carbón negro que permite una mayor absorción solar.

Insertado los parámetros básicos del panel y asignado los espesores, el software devuelve el cálculo de la resistencia térmica y de la transmitancia del panel que son respectivamente: 0,025 m²K/W e 5,128 W/m²K. El valor de la transmitancia es claramente elevado, pero hay que tener en cuenta que la función del panel es la de una membrana que absorbe humedad y la libera hacia el exterior y no la de una superficie de ventanilla ni la de una envolvente de edificio, por lo tanto, no se tiene en cuenta su contribución en este sentido.

En la sección relativa a las condiciones iniciales del panel se ha colocado como temperatura inicial la de 20,5 °C y una absorción solar del 93% de la capa exterior.

Antes de realizar las simulaciones, se introdujeron las condiciones internas iniciales de la habitación, partiendo de una temperatura de 20 °C y una humedad relativa del 70%. Y para hacer la situación tan similar al comportamiento real de una habitación, las superficies sin ventanas, excepto la exterior que incluye la ventana y el panel, fueron supuestas adiabáticas.

Para cada simulación se han incluido también los perfiles diarios relacionados con las actividades realizadas dentro de la habitación y con la ropa. Además, debe especificarse que todas las simulaciones se realizaron sin la instalación de sistemas de refrigeración y calefacción.

Defina las características básicas del modelo para poder insertar el efecto de absorción y evaporación del panel dentro del software, se ha pensado en utilizar una instalación de deshumidificación e insertar la cantidad de agua absorbida por el ambiente interno ahora por hora en base a la temperatura superficial del panel.

De esta manera se realizaron primero las simulaciones sin el uso de la instalación, para obtener el valor de temperatura superficial hora por hora, en relación con ésta se calculó la cantidad de humedad absorbida. Estos valores calculados se asignaron a la instalación deshumidificante y se llevó a cabo una simulación adicional para evaluar los momentos del día en los que la doble capa generaba efectivamente aumenta la comodidad del ambiente interior.

## 7.2 Análisis previos

Para calcular la cantidad de agua que el panel es capaz de absorber desde el interior en función de su propia temperatura superficial fue necesario construir una ecuación que relacione estos dos parámetros.

La construcción de esta curva se ha realizado a partir de la vectorización de dos imágenes que representan los gráficos de la evolución de la temperatura y de la cantidad de agua en relación con el tiempo.

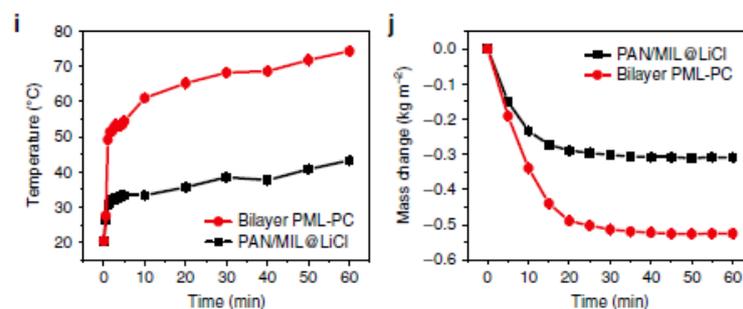


Figura 58 Temperatura y mass change al variar del tiempo [43]

El proceso de vectorización de la imagen, realizado con el programa Inkscape, ha permitido obtener los datos de manera puntual y precisa. Los valores puntuales de temperatura y mass change se han introducido en Excel para obtener un gráfico y una ecuación lo más cerca posible de una regresión ideal de la curva.

Como se puede ver en el gráfico siguiente, la absorción de humedad del panel es prácticamente constante de 20 a 45 °C y de 69 °C en adelante, mientras que el comportamiento de absorción de 45 a 69 °C es linealmente decreciente.

Por lo tanto, supones constantes el primer y el último tramo fue sacada la ecuación del gráfico. Al calcular los valores medios de mass change en el primer y el último tramo, se ha calculado la evolución del tramo intermedio comparando la diferencia entre la temperatura de 69 °C y la de 45 °C y la diferencia entre el mass change a 45 °C y 69 °C. De este modo se ha conseguido una simplificación de la curva que representa la evolución de la cantidad de humedad absorbida por el ambiente interior en  $\text{kg/m}^2$  en relación con la temperatura superficial del panel en °C.

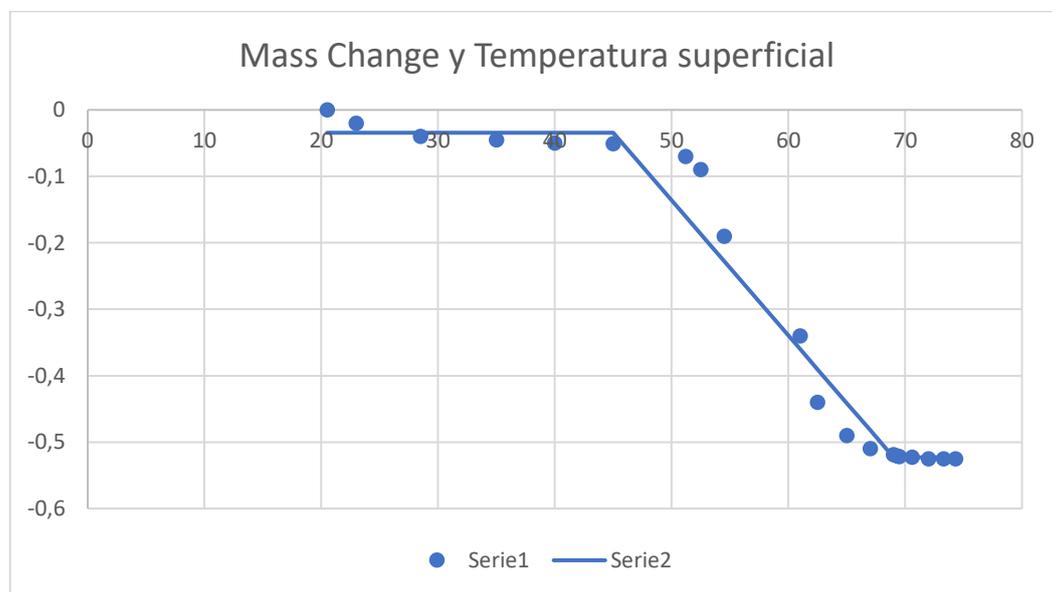


Figura 59 Relación entre mass change ( $\text{Kg/m}^2$ ) y temperatura superficial (°C)

La ecuación obtenida para determinar la evolución del segundo tramo lineal decreciente es la siguiente:

$$y = -0,034333 - 0,02036(x - 45)$$

Las simulaciones se realizaron primero evaluando las condiciones climáticas más extremas del año 2020, es decir, el día más frío y cálido del año, y posteriormente se realizaron en un día representativo de cada mes del año 2020 para poder evaluar los beneficios del panel durante todo el período de tiempo elegido.

Para identificar los días más calurosos y fríos del año, se exportaron los datos climáticos de 2020 desde el software WUFI. El día resultado más caliente fue el 13 de agosto mientras que el más fresco el 19 de enero. En lugar de identificar los días representativos de cada mes del año se tomó como referencia el archivo stat de Energy Plus relativo a Bari dentro del cual están presentes las condiciones climáticas medias estadísticas de cada mes. Sobre la base de estos datos climáticos, se seleccionó el día de cada mes de 2020, que más se acercaba al de las estadísticas. Los días seleccionados son los siguientes: 7 enero, 7 febrero, 14 marzo, 21 abril, 12 mayo, 16 junio, 17 julio, 20 agosto, 12 septiembre, 3 octubre, 14 noviembre, 10 diciembre.

Además de realizar las simulaciones en diferentes días, se cambió la exposición del panel considerando el Sur, Oeste y Este a excepción del Norte donde no hay radiación solar directa del panel.

Adicionalmente de la variación de la exposición del panel en las tres direcciones para cada mes, los únicos parámetros que se han modificado para cada mes son los relativos a la ropa y a la velocidad del aire interior.

Con una actividad metabólica de 1 met desde las horas 8 a las horas 18, los cambios en los parámetros de la ropa y la velocidad del aire se resumen en la siguiente tabla:

	Ropa (clo)	Velocidad del aire (m/s)
Día más caluroso	0,7	0,1
Día más frío	1,5	0,05
07/01/2020	1,5	0,05
07/02/2020	1,5	0,05
21/03/2020	1,5	0,05
21/04/2020	1,5	0,05
12/05/2020	1	0,05
16/06/2020	0,7	0,05
17/07/2020	0,7	0,1
20/08/2020	0,7	0,1
12/09/2020	1	0,05
03/10/2020	1	0,05
14/11/2020	1,5	0,05
10/10/2020	1,5	0,05

Tabla 7 Variación de los valores de ropa y velocidad del aire durante el año

Una vez definidas estas características, el trabajo de evaluación del comportamiento del panel se inició realizando para cada día seleccionado y para cada exposición una primera simulación para detectar la temperatura superficial del panel. Exportados en tablas Excel estos valores fueron calculados, a través de la ecuación definida anteriormente, las cantidades de humedad absorbida del panel ahora por hora en el arco del día. Estos últimos se han multiplicado por la superficie del panel de  $3,1\text{m}^2$  e insertado dentro del software definiendo así la capacidad de absorción de la instalación deshumidificante, que simula el trabajo realizado por el panel.

Es importante especificar que de esta manera se ha supuesto el funcionamiento continuo del panel para poder evaluar en qué momentos del año realmente el panel produce, además de una reducción de la humedad relativa, un nivel de confort mayor.

En la mayoría de los casos, y sobre todo durante los meses más fríos, las temperaturas superficiales del panel son a menudo inferiores a  $45\text{ }^\circ\text{C}$  por lo que la

capacidad deshumidificante del panel, según la curva definida anteriormente, permanece constante en el tiempo.

Por lo tanto, para temperaturas inferiores a 45 °C, el valor de humedad absorbida es de 0,03433 Kg/m<sup>2</sup>. Multiplicando este valor por la superficie del panel, de 3,11m<sup>2</sup> se ha obtenido la cantidad de Kg que se puede insertar hora por hora en el interior del software, este valor por debajo de 45 °C es de 0,11 Kg.

Esta situación se produjo en el día más frío y en casi todos los meses excepto algunos meses y algunas exposiciones y el día más cálido. A continuación, los valores de temperatura de superficie mayores de 45 °C con los meses respectivos y exposiciones:

	Hora	Temperatura (°C)	Cantidad absorbida (Kg)
Día más caluroso SUR	10	45,17	0,22
Día más caluroso SUR	11	49,25	0,47
Día más caluroso SUR	12	52,03	0,63
Día más caluroso SUR	13	52,11	0,63
Día más caluroso SUR	14	51,71	0,59
Día más caluroso SUR	15	48,50	0,41
Día más caluroso OESTE	13	45,25	0,12
Día más caluroso OESTE	14	50,96	0,48
Día más caluroso OESTE	15	52,90	0,60
Día más caluroso OESTE	16	51,35	0,51
Día más caluroso OESTE	17	46,40	0,20
Día más caluroso ESTE	8	45,31	0,13
Día más caluroso ESTE	9	53,01	0,62
Día más caluroso ESTE	10	52,53	0,58
Día más caluroso ESTE	11	49,24	0,38
16/06/2020 OVEST	15	46,13	0,18
16/06/2020 OVEST	16	45,70	0,15
16/06/2020 EST	9	45,15	0,12
20/08/2020 SUD	13	45,63	0,15

Tabla 8 Temperatura superficial superior a 45°C

## 8.Resultados

Se realizaron entonces en total 84 simulaciones, de las cuales 42 sin la activación del panel y 42 activándolo a través de la tecnología de instalaciones.

Los resultados extrapolados del programa y analizados para evaluar el comportamiento del panel fueron la temperatura operativa <sup>10</sup> y la humedad relativa del ambiente interior y dos índices de confort que tienen en cuenta estas dos variables que son el PMV (Predicted mean vote o Voto Medio Esperado) y el PPD (Predicted percentage of dissatisfied o porcentaje esperado de insatisfechos).

Los resultados obtenidos se han resumido mediante gráficos que comparan los valores con y sin el uso del panel durante todo el día considerado. A continuación, se muestra la leyenda que describe los parámetros comparados presentes en las tablas de forma sintética:

- Top no: temperatura operativa sin la activación del panel
- Top si: temperatura operativa con la activación del panel
- HR no: humedad relativa sin la activación del panel
- HR si: humedad relativa con la activación del panel
- PMV no: Voto Medio Esperado sin la activación del panel
- PMV si: Voto Medio Esperado con la activación del panel
- PPD no: Porcentaje Esperado de Insatisfechos sin la activación del panel
- PPD si: Porcentaje Esperado de Insatisfechos con la activación del panel

Se analizarán primero los resultados durante los días en condiciones climáticas extremas, según las tres exposiciones, y luego se examinarán los resultados relativos a los días representativos de cada mes del año para las tres exposiciones.

---

<sup>10</sup> la definición de temperatura operativa dada por la norma UNI 10375:2011: "La temperatura de funcionamiento representa la temperatura uniforme de un ambiente en el que un ocupante cambiaría por irradiación y convección la misma potencia calorífica intercambiada en el entorno de ensayo de forma no uniforme."

En base al aumento del nivel de confort se evaluarán los momentos del día en que será más oportuno solicitar el uso del panel para la deshumidificación interna.

## 8.1 Resultados en condiciones climáticas extremas

En el día más caluroso, el 13 de agosto, colocando el panel hacia el Sur se obtienen los siguientes resultados:

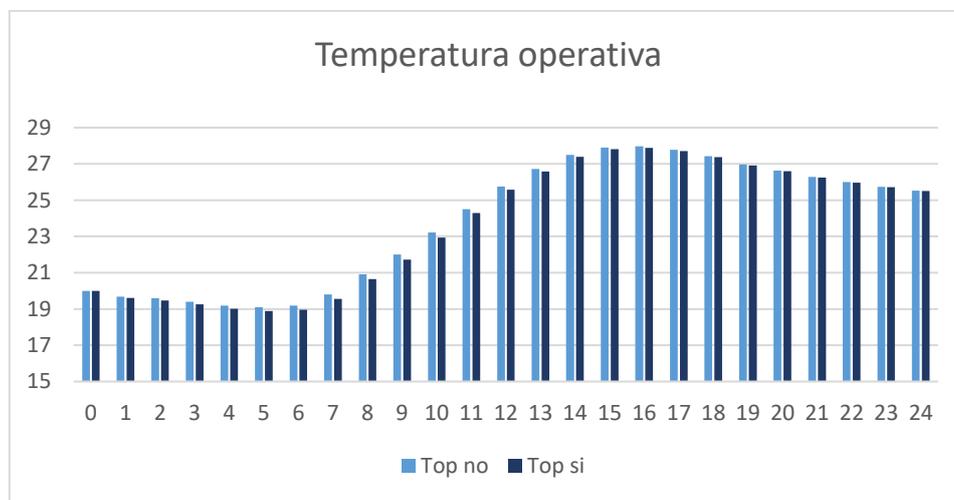


Figura 60 Evolución de la temperatura operativa 13 agosto 2020 exposición Sur

La temperatura operativa durante todo el día disminuye ligeramente utilizando el panel en comparación con las condiciones iniciales sin la activación del panel.

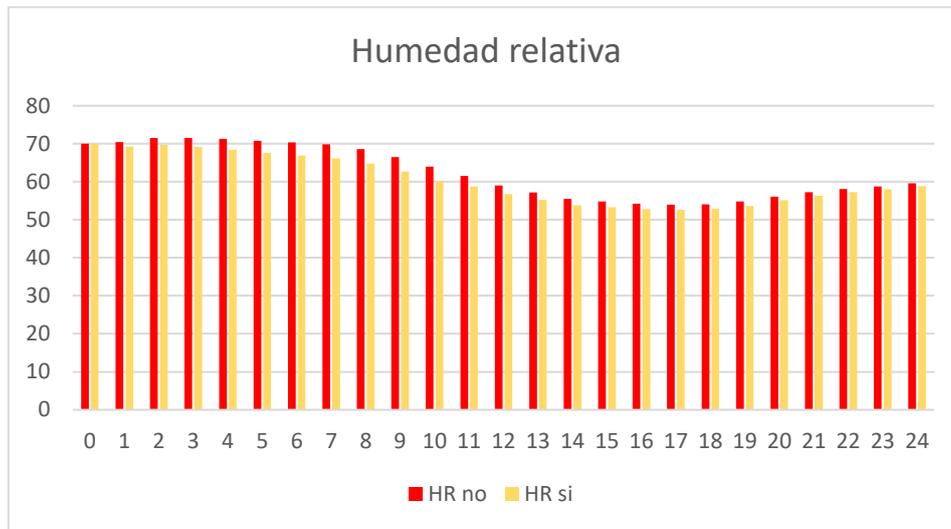


Figura 61 Evolución humedad relativa 13 agosto 2020 exposición Sur

La humedad relativa del ambiente interior, con el uso del panel, disminuye con respecto a las condiciones iniciales sin la activación del panel. La humedad disminuye bajo el 60% de las 11 a las 24.

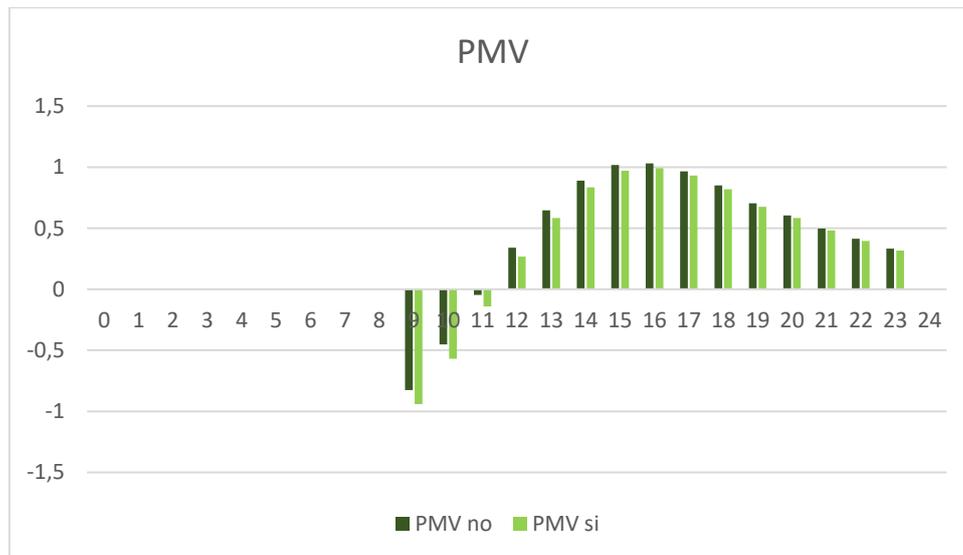


Figura 62 Evolución PMV 13 agosto 2020 exposición Sur

El uso del panel genera un aumento del rango del PMV excepto de las 12 a las 23 en que se nota una disminución del PMV, por lo que el confort aumenta.

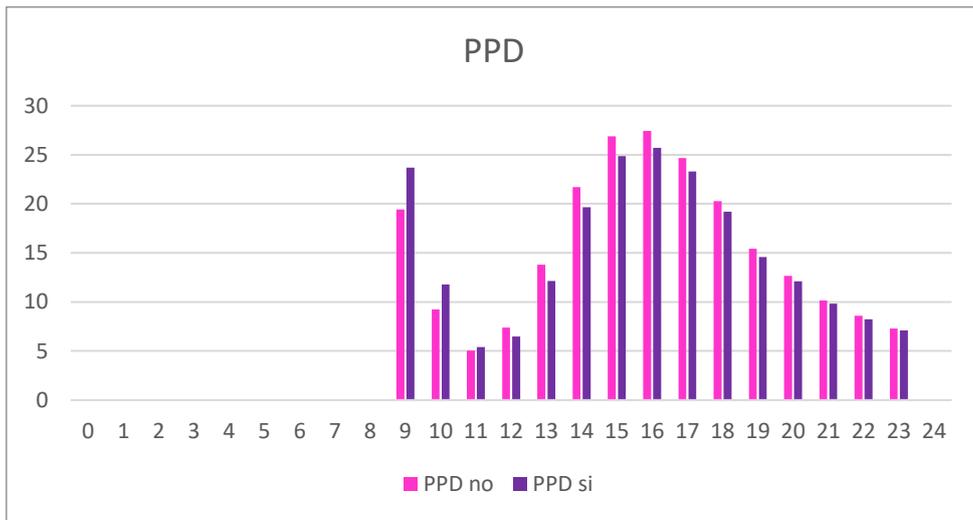


Figura 63 Evolución PPD 13 agosto 2020 exposición Sur

El PPD también aumenta en las primeras horas y disminuye de las 12 a las 23 con el uso del panel. En estas horas se incrementa el confort interno. El valor mínimo es aproximadamente de 5% a las 10 y máximo a las 16, donde alcanza aproximadamente el 25%.

Exponiendo el panel hacia el Oeste en su lugar:

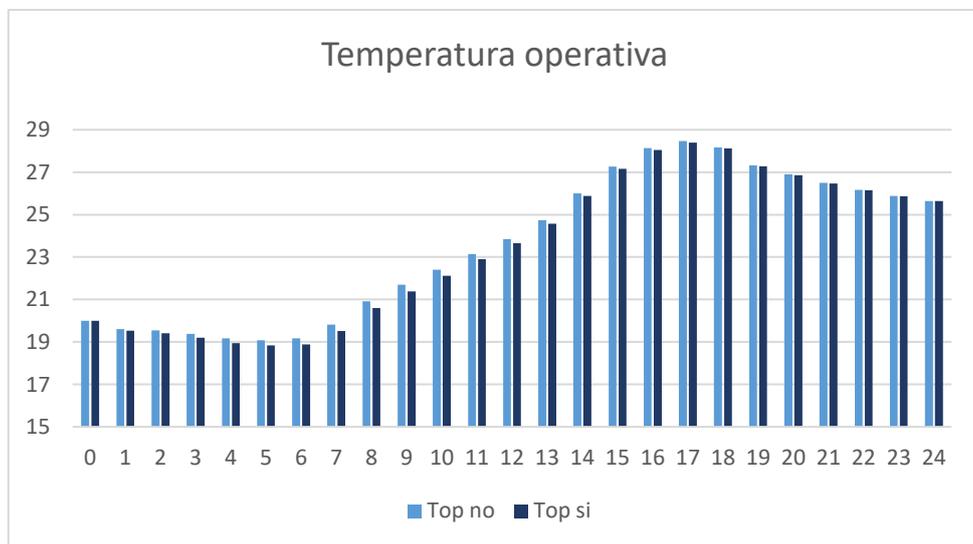


FIGURA 64 Evolución de la temperatura operativa 13 agosto 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa es casi la misma con el uso del panel en comparación con las condiciones iniciales sin la activación del panel.

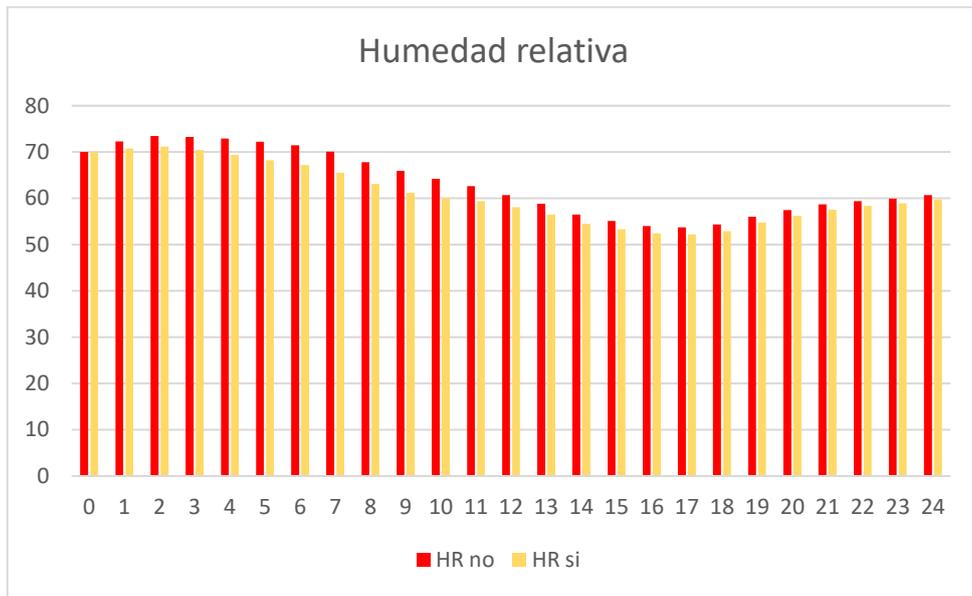


FIGURA 65 Evolución humedad relativa 13 agosto 2020 exposición Oeste

La humedad relativa con el uso del panel disminuye durante todas las horas del día, y alcanza valores inferiores al 60% de las 11 a las 23.

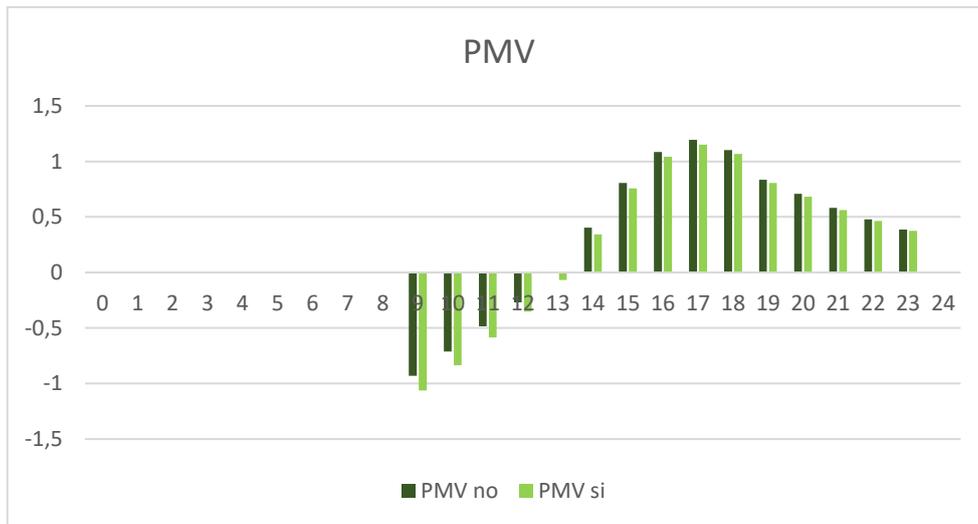


FIGURA 66 Evolución PMV 13 agosto 2020 exposición Oeste

Utilizando el panel se nota un aumento en el rango del PMV de las 9 a las 13 después de lo cual disminuye hasta las 23, por lo que en este período hay un aumento en el confort interno. En este caso el rango aumenta y varía de -1 a valores ligeramente superiores a +1.

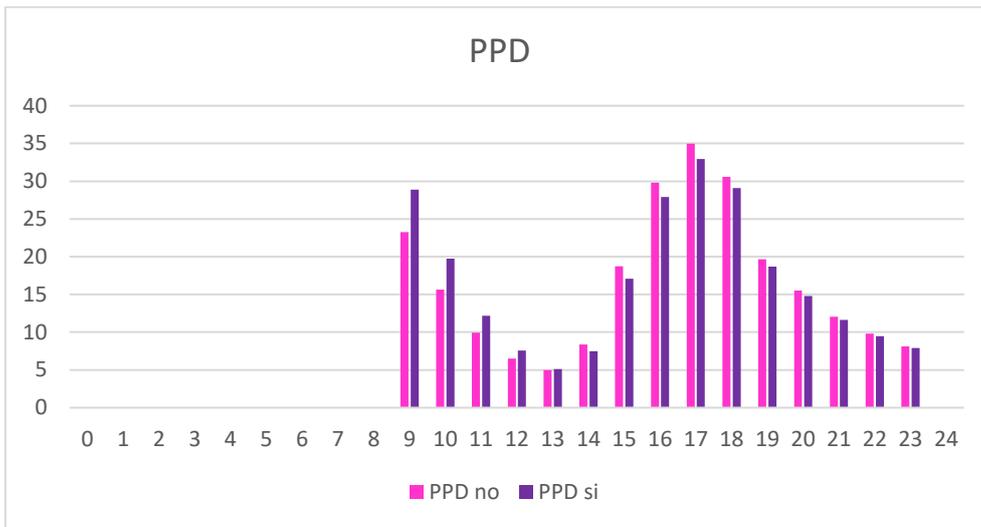


FIGURA 67 Evolución PPD 13 agosto 2020 exposición Oeste

El PPD aumenta en las primeras horas y disminuye a partir de las 14. También en este caso se registra un aumento de los valores con respecto al caso anterior, que llega casi al 35% a las 17.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:

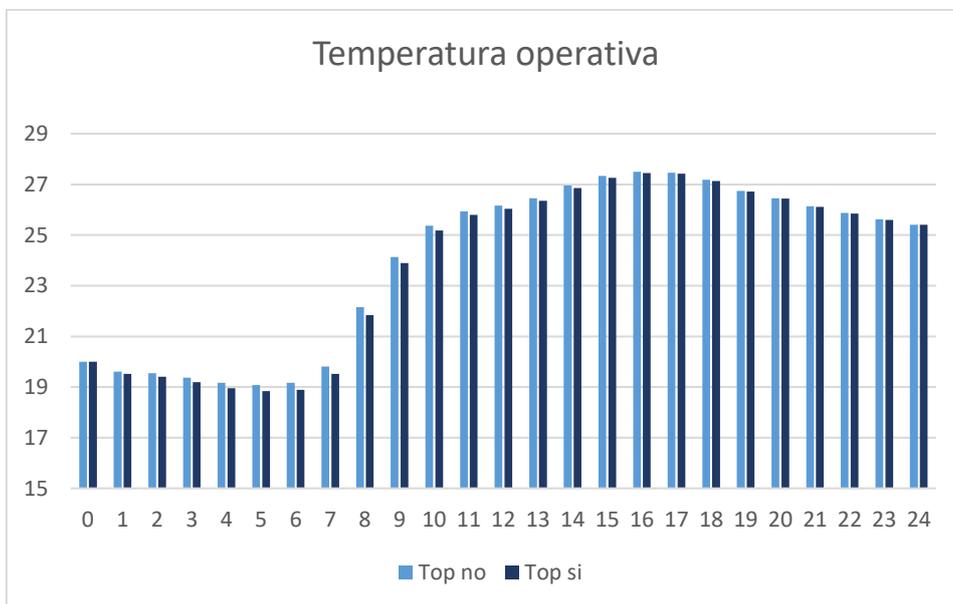


FIGURA 68 Evolución de la temperatura operativa 13 agosto 2020 exposición Este

La temperatura operativa es casi la misma con el uso del panel en comparación con las condiciones iniciales sin la activación del panel.

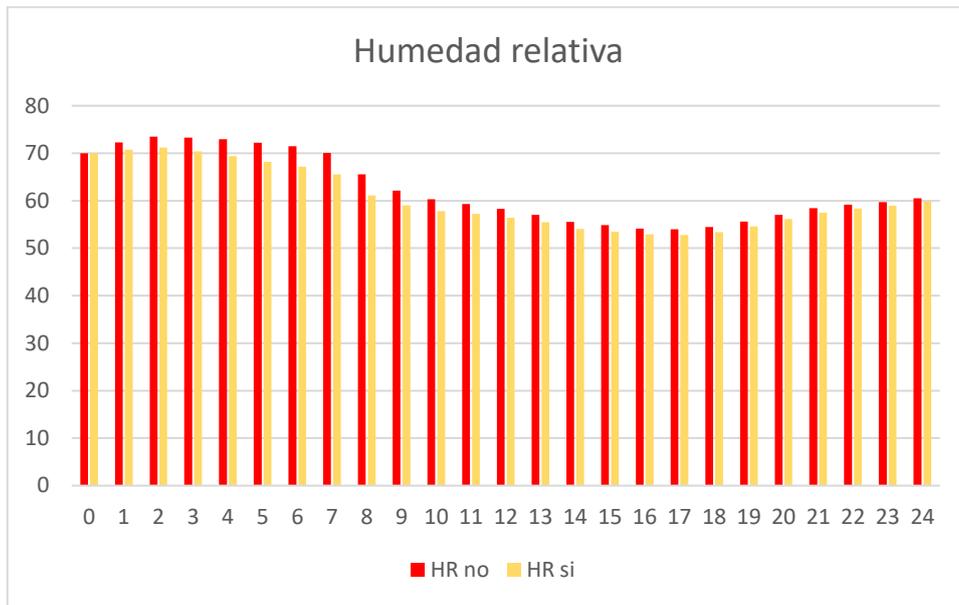


FIGURA 69 Evolución humedad relativa 13 agosto 2020 exposición Este

La humedad relativa con el uso del panel disminuye durante todas las horas del día, y alcanza valores inferiores al 60% de las 10 a las 22.

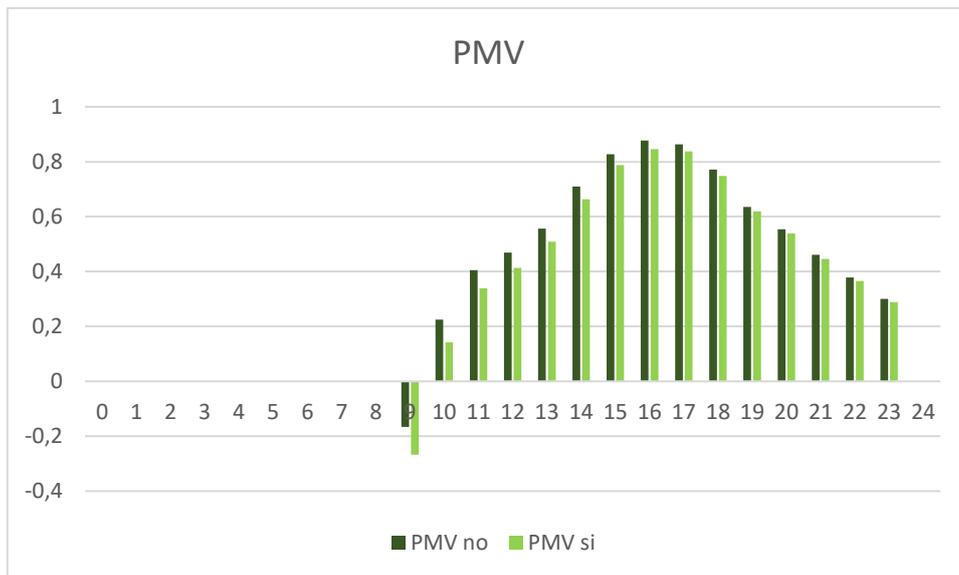


FIGURA 70 Evolución PMV 13 agosto 2020 exposición Este

Utilizando el panel se nota un aumento del PMV a las 9 y después disminuye hasta las 23, por lo que se registra un aumento del confort en estas horas. En este caso el rango disminuye y varía aproximadamente de -0,2 a valores ligeramente superiores a +0,8.

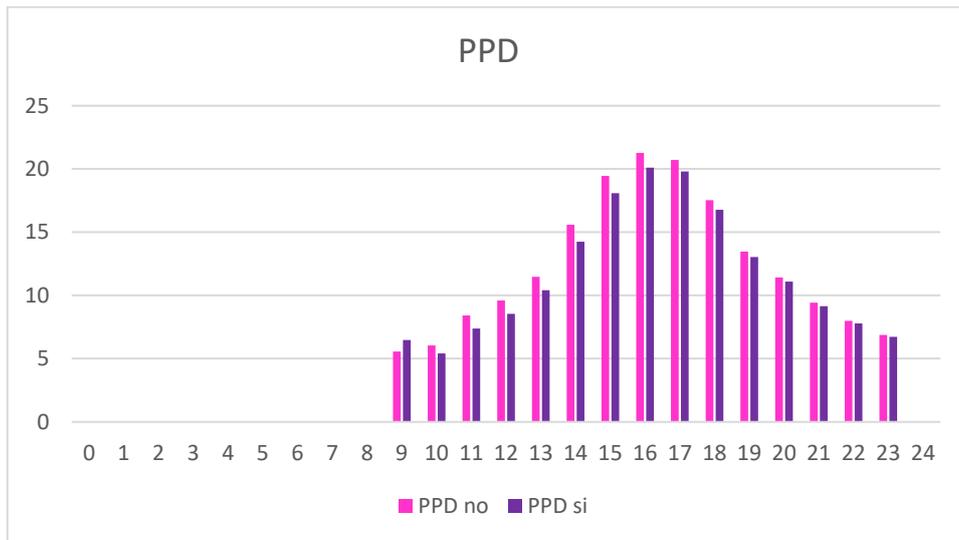


FIGURA 71 Evolución PPD 13 agosto 2020 exposición Este

El PPD aumenta a las 9 con el uso del panel y disminuye a partir de las 10. También en este caso se registra una disminución del valor que llega alrededor del 20% entre las 16 y las 17 con un relativo aumento del confort a partir de las 10.

En general, durante el día más cálido se registra en los tres casos una disminución de la humedad relativa interna y un aumento del confort en casi todas las horas del día. Este último período es mayor en la exposición al este, pero hay que tener en cuenta que no se ha introducido una protección solar que va a afectar al bienestar térmico del ambiente interno provocando un aumento de la temperatura operativa en las horas más cálidas del día. De este modo se deduce que las horas en las que se activará el panel serán las siguientes: sur de las 12 a las 23, oeste de las 14 a las 23 y este de las 10 a las 23.

En cuanto al 19 de enero, que es el día más frío, la exposición al Sur presentó los siguientes resultados:

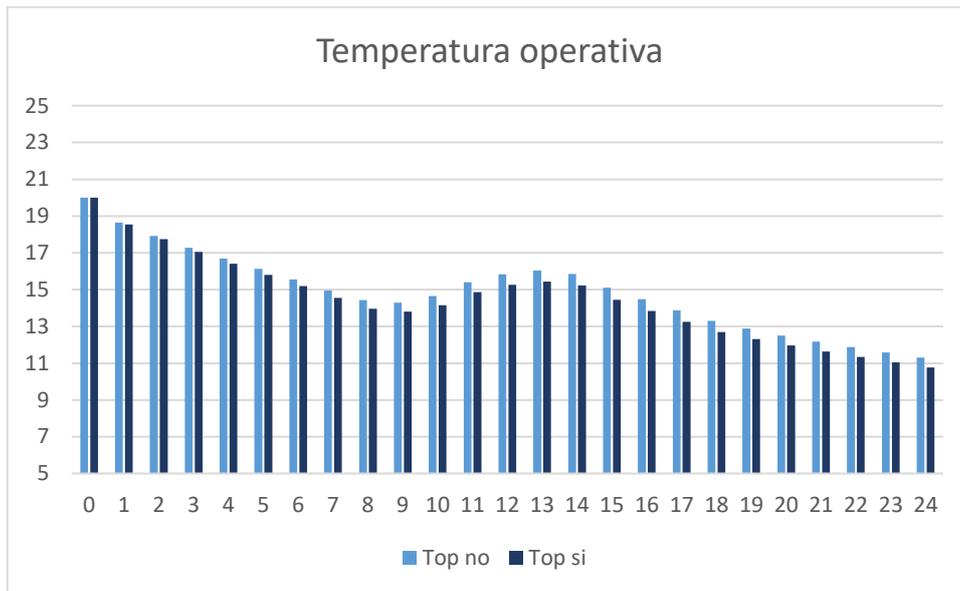


FIGURA 72 Evolución de la temperatura operativa 19 enero 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye progresivamente con el uso del panel a partir de las primeras horas de la noche con respecto a las condiciones iniciales sin la utilización del panel.

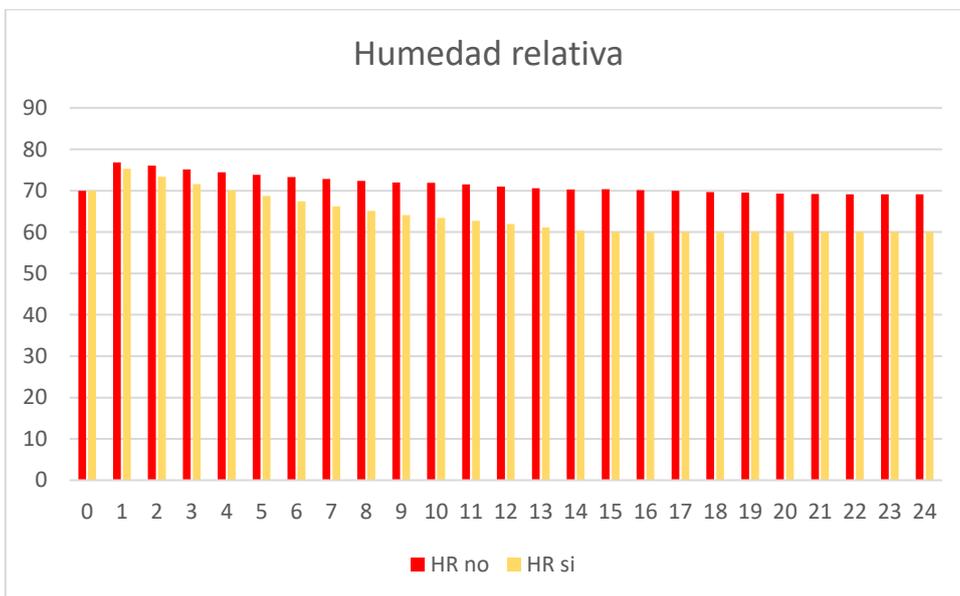


FIGURA 73 Evolución de la humedad relativa 19 de enero de 2020 exposición Sur

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel alcanzando cerca del 60% de las 15 en adelante.

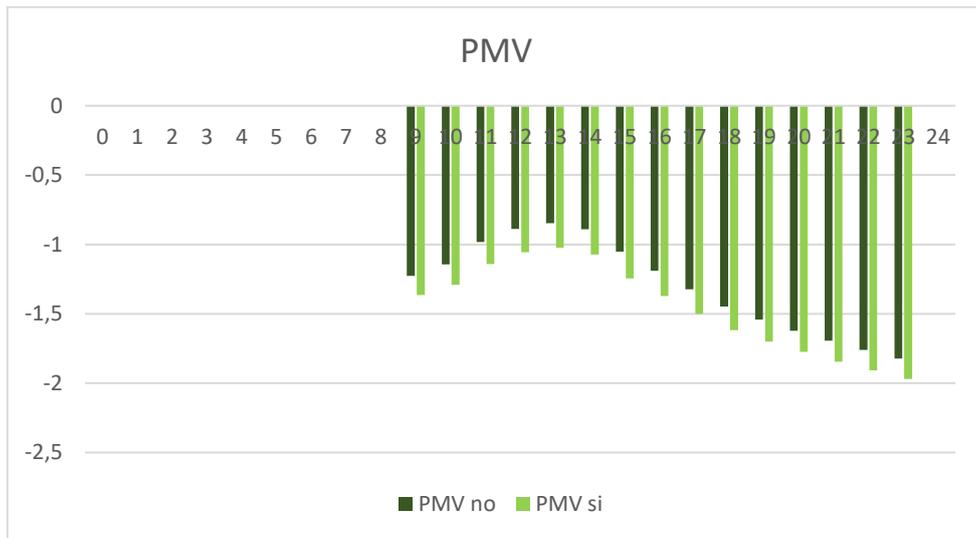


FIGURA 74 Evolución PMV 19 enero 2020 exposición Sur

Los valores de PMV disminuyen más en cada momento del día con el uso del panel con relación a las condiciones iniciales rozando casi el umbral de los -2 a las 23. Entonces el panel incrementa el discomfort en el ambiente interno.

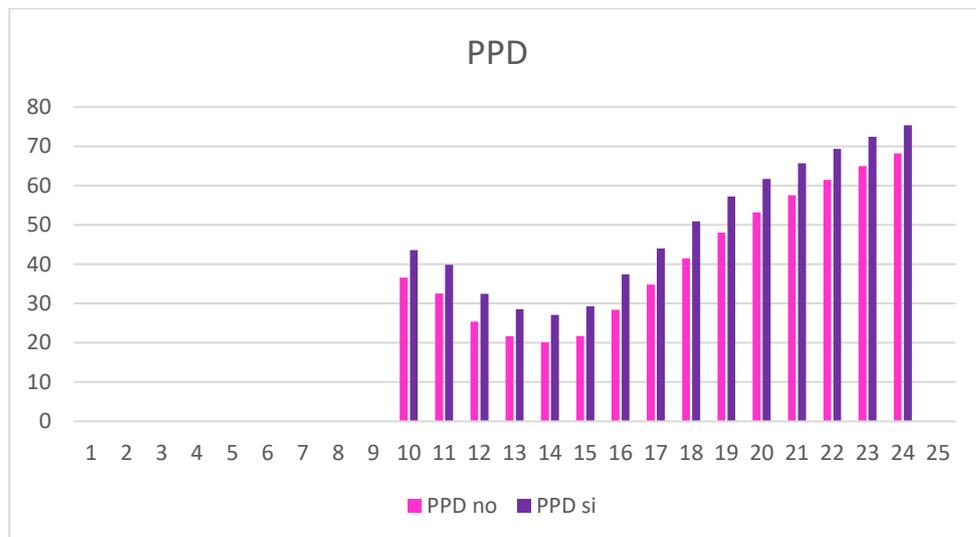


FIGURA 75 Evolución PPD 19 enero 2020 exposición Sur

Incluso el PPD aumenta con el uso del panel hasta un valor máximo de más del 70% de las 23 a las 24, generando un aumento del discomfort.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:

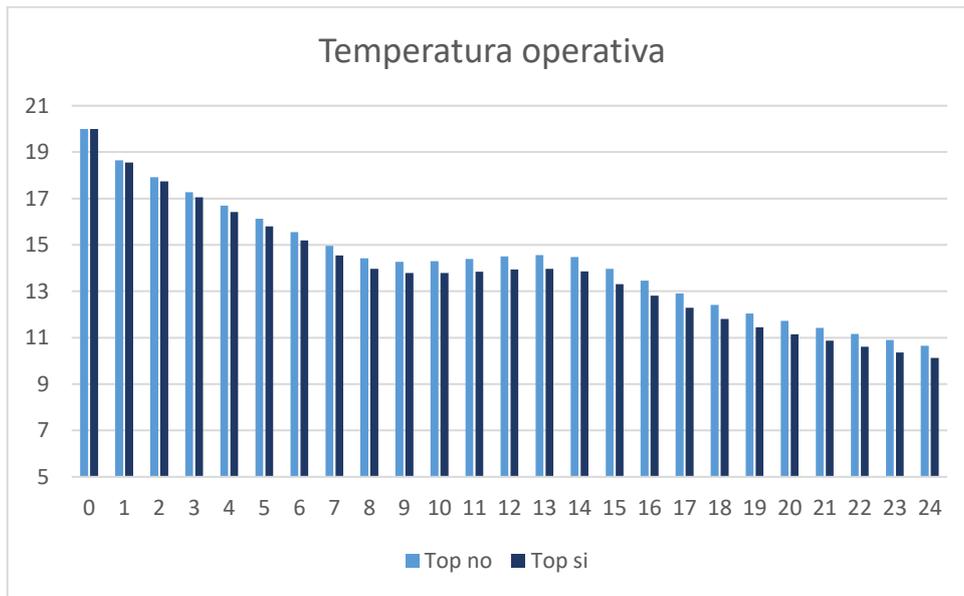


FIGURA 76 Evolución de la temperatura de funcionamiento 19 enero 2020 exposición Oeste  
 La temperatura operativa disminuye durante todo el día con el uso del panel en comparación con las condiciones iniciales sin la activación del panel.

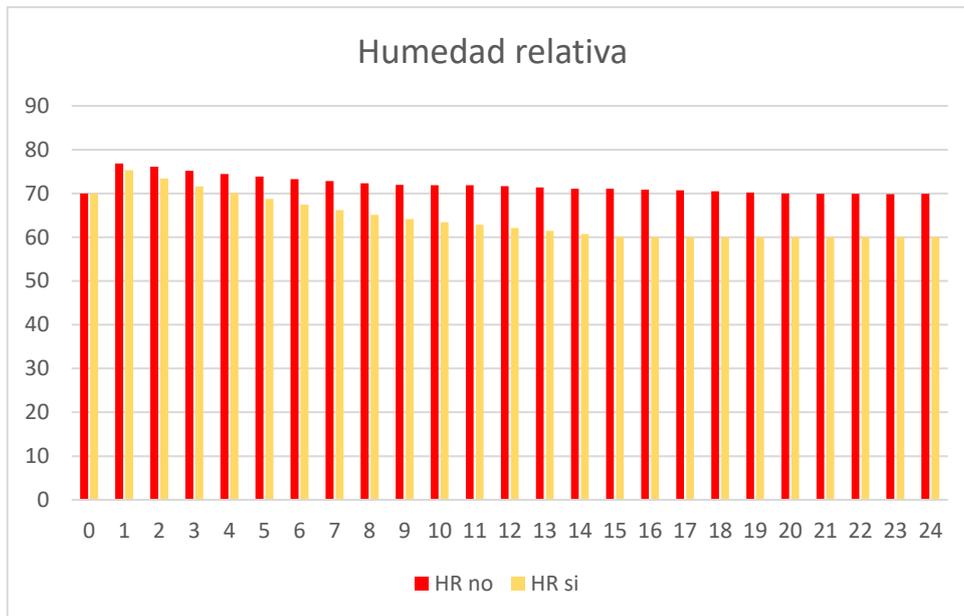


FIGURA 77 Evolución de la humedad relativa 19 de enero de 2020 exposición Oeste  
 La humedad disminuye con la utilización del panel pasando del 70% al 60% de las 13 a las 24.

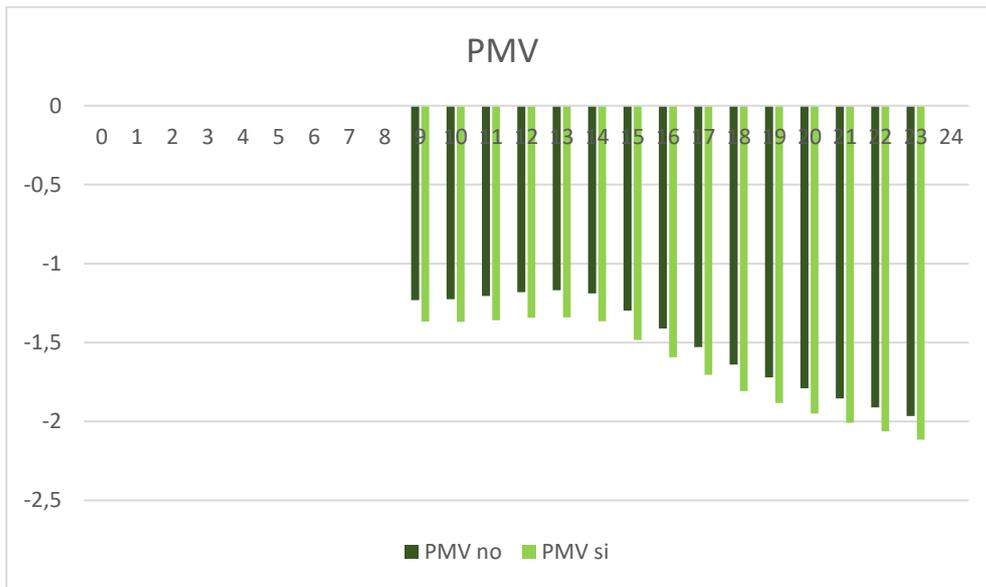


FIGURA 78 Evolución PMV 19 enero 2020 exposición Oeste

Los valores de PMV disminuyen más, alcanzando picos que superan los -2, por lo tanto la utilización del panel va a aumentar el discomfort para los usuarios.

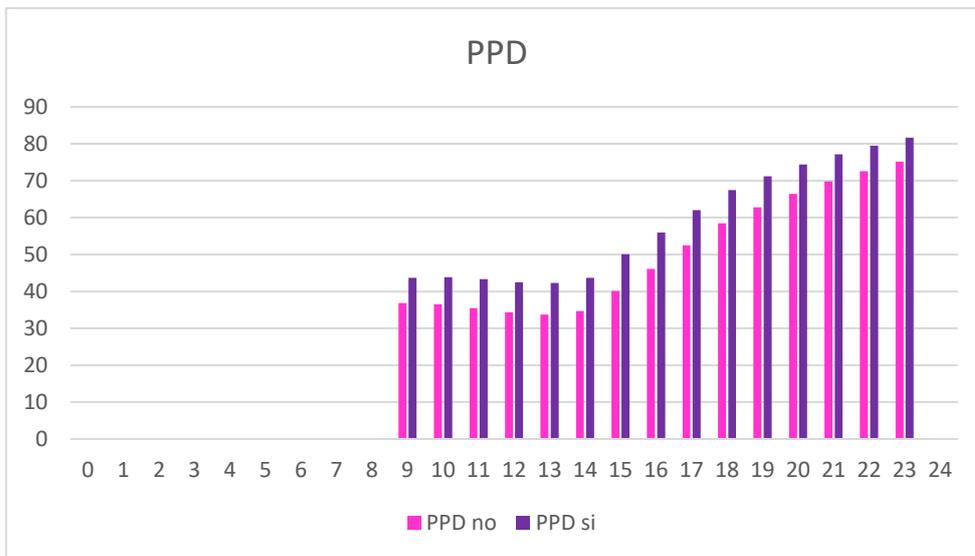


FIGURA 79 Evolución PPD 19 enero 2020 exposición Oeste

También en este caso se detecta un aumento del discomfort en todas las horas del día ya que el PPD aumenta con el uso del panel.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:

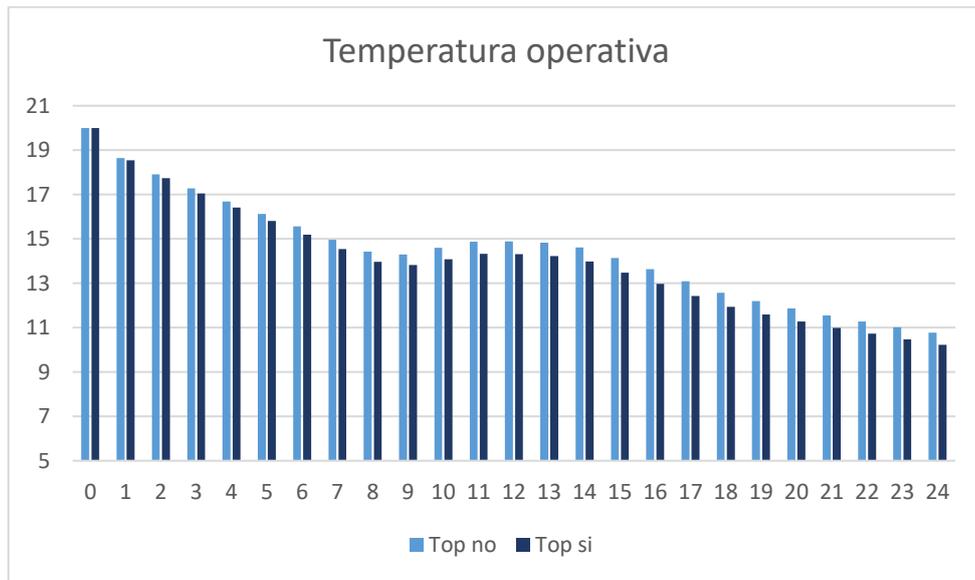


FIGURA 80 Evolución de la temperatura operativa 19 de enero de 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye con el uso del panel en todas las horas del día con respecto a las condiciones iniciales sin la activación del panel.

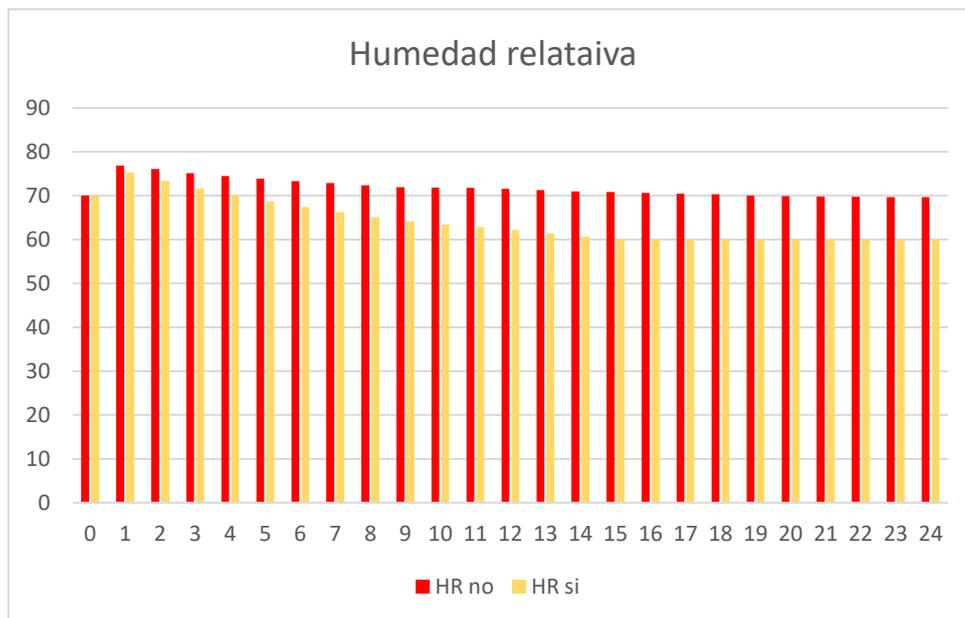


FIGURA 81 Evolución humedad relativa 19 enero 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye en todas las horas del día con la activación del panel pasando de 70 a 60% de las 11 a las 24.

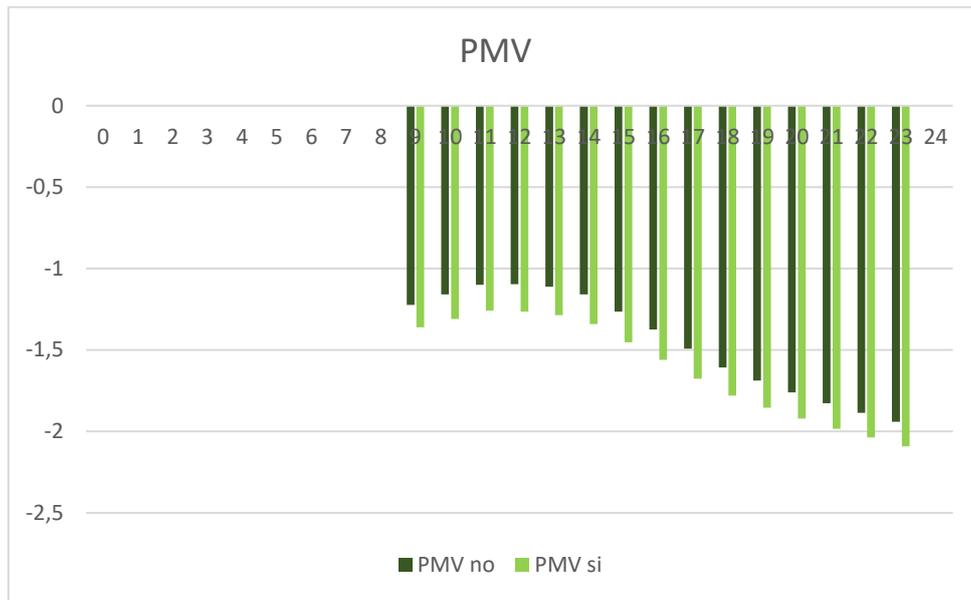


FIGURA 82 Evolución PMV 19 enero 2020 exposición Este

los valores de PMV disminuyen considerablemente, alcanzando picos que superan los -2, por lo tanto, el uso del panel va a aumentar el discomfort para los usuarios con relación a las condiciones iniciales.

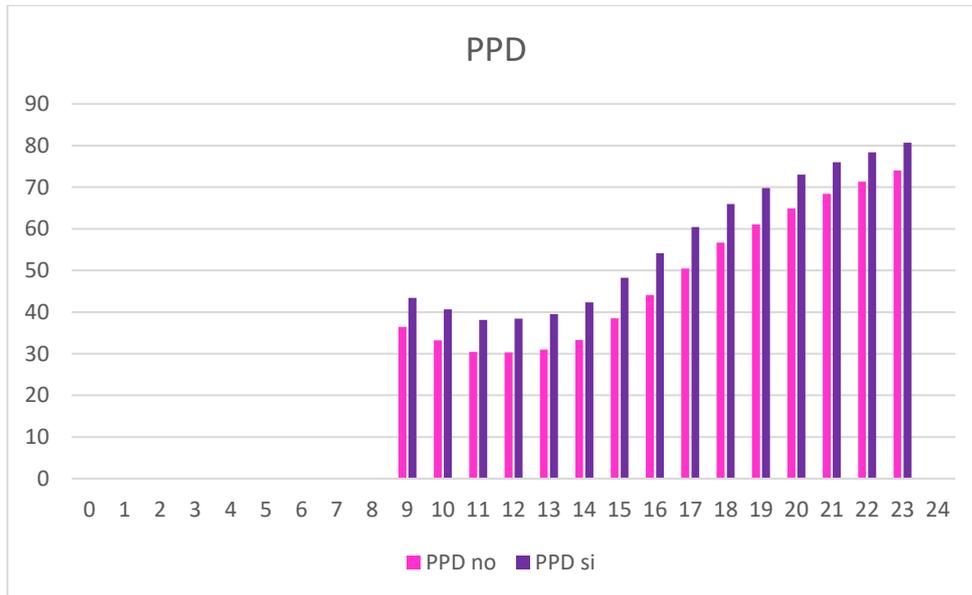


FIGURA 83 Evolución PPD 19 enero 2020 exposición Este

También en este caso se detecta un aumento del discomfort en todas las horas del día ya que el PPD aumenta con el uso del panel.

En el caso del clima exterior extremadamente frío se obtiene una situación diferente a la anterior. Independientemente de la exposición del panel se puede observar como la activación del panel en todas las horas del día, aunque genera una disminución de la humedad relativa, al mismo tiempo disminuye los niveles de confort interno. De hecho, esto puede ser causado por la disminución de la temperatura operativa debido a una menor temperatura superficial del panel que crea altas dispersiones en el momento en que se inserta como una superficie de ventana. Es posible deducir que durante los días más fríos es preferible evitar la activación del panel que produciría una disminución de la temperatura operativa y del confort del ambiente interno.

Este análisis preliminar ha permitido obtener ya una primera evaluación sobre el uso de la doble capa biomimética mostrando la eficacia del panel en términos de confort y disminución de la humedad relativa sobre todo en el día más caliente y en las horas en que el panel alcanza temperaturas superficiales más elevadas y manteniendo la temperatura operativa casi sin cambios. Para obtener una evaluación global del comportamiento del panel, los resultados se analizaron también para cada mes del año.

## 8.2 Resultados de las condiciones mensuales

Los resultados relativos a la totalidad del año se sintetizan partiendo del mes de enero hasta llegar al mes de diciembre. Los gráficos de comparación de temperatura operativa, humedad relativa, PMV y PPD por cada mes del año y exposición se colocan en el apartado del anexo.

En los meses de enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre ante cualquier exposición solar se produce, con la activación del panel respecto a la condición inicial sin utilizar el panel, una disminución de la temperatura de funcionamiento a lo largo del día y una disminución de la humedad relativa. Esto, sin embargo, con un aumento de las molestias durante todo el día (para más detalles, consulte el Anexo A por el mes de enero, el Anexo B por el mes de febrero, el

Anexo C por el mes de marzo, el Anexo L por el mes de Octubre, el Anexo M por el mes de Noviembre, el Anexo N por el mes de Diciembre).

Para los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre, independientemente de las exposiciones, cuando se activa el panel con respecto a las condiciones iniciales sin usar el panel, las temperaturas de operación disminuyen levemente mientras que en otras épocas aumentan. La humedad relativa desciende por debajo del 60% y los índices de confort muestran un aumento del confort en algunas horas del día. Claramente estas horas son diferentes según el mes y la orientación del panel y se resumen en la tabla 9 (para más detalles, consulte el Anexo D por el mes de Abril, el Anexo E por el mes de Mayo, el Anexo F por el mes de Junio, el Anexo G por el mes de Julio, el Anexo H por el mes de Agosto, el Anexo I por el mes de Septiembre).

Del análisis efectuado se desprende que la activación del funcionamiento del panel sólo genera un aumento del confort en los meses más cálidos y que, en particular en los momentos del día en que las temperaturas son mayores, los meses en cuestión son abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Tal comportamiento es coherente con lo que es la morfología del panel, ya que una mayor temperatura externa provoca un aumento contextual de la temperatura superficial del panel y por lo tanto un mayor rendimiento en términos de absorción de la humedad relativa interna y una mejora contemporánea del confort interior.

Además, los análisis han tenido lugar sin tener en cuenta la inserción de un sistema mecanizado para la calefacción y el enfriamiento de los ambientes internos, por lo tanto, en los meses más cálidos y en los más fríos se registran valores de PMV que superan incluso el -1 y PPD que supera el 70%. Esto se suma a las dispersiones que el panel genera en el momento en que se inserta en el lugar de la ventana produciendo así una disminución del rendimiento del edificio.

Por lo tanto, la activación del panel es eficaz en el momento en que se alcanza una determinada temperatura interna y superficial. Es posible prever la instalación de sensores que detecten estos niveles de temperatura y activen así el funcionamiento

del panel en el momento en que, además de la disminución de la humedad interna, generan un aumento del confort interior.

Se resumen en la tabla siguiente los momentos del año en que la activación del panel genera un mejor confort del ambiente interno y al mismo tiempo una disminución de la humedad interna.

	Exposición	Intervalo horario de activación de PML-PC
Abril	Sur	de 12 a 17
	Oeste	de 15 a 18
	Este	de 10 a 11
Mayo	Sur	a las 15
	Oeste	de 15 a 18
	Este	de 10 a 18
Junio	Sur	de 14 a 18
	Oeste	de 15 a 21
	Este	de 11 a 19
Julio	Sur	de 14 a 18
	Oeste	de 15 a 21
	Este	de 10 a 19
Agosto	Sur	de 12 a 17
	Oeste	de 14 a 15
	Este	de 11 a 16
Septiembre	Sur	de 13 a 19
	Oeste	de 14 a 19
	Este	de 14 a 18

Tabla 9 Horarios de activación de PML-PC

## 9. Conclusiones

En conclusión, se puede afirmar que los resultados obtenidos son coherentes con los objetivos fijados inicialmente, ya que:

- en el momento en que el panel se active dentro del edificio, la temperatura superficial aumenta y se activa el mecanismo de absorción y evaporación de la humedad interna favoreciendo así la disminución del porcentaje de humedad relativa interna casi en todos los casos por debajo del 60% aproximándose al intervalo de confort definido a nivel internacional;
- analizando los valores de los índices PMV y PPD se ha demostrado que el nivel de confort interior aumenta en algunos meses del año y, en particular, en algunas horas del día dependiendo de la exposición del panel. Por lo tanto, es recomendable el uso del panel en estos momentos del día durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre y en las horas en que la temperatura superficial del panel alcanza una altura tal que permite una mayor absorción de la humedad relativa interna y por lo tanto un mayor rendimiento, además de la absorción de la humedad, también en términos de confort para el usuario;
- las propiedades intrínsecas del panel (PML-PC) NFM permiten la absorción y la evaporación del agua recogida de la humedad interior sin gasto de energía por parte del edificio. Esto disminuirá los costes de deshumidificación del medio ambiente, reduciendo las necesidades de energía del edificio y contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y del calentamiento global del planeta Tierra;
- la doble capa biomimética imita el mecanismo de transpiración de la madera que con una estructura de redes celulares jerárquicas horizontales y canales interconectados verticales permite transportar el agua del suelo a las hojas. Este es uno de los muchos ejemplos de tecnología biomimética y se ha demostrado que los mecanismos de la naturaleza pueden representar una vez más, una clave de inflexión en el diseño sostenible de un edificio;

- el uso de la membrana nanofibrosa NFM MOF se puede integrar fácilmente en la construcción mediante el uso de ventanas inteligentes que poseen una superficie deslizante en la que se coloca el panel. De esta manera puede activar el funcionamiento del panel dentro del edificio deslizando esta superficie y posicionarla hacia el ambiente interior. Este estudio demuestra que el panel es eficaz tanto en las exposiciones Sur como en las Este y Oeste y por lo tanto permite su instalación, no sólo en los edificios de nueva construcción, pero también para los edificios existentes colocándolo en las aberturas ya existentes de los organismos de construcción. Además, el gran potencial de absorción de la capa de desecante podría utilizarse para crear estructuras que absorban el agua de la atmósfera y la acumulen en estructuras adecuadas, obteniendo así una nueva fuente de suministro de agua potable.

## 10. Desarrollos futuros

Este estudio representa solo un primer acercamiento al uso del del panel (PML-PC) NFM en el interior de edificios. Se ha señalado que la implementación de esta tecnología trae numerosas ventajas en términos de confort interior y ahorro energético dentro de las estructuras del edificio, pero el estudio ciertamente estuvo limitado por las numerosas simplificaciones realizadas al modelo y a la tecnología de su implementación.

De hecho, dado el enorme potencial del panel, podrían ser muchos los estudios de profundización para permitir el uso de la doble capa biomimética en el campo de la construcción y no solo, que incluyen:

- construir un modelo más cercano a una ventana inteligente en el que el panel se pueda integrar como superficie deslizante, de esta manera sería posible obtener índices de confort (PMV y PPD) más cercanos a la condición de neutralidad térmica y evitar grandes pérdidas de calor debido a la elevada transmitancia del panel;
- probar el panel dentro de una unidad inmobiliaria o en todo un edificio y estimar los costes-beneficios de su uso a lo largo del año;
- estudiar los beneficios del panel en otras áreas del mundo con condiciones climáticas diferentes a las de la ciudad de Bari y establecer si esta tecnología se puede implementar a escala global;
- probar el comportamiento del panel en varios escenarios climáticos futuros y evaluar si su contribución realmente puede traer beneficios en términos de impacto ambiental y desarrollo sostenible;
- dado el daño que el calentamiento global está causando a nuestro planeta, podría ser conveniente estudiar un nuevo sistema de abastecimiento de agua potable considerando las grandes capacidades de la capa desecante que compone el panel.

# Referencias

- [1] Tord Kjellstrom, Anthony J. McMichael. (2015) Climate change threats to population health and well-being: the imperative of protective solutions that will last. *Global Health Action*, 6:1.
- [2] Rajendra K. Pachauri, Leo Meyer, (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. Intergovernmental panel on climate change. Recuperado el 18 octubre 2020 de [https://ar5-syr.ipcc.ch/topic\\_futurechanges.php](https://ar5-syr.ipcc.ch/topic_futurechanges.php)
- [3] Fabio D'angiulillo. (2007-08) Riscaldamento globale, adattamento al cambiamento climatico e opzioni reali. Tesi di laurea, Università degli studi di Roma Tor Vergata.
- [4] Liu Yang, Haiyan Yan, Joseph C. Lam. (2014) Thermal comfort and building energy consumption implications. *Applied Energy*, Volume 115.
- [5] Michele De Carli, Antonino Di Bella, (2007), Il Fabbisogno Energetico Globale Degli Edifici. Consorzio Poroton Italia.
- [6] Clara Peretti. (2016) Qualità degli ambienti interni: norme Uni, indici, strumenti. Teknoring, il portale delle professioni tecniche.
- [7] Anna Magrini, Daniela Ena. (2006) Tecnologie Solari Attive E Passive. Quaderni per la progettazione. EPC.
- [8] Peder Wolkoff. (2018) Indoor air humidity, air quality, and health. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Volume 221, Issue.
- [9] ANSI/ASHRAE Standard 62.1. (2019) "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality".
- [10] ANSI/ASHRAE Standard 62.2, (2019), Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings.
- [11] Francesca R. d'Ambrosio Alfano , Luca Alberto Piterà. (2014) Qualità Globale dell'Ambiente Interno. Editore Delfino.
- [12] UNI EN ISO 7730:2006 "Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale"

- [13] Anthony V. Arundel, Elia M. Sterling, Judith H. Biggin, Theodor D. Sterling. (1986) Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. Environmental Health Perspectives.
- [14] Yunus A. Çengel. (2009) Termodinamica E Trasmissione Del Calore. McGraw-Hill Companies.
- [15] Daniele Palma. (2004) Deumidificazione Per Adsorbimento. Valutazione delle prestazioni di impianti di climatizzazione ibridi con ruota essiccante. Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Termomeccanici, Università degli studi di Napoli Federico II.
- [16] UNI EN 15251 (2008). “Criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica”.
- [17] UNI EN 13779 (2008). “Ventilazione degli edifici non residenziali - Requisiti di prestazione per i sistemi di ventilazione e di climatizzazione”.
- [18] Stefano Basso, (2015-2020). Certificazione energetica: glossario termini certificazioni energetiche. Ing. Stefano Basso. Recuperado el 23 noviembre 2020 de <https://www.schede-tecniche.it/diagramma-psicrometrico.html>
- [19] Young Cheol Choi, Seongcheol Choi, Chi Won Song, Ji Soo Lee. (2016) Moisture-Buffering Characteristics of Building Materials. Ceramics-Silikáty 60 (2).
- [20] E. Di Giuseppe, M. D’orazio. (2017) MOISTURE BUFFERING edifici energeticamente performanti possono registrare un elevato tasso di umidità: strategie per la gestione della qualità ambientale. Tesi di laurea, Università degli studi di Firenze.
- [21] Rode Carsten, Peuhkuri Ruut Hannele, Mortensen Lone Hedegaard, Hansen Kurt Kielsgaard, Time Berit, Gustavsens Arild, Ojanen Tuomo, Ahonen Jarkko, Svennberg Kaisa, Arfvidsson Jesper. (2005) Moisture Buffering of Building Materials. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Report R-126.

- [22] Carsten Rode, Ruut Peuhkuri, Kaisa Svennberg, Tuomo Ojanen, Phalguni Mukhopadhyaya, M. Kumaran. (2007) Moisture Buffering Value of Building Materials. *Journal of ASTM International* 4(5).
- [23] JIS A 1470-1 (2002). “Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity-Part 1: Response method of humidity”.
- [24] ISO 24353 (2008). “Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation”.
- [25] UNI EN ISO 12571:2013. “Prestazione igrotermica dei materiali e dei prodotti per edilizia - Determinazione delle proprietà di assorbimento igroscopico”.
- [26] T. Padfield, (1998) The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. Ph.D. thesis The Technical University of Denmark Department of Structural Engineering and Materials.
- [27] Mortensen, L. H., Rode, C., & Peuhkuri, R. H. (2005) Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials. In G. Johannesson (Ed.), *Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries (Vol. Volume 2, pp. 662-669)*. The Icelandic Building Research Institute, IBRI.
- [28] Pietro Stefanizzi, Stefania Liuzzi. (2015) Il Moisture Buffer Value Come Indice Di Prestazione Termoigrometrica. IX Congresso Nazionale AIGE
- [29] M.Rahima, O.Douzanea, A.D.Tran LeaG.Promisa, B.Laidoudib, A.Crigny, B.DuprebT.Langleta. (2015) Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity. *Energy and Buildings*, Volume 88.
- [30] M. Salonvaara, T. Ojanen, A. Holm, H.M. Künzeli, A.N. Karagiozis. (2004) Moisture Buffering Effects on Indoor Air Quality – Experimental and Simulation results. *Proceedings (CD) of the Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings IX International Conference*, Clearwater Beach, FL.
- [31] UNI EN ISO 6946:2008 “Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodo di calcolo”

- [32] D.M. 11 ottobre 2017. “Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici”.
- [33] Decreto legislativo 29 dicembre , n. 311, in materia di "Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/Ce, relativa al rendimento energetico nell'edilizia."
- [34] Teknoring, il portale delle professioni tecniche, (2019), Microclima e comfort termoigrometrico negli uffici: la progettazione.
- [35] Rosa Romano. (2013) Sistemi Di Chiusura A Comportamento Dinamico. Wolters Kluwer Italia.
- [36] Maria Paz Gutierrez. (2016) Lab in the Building/ Building in the Lab? Pluripotent Matter & Bioinspiration. University of California, Berkeley.
- [37] Aedas, (2013). Al Bahr Towers: Aedas. Arch20. Recuperado el 10 diciembre 2020 de <https://www.arch2o.com/al-bahr-towers-aedas/>
- [38] Fabiana Valentini, (2013). Al Bahar Towers, le torri di Abu Dhabi con facciata solare intelligente. Infobuildenergia. Recuperado el 10 diciembre 2020 de <https://www.infobuildenergia.it/progetti/al-bahar-towers-le-torri-di-abu-dhabi-con-facciata-solare-intelligente/>
- [39] Picture of the day: The Kuggen Building in Gothenburg, Sweden. (2015). Twisted Sifter. Recuperado el 10 diciembre 2020 de <https://twistedifter.com/2015/10/kuggen-building-gothenburg-sweden/>
- [40] Chao Chen. (2015). Water reaction. Neo-cha Culture & Creativity in Asia. Recuperado el 10 diciembre 2020 de <http://neocha.com/magazine/water-reaction/>
- [41] Chao Chen. (2015) Chao Chen: Water Reaction. For his final year project at RCA, Chinese product designer Chao Chen took inspiration for the pinecone to develop a water-reacting material that can be used for a lot of applications. Domus.
- [42]Rosaria Agueci (2014). Parete auto-raffrescante: Barcellona sperimenta la prima. Architetturaecosostenibile.it. Recuperado el 15 diciembre 2020 de <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/innovativi/parete-raffrescante-barcellona-135>

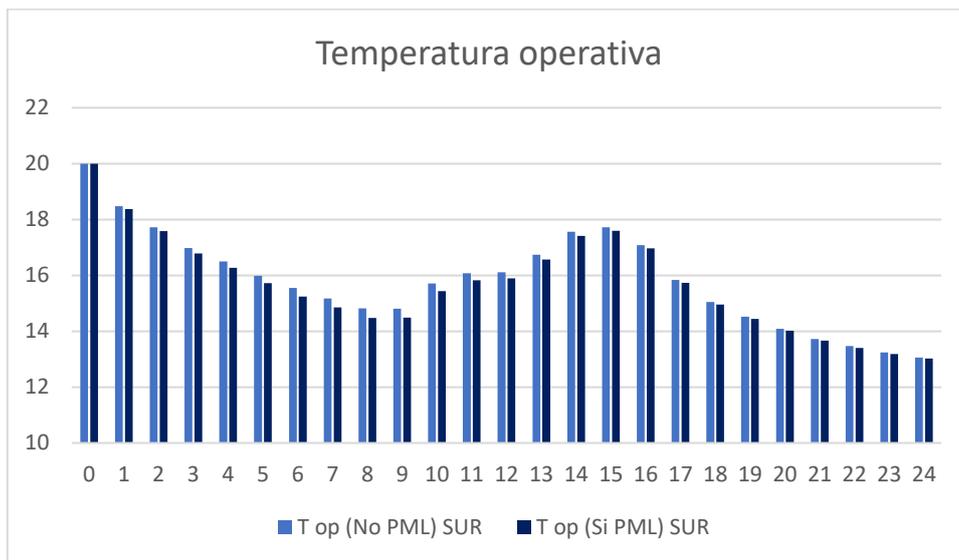
- [43] Yufei Zhang, Lei Wu, Xianfeng Wang, Jianyong Yu & Bin Ding, (2020), Super Hygroscopic Nanofibrous Membrane-Based Moisture Pump for Solar-Driven Indoor Dehumidification. *Nature Communications* 11, 3302.
- [44] Master Climate Solution. (2020) Metodi di deumidificazione. Recuperado el 10 enero 2020 de <http://www.masterheaters.it/metodi-di-deumidificazione.179.html>
- [45] Sijie Wang, Shile Feng, Yongping Hou, Yongmei Zheng. (2015) Controlling of Water Collection Ability by an Elasticity-Regulated Bioinspired Fiber. *Macromol Rapid Commun.*
- [46] Shah, K.W., Huseien, G.F. (2020) Biomimetic self-healing cementitious construction materials for smart buildings. *Biomimetics*, Volume 5.
- [47] Osama Shekhah, Hui Wang, Denise Zacher, Roland A. Fischer, and Christof Woll. (2009) Growth mechanism of metal–organic frameworks: Insights into the nucleation by employing a step-by-step route. *Angewandte Chemie International Edition* Volume 48, Issue 27.
- [48] Fan Zhang, Zhiguang Guo. (2020) Bioinspired materials for water-harvesting: focusing on microstructure designs and the improvement of sustainability. *Materials Advances*.
- [49] Ana Sofia Varela Gasque, Wen Ju. (2018) Molecular Nitrogen-Carbon Catalysts, Solid Metal Organic Framework Catalysts, and Solid Metal/Nitrogen-Doped Carbon (MNC) Catalysts for the Electrochemical CO<sub>2</sub> Reduction. *Advanced Energy Materials* Volume 8, Issue 30.
- [50] Shichao Zhang, Hui Liu, Ning Tang, Jianlong Ge, Jianyong Yu Bin Ding. (2019) Direct Electronetting Of High-Performance Membranes Based on Self-Assembled 2D Nanoarchitected Networks. *Nature Communications* 10, 1458.
- [51] Buer, A., Ugbolue, S. C., Warner, S. B. (2001) Electrospinning and Properties of Some Nanofibers. *Textile Research Journal*.
- [52] Federico Bartolo Electrospinning. *Chimica-online.it*. Recuperado el 10 enero 2020 de <https://www.chimica-online.it/materiali/fibre-tessili/electrospinning.htm>

- [53] Yibo Dou , Wenjing Zhang ,Andreas Kaiser. (2019) Electrospinning of Metal–Organic Frameworks for Energy and Environmental. *Advanced Science* Volume 7, Issue 3.
- [54] Johnson E. Efome, Dipak Rana, Takeshi Matsuura, Christopher Q. Lana. (2018) Metal–organic frameworks supported on nanofibers to remove heavy metals. *Journal of Materials Chemistry A*.
- [55] Wahiduzzaman, Mujibur R. Khan, Spencer Harp, Jeffrey Neumann, Quazi Nahida Sultana. (2018) Processing and Performance of MOF (Metal Organic Framework)-Loaded PAN Nanofibrous Membrane for CO<sub>2</sub> Adsorption. *J. of Materi Eng and Perform* 25, 1276–1283
- [56] Garzón-Tovar, L., Pérez-Carvajal, J., Imaz, I., Maspoch, D. (2017) Composite salt in porous metal-organic frameworks for adsorption heat transformation. *Advanced Functional Materials* Volume 27, Issue 21.
- [57] Toshinori Tsuru, Ryousuke Igi, Masakoto Kanezashi, Tomohisa Yoshioka, Shinji Fujisaki, Yuji Iwamoto. (2011) Permeation properties of hydrogen and water vapor through porous silica membranes at high temperatures. *AIChE Journal* Volume 57, Issue 3.
- [58] Li Daia, Ye Yaoa, Fengjing Jiangb, Xueqi Yangc, Xinjie Zhouc, Peng Xiong. (2017) Sorption and regeneration performance of novel solid desiccant based on PVA-LiCl electrospun nanofibrous membrane. *Polymer Testing*, Volume 64.

# Anexo

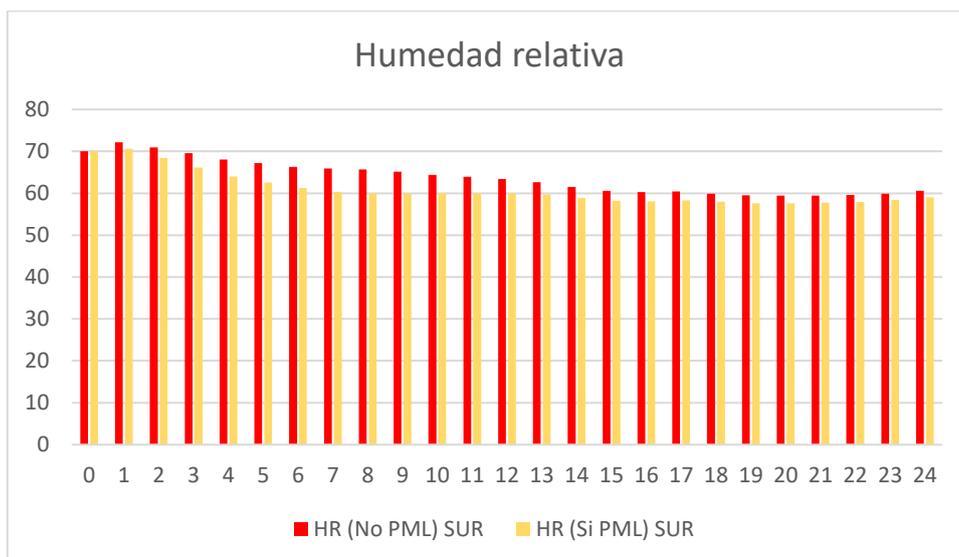
## A. Enero

En enero, exponiendo el panel hacia el sur se obtiene:



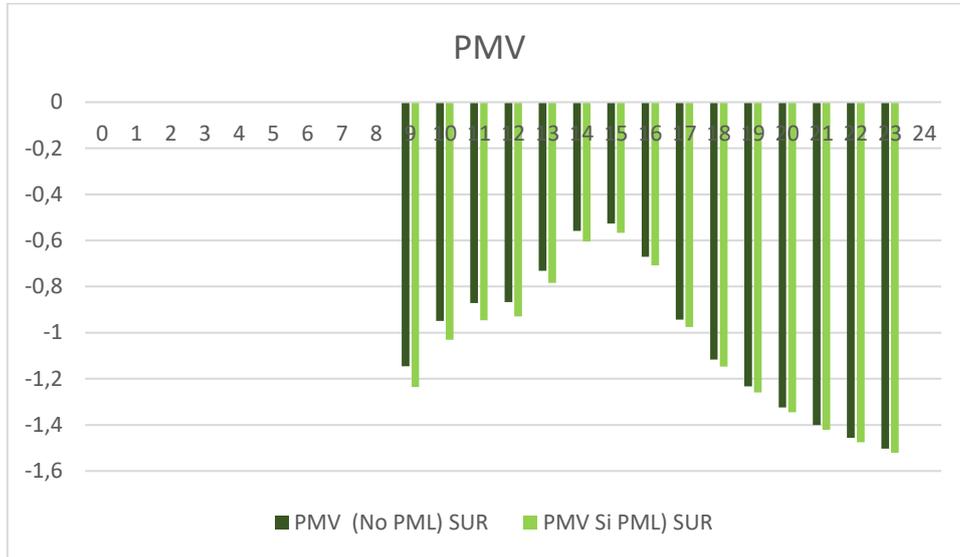
A1. Evolución de la temperatura operando enero 2020 exposición Sur

Con la activación del panel, la temperatura operativa disminuye en todas las horas del día con respecto a las condiciones iniciales.



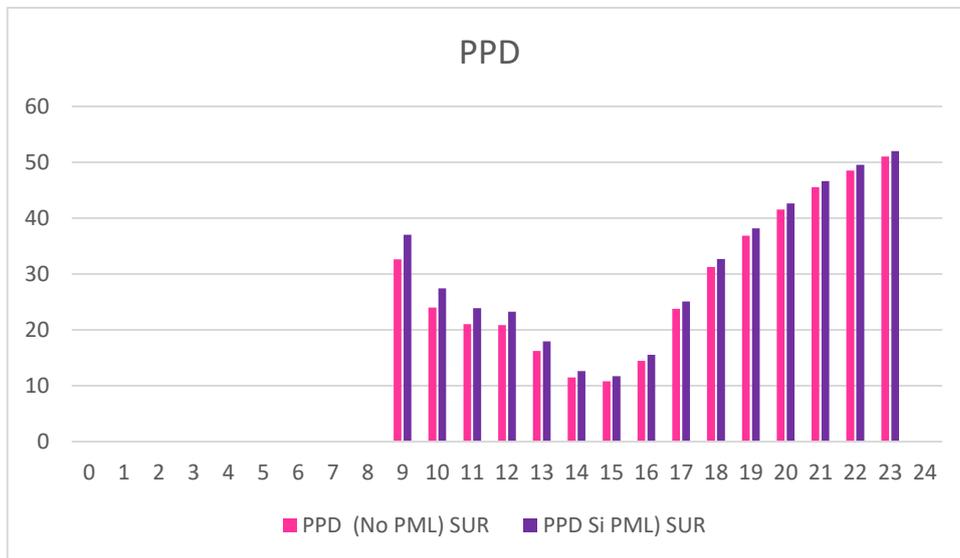
A2. Evolución humedad relativa enero 2020 exposición Sur

La humedad relativa con la activación del panel disminuye alcanzando valores inferiores en un 60% de las 13 a las 24.



A3. Evolución PMV enero 2020 exposición Sur

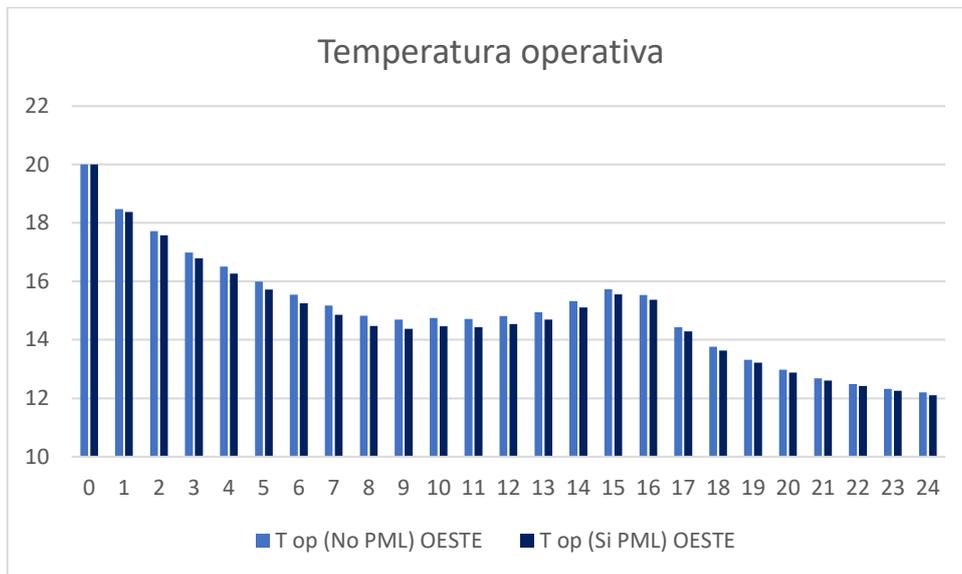
Los valores de PMV disminuyen considerablemente activando el panel, alcanzando picos que superan los -1,4, por lo tanto, el uso del panel va a aumentar el discomfort para los usuarios con relación a las condiciones iniciales.



A4. Evolución PPD enero 2020 exposición Sur

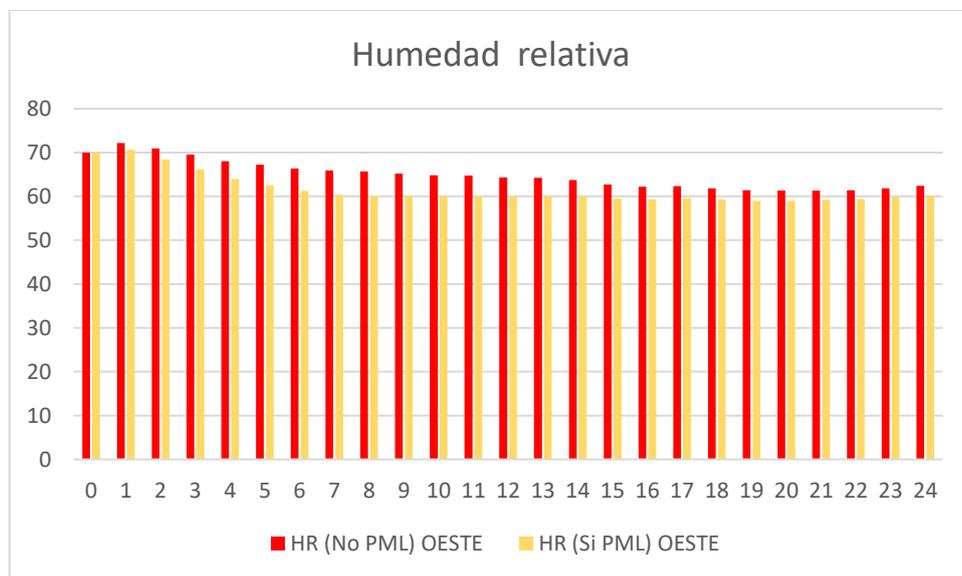
También para los valores de PPD se detecta un aumento del discomfort durante todo el día ya que el PPD aumenta con el uso del panel.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



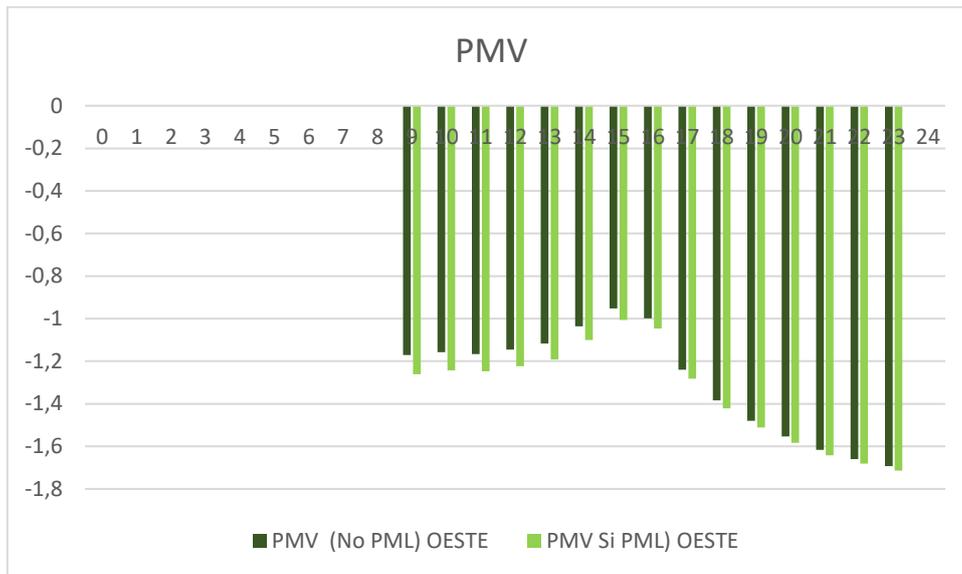
A5. Evolución de la temperatura operando enero 2020 exposición Oeste

Con la activación del panel la temperatura operativa disminuye en todas las horas del día con respecto a la temperatura sin la activación del panel.



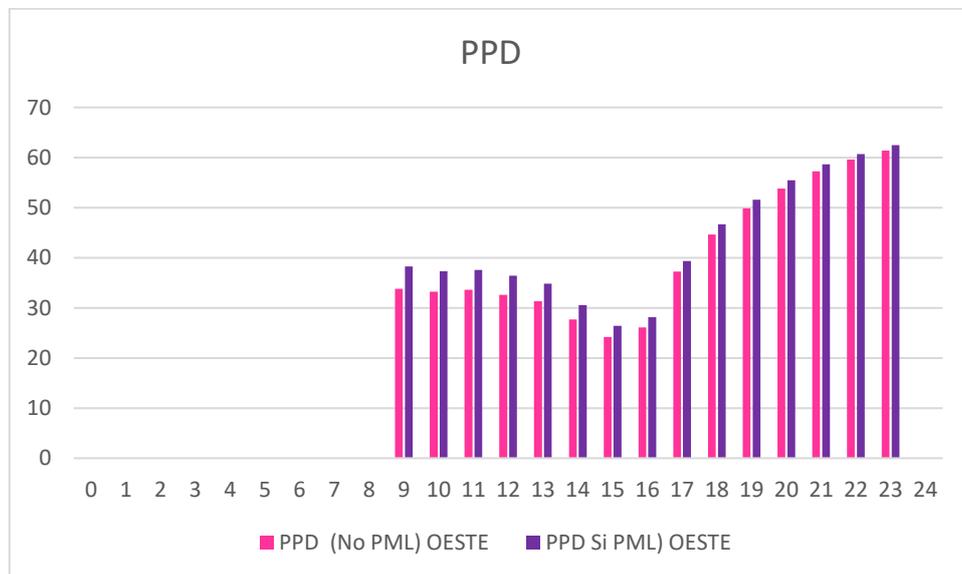
A6. Evolución humedad relativa enero 2020 exposición Oeste

La humedad relativa con la activación del panel disminuye alcanzando valores inferiores en un 60% de las 14 a las 24.



A7. Evolución PMV enero 2020 exposición Oeste

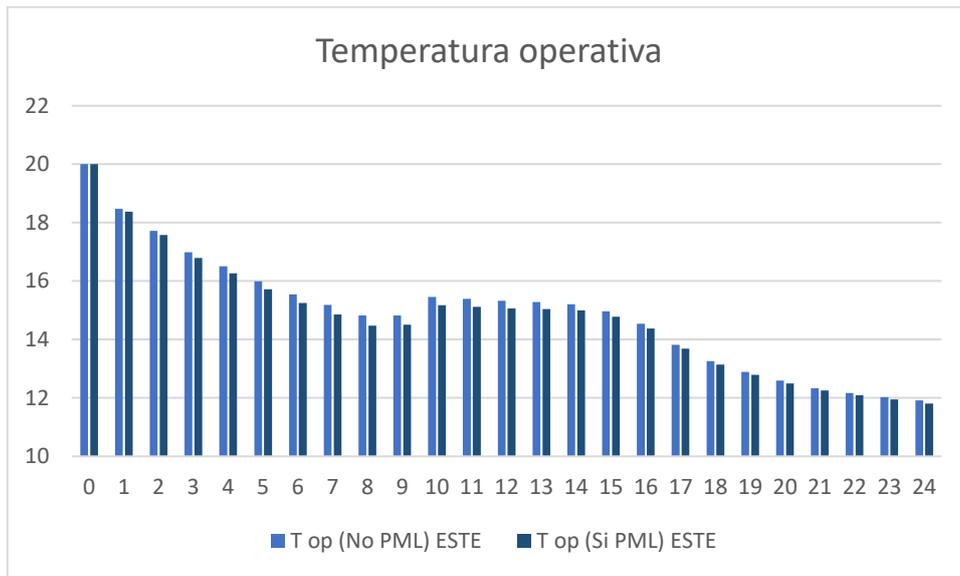
Los valores de PMV disminuyen activando el panel, alcanzando picos que superan los -1.6, por lo tanto, con relación al caso anterior, el uso del panel va a aumentar más el discomfort para los usuarios.



A8. Evolución PPD enero 2020 exposición Oeste

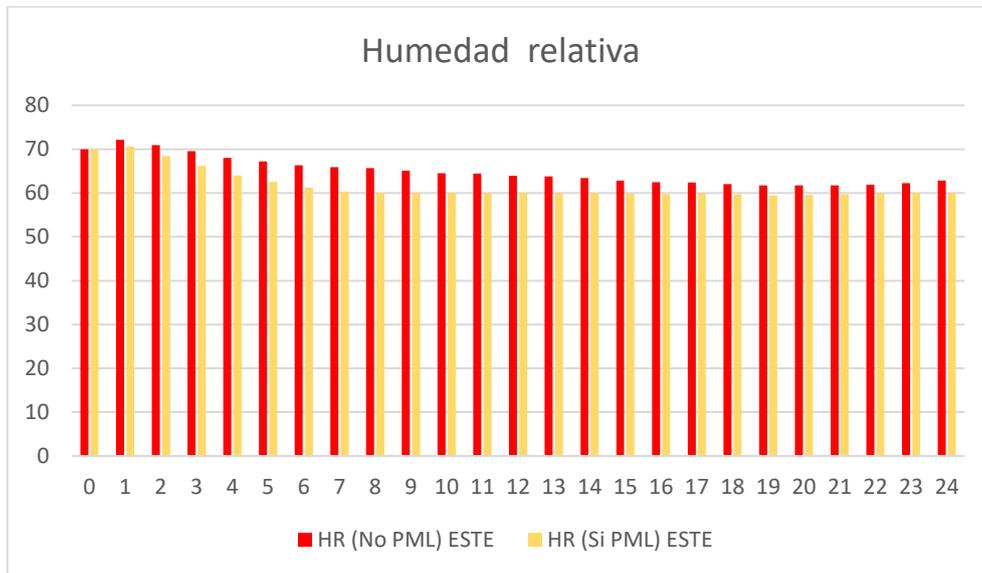
Los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, como se ha señalado anteriormente, un discomfort para los ocupantes.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



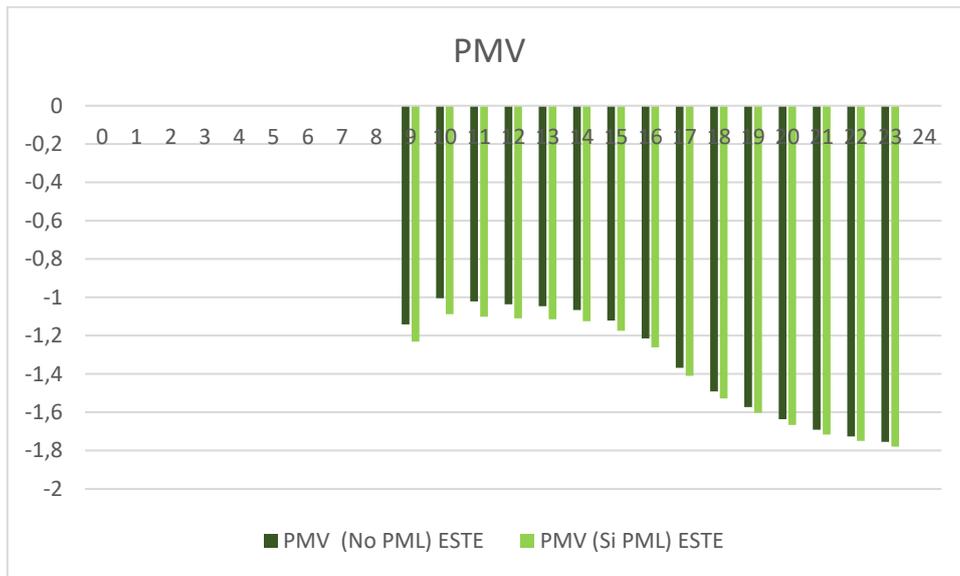
A9. Evolución de la temperatura operando enero 2020 exposición Este

La temperatura operativa también en este caso disminuye en cualquier momento del día con la activación del panel con respecto a las condiciones iniciales.



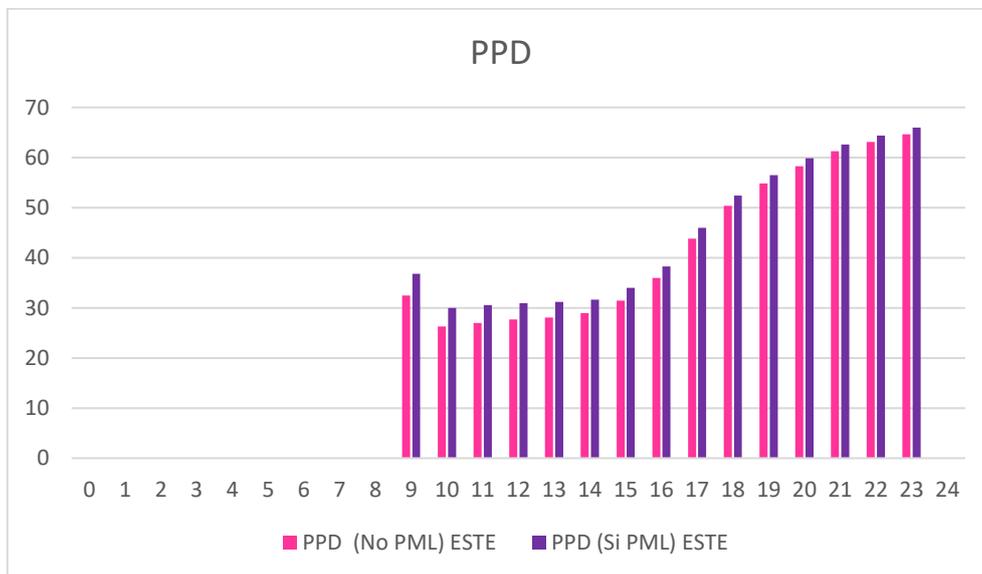
A10. Evolución humedad relativa enero 2020 exposición Este

La humedad relativa con la acción del panel disminuye alcanzando valores inferiores en un 60% de las 8 a las 24.



A11. Evolución PMV enero 2020 exposición Este

Los valores de PMV disminuyen activando el panel, alcanzando picos más elevados con relación a los casos anteriores que llegan casi a los -1.8, por lo tanto, el uso del panel incluso en esta situación va a aumentar más el discomfort para los usuarios.

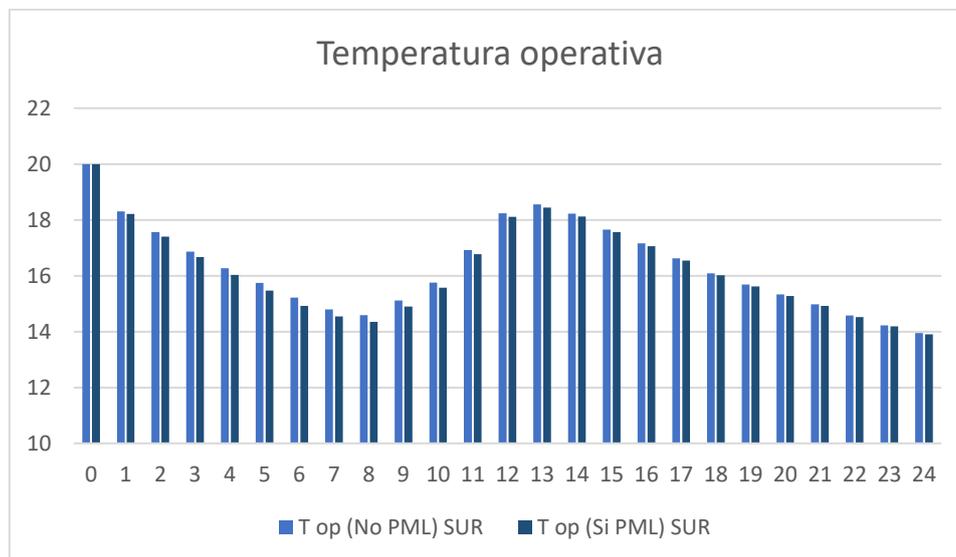


A12. Evolución PPD enero 2020 exposición Este

También los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, como se ha señalado anteriormente, un discomfort para los ocupantes.

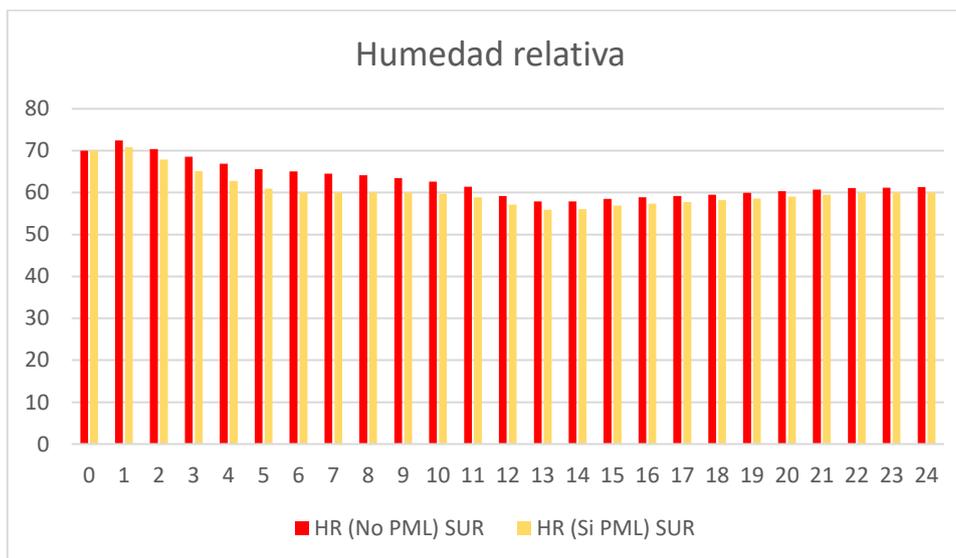
## B. Febrero

En el mes de febrero, con la orientación del panel hacia el sur se obtienen los siguientes resultados:



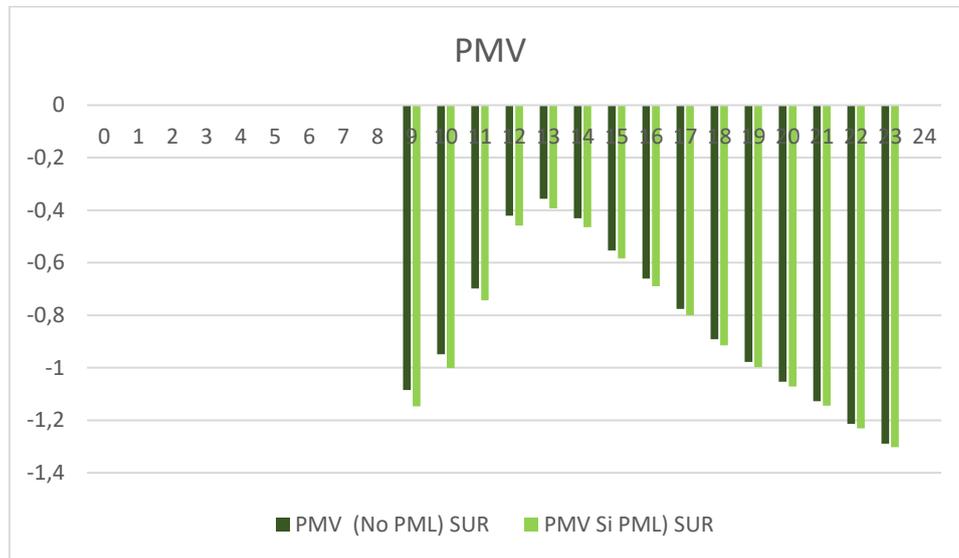
B1. Evolución de la temperatura operando febrero 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye en todas las horas del día con el uso del panel en comparación con las condiciones iniciales.



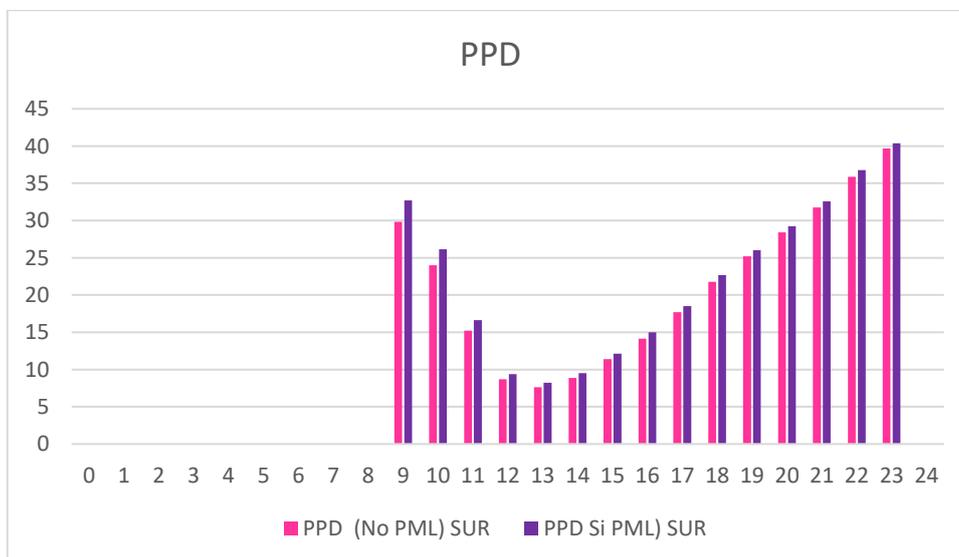
B2. Evolución humedad relativa febrero 2020 exposición Sur

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 8 a las 21.



#### B3. Evolución PMV febrero 2020 exposición Sur

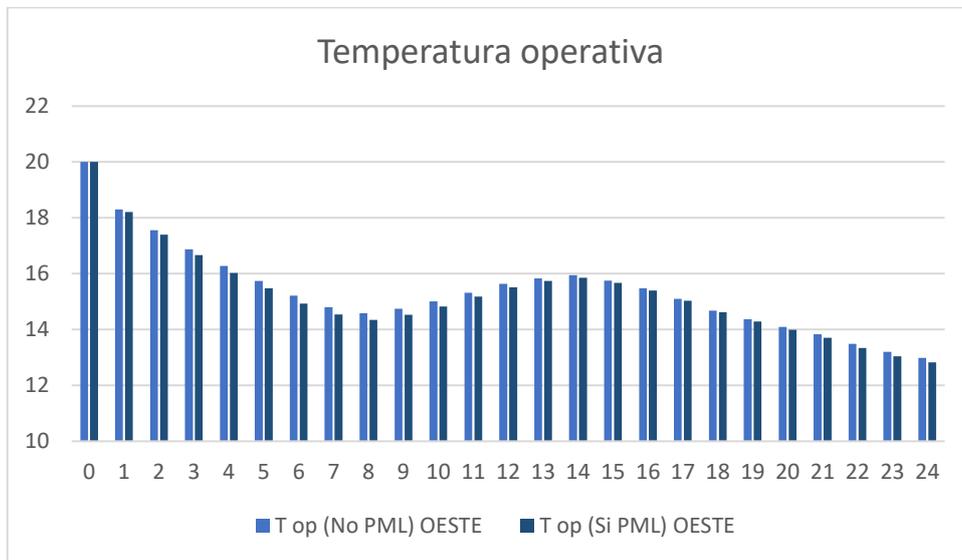
Los valores de PMV disminuyen activando el panel alcanzando valores que superan los -1,2, generando así una disminución del confort interno.



#### B4. Evolución PPD febrero 2020 exposición Sur

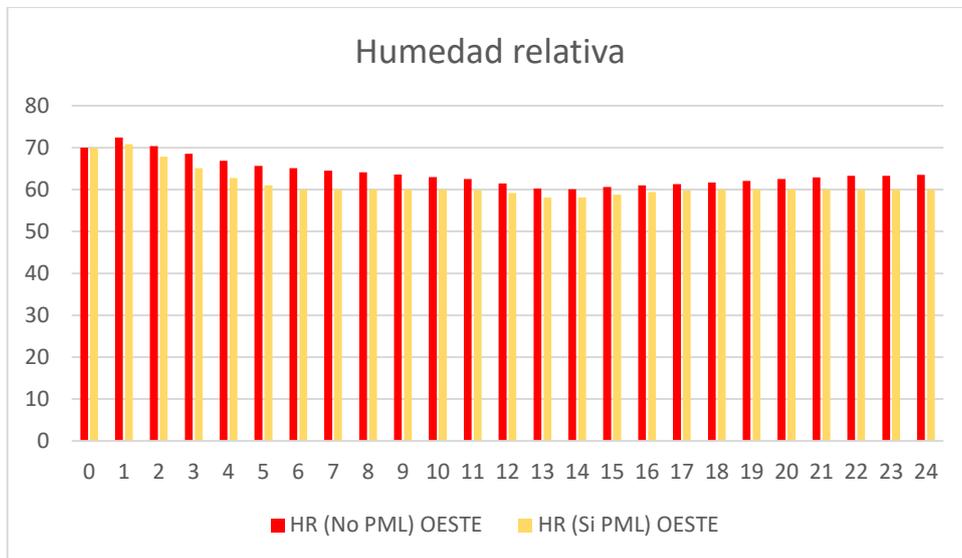
Incluso los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del discomfort para los ocupantes.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



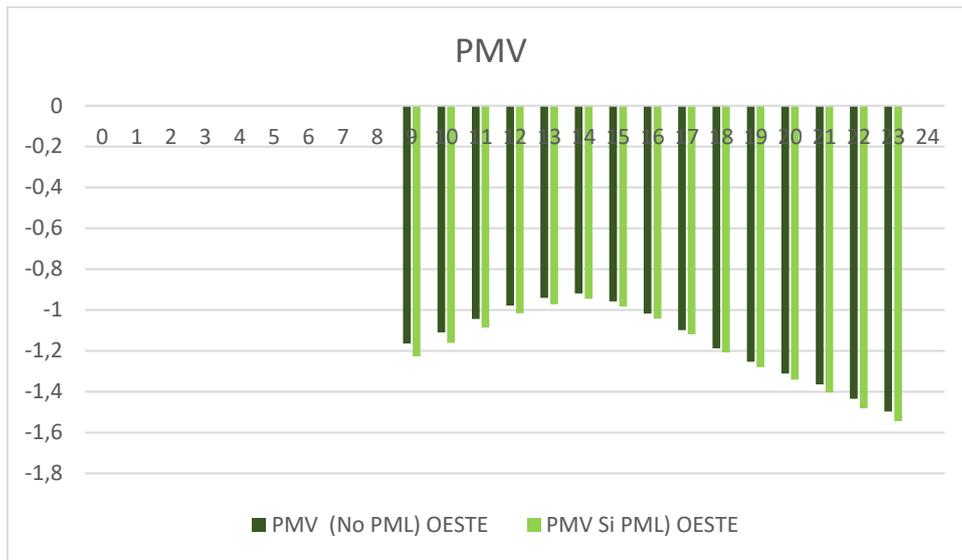
B5. Evolución de la temperatura de funcionamiento febrero 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa es inferior en la situación en que el mecanismo del panel está activo y, en general, se observa una disminución global de la temperatura.



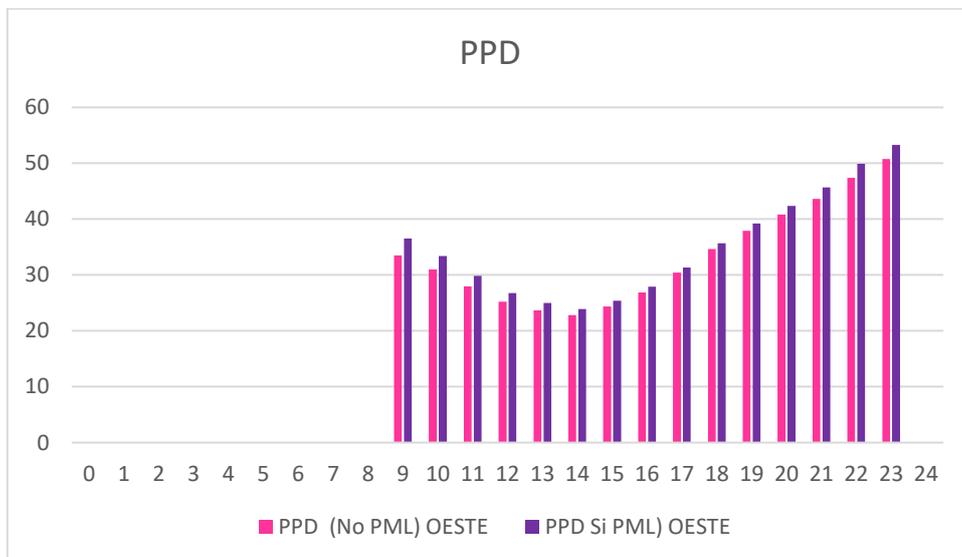
B6. Evolución humedad relativa febrero 2020 exposición Oeste

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 8 a las 22.



B7. Evolución PMV febrero 2020 exposición Oeste

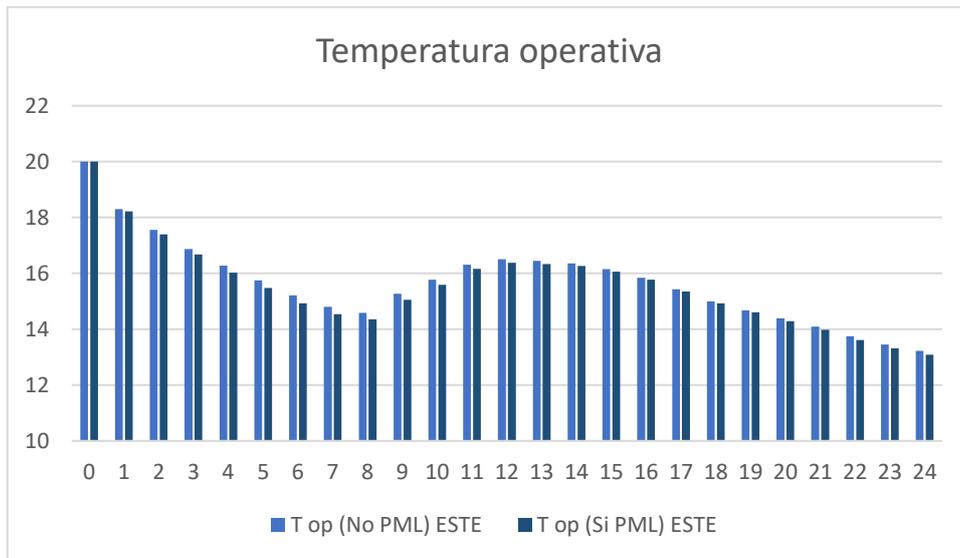
Los valores de PMV disminuyen activando el panel alcanzando valores mayores de discomfort con relación a los anteriores que superan los -1.4.



B8. Evolución PPD febrero 2020 exposición Oeste

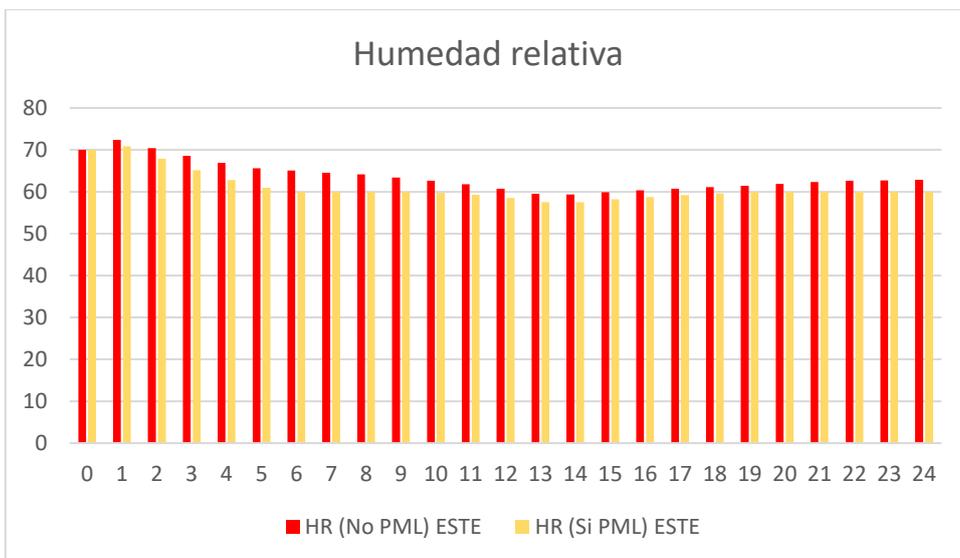
Incluso los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del mayor discomfort para los ocupantes con relación al caso anterior superando el 50% de PPD a las 23.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



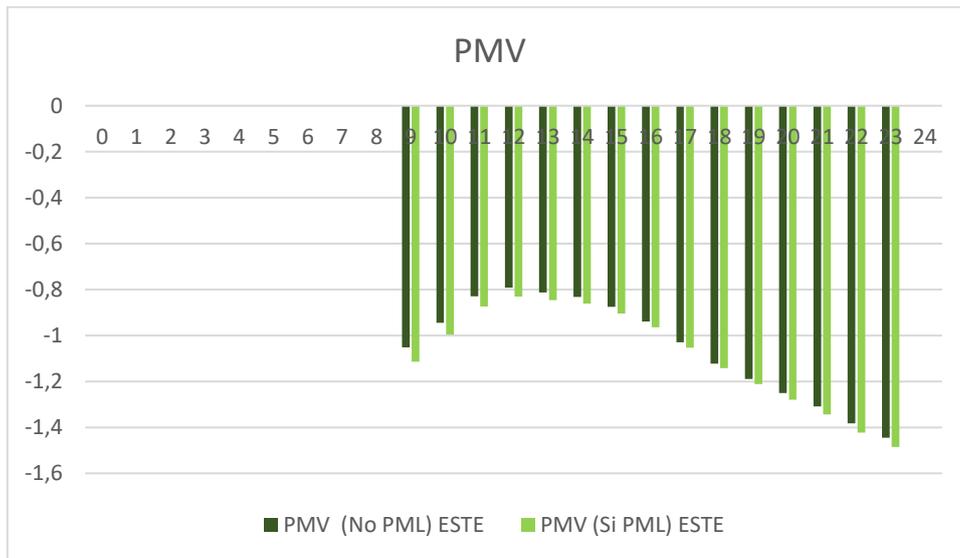
B9. Evolución de la temperatura operando febrero 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye con la activación del panel durante todo el día en comparación con las condiciones iniciales.



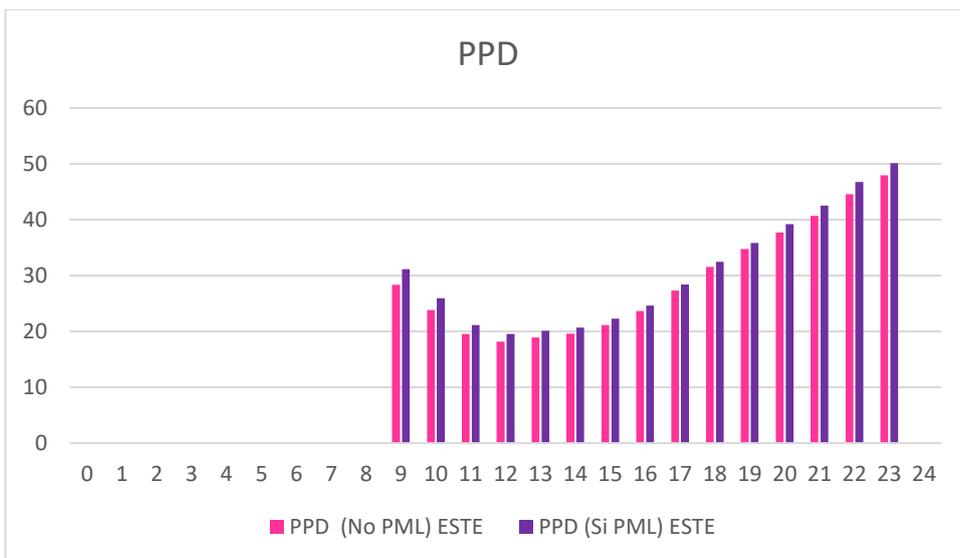
B10. Evolución humedad relativa febrero 2020 exposición Este

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 8 a las 22.



B11. Evolución PMV febrero 2020 exposición Este

Los valores de PMV disminuyen más activando el panel alcanzando valores que superan los -1,4, generando así una disminución del confort interno.

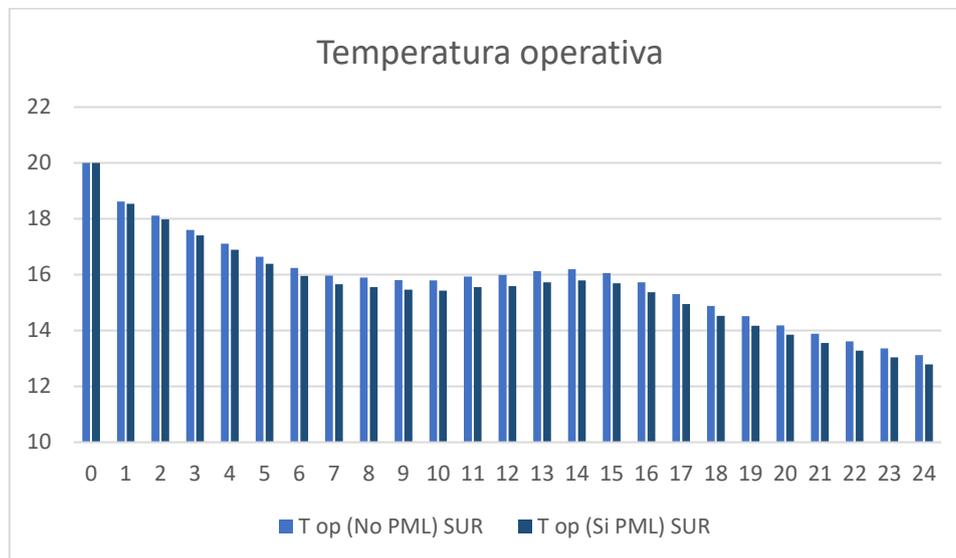


B12. Evolución PPD febrero 2020 exposición Este

Incluso los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del disconfort para los ocupantes rozando el 50% de PPD a las 23 horas.

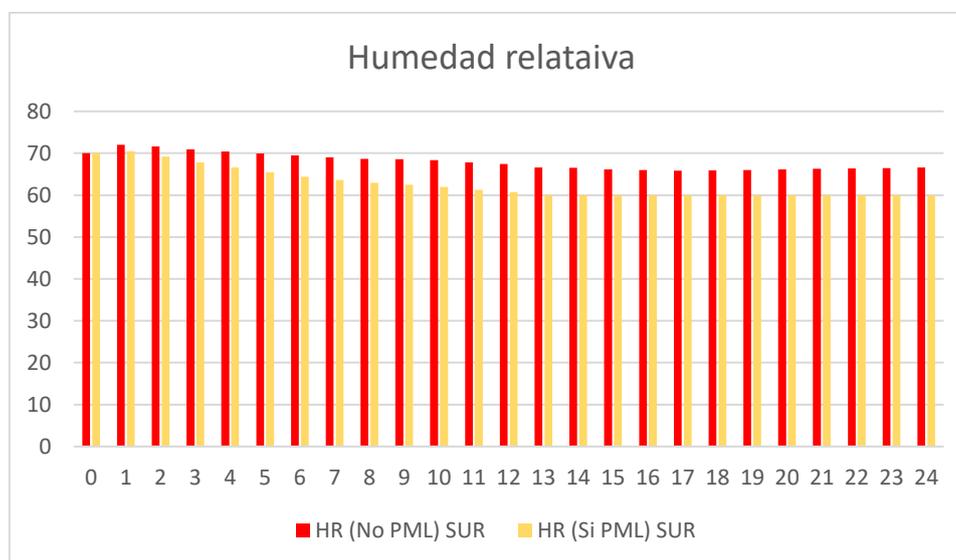
## C. Marzo

En marzo, exponiendo el panel hacia el sur:



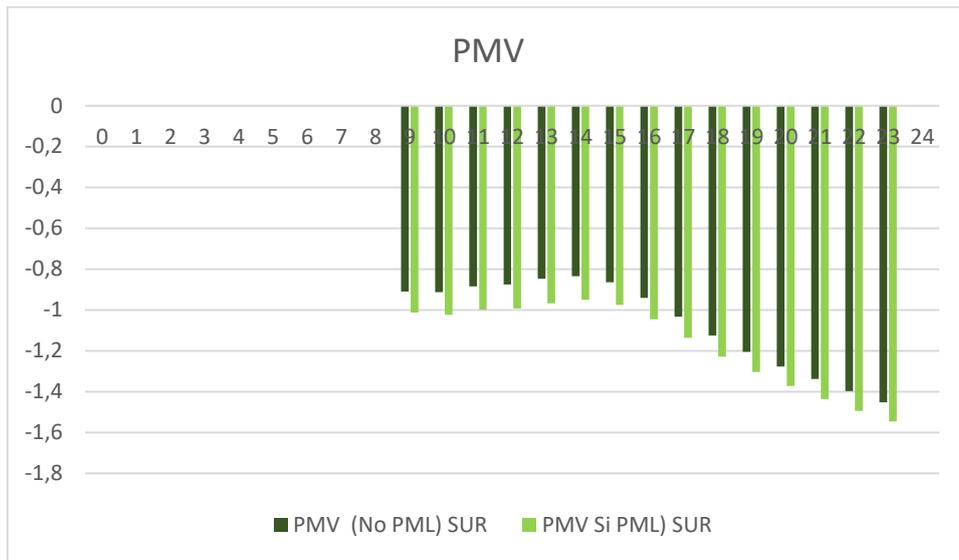
C1. Evolución de la temperatura operando marzo 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye durante todo el día activando el funcionamiento del panel con respecto a las condiciones iniciales.



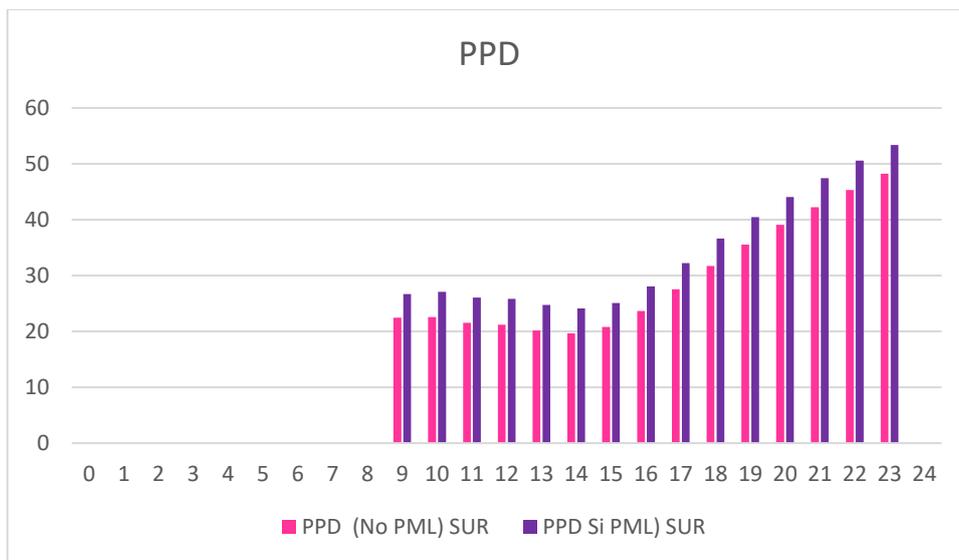
C2. Evolución humedad relativa marzo 2020 exposición Sur

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 13 a las 22.



C3. Evolución PMV marzo 2020 exposición Sur

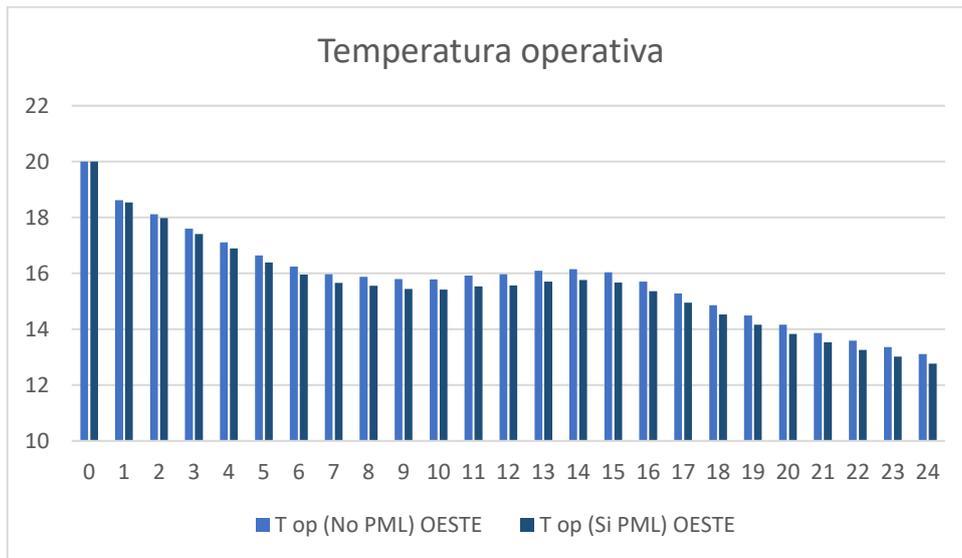
Los valores de PMV disminuyen activando el panel alcanzando valores que superan los -1,4, generando así una disminución del confort interno.



C4. Evolución PPD marzo 2020 exposición Sur

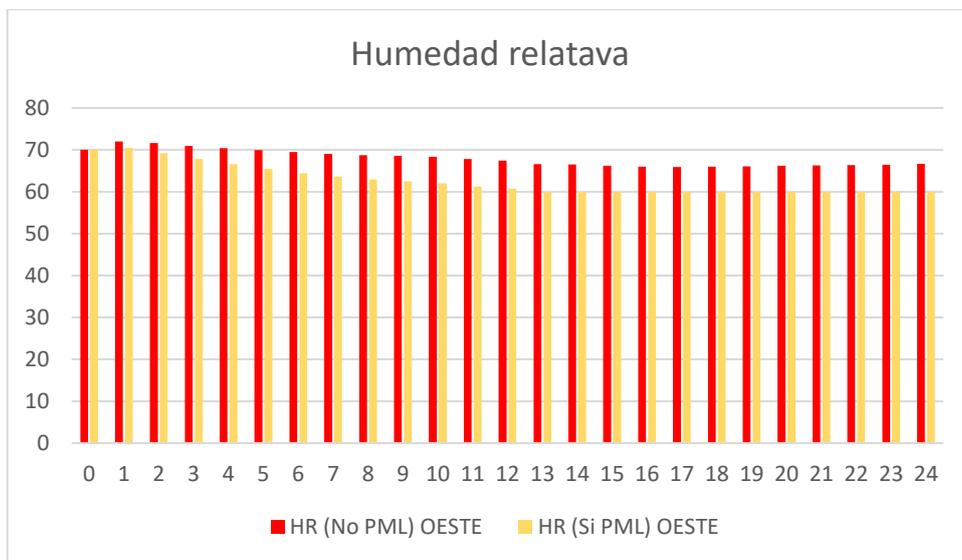
Incluso los valores de PPD aumentan con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del discomfort para los ocupantes.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



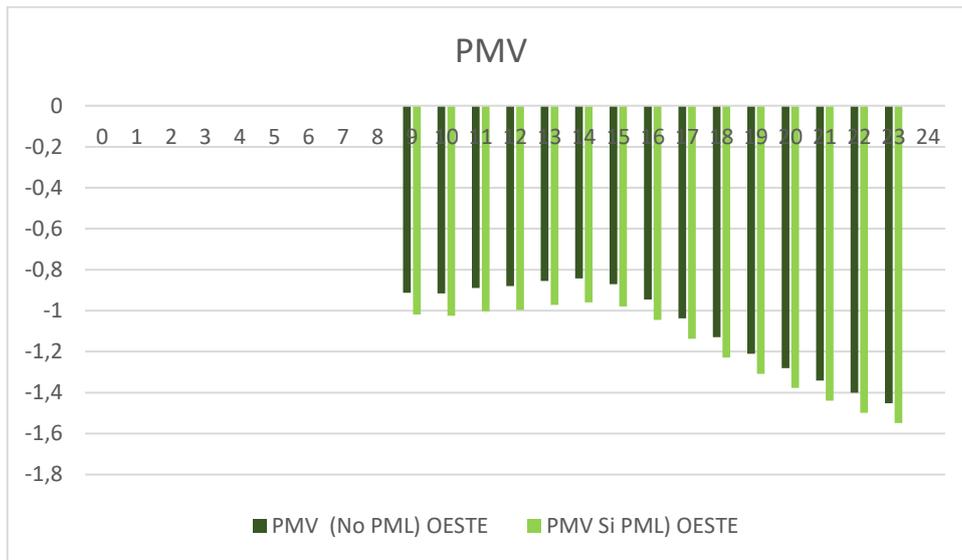
C5. Evolución de la temperatura operando marzo 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa también en este caso disminuye durante todo el día activando el funcionamiento del panel con respecto a las condiciones iniciales.



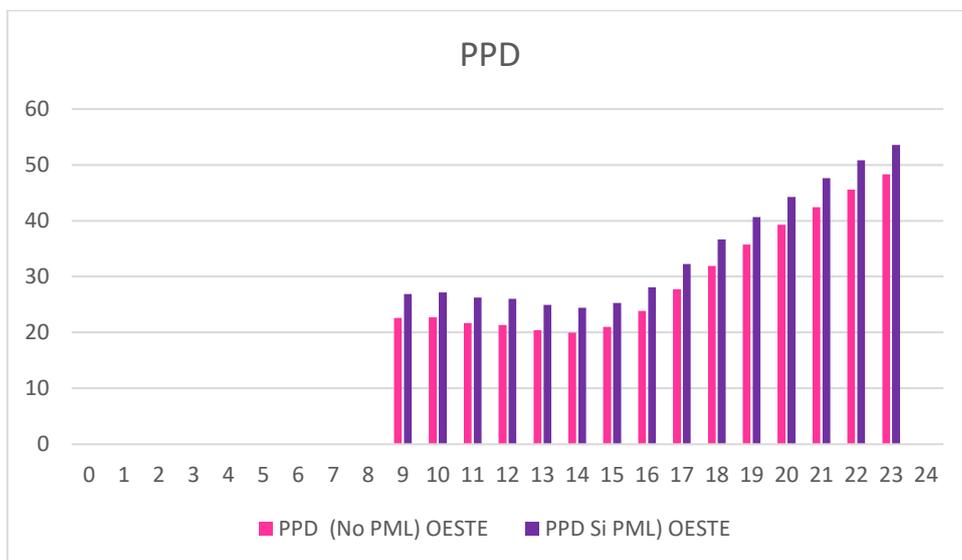
C6. Evolución de la humedad relativa marzo 2020 exposición Oeste

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 13 a las 22.



C7. Evolución PMV marzo 2020 exposición Oeste

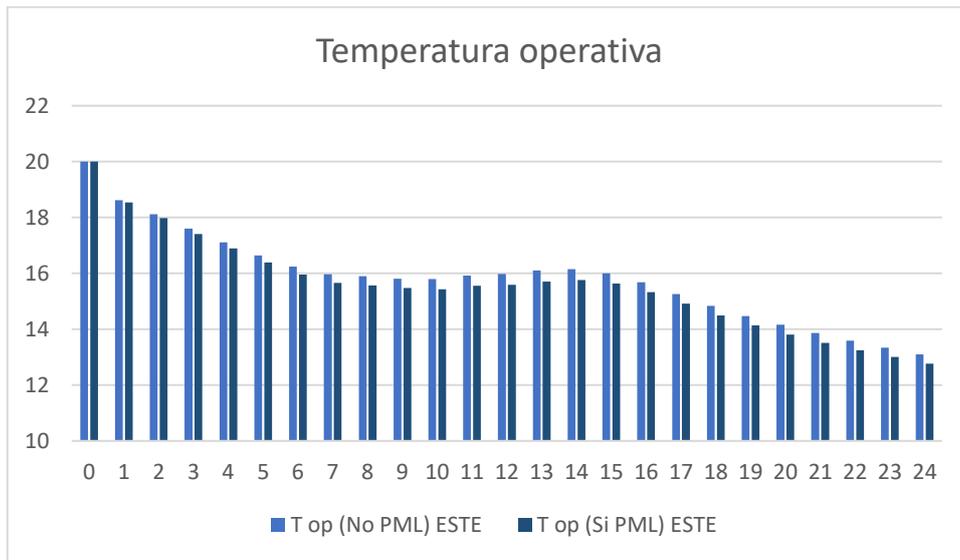
Los valores de PMV aumentan activando el panel alcanzando valores que superan los -1,4, generando así una disminución del confort interno igual a la situación anterior.



C8. Evolución PPD marzo 2020 exposición Oeste

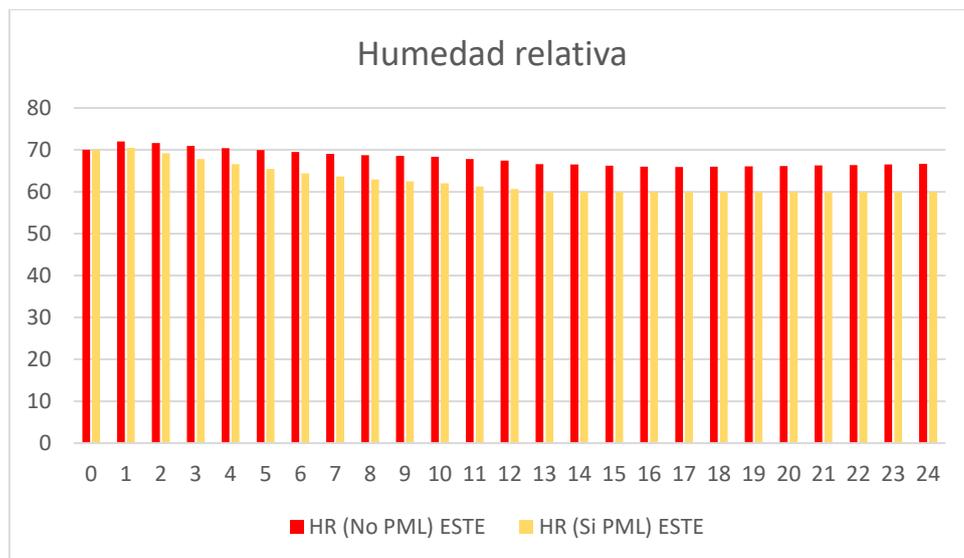
También los valores de PPD aumentan como en el caso anterior con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del discomfort para los ocupantes.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



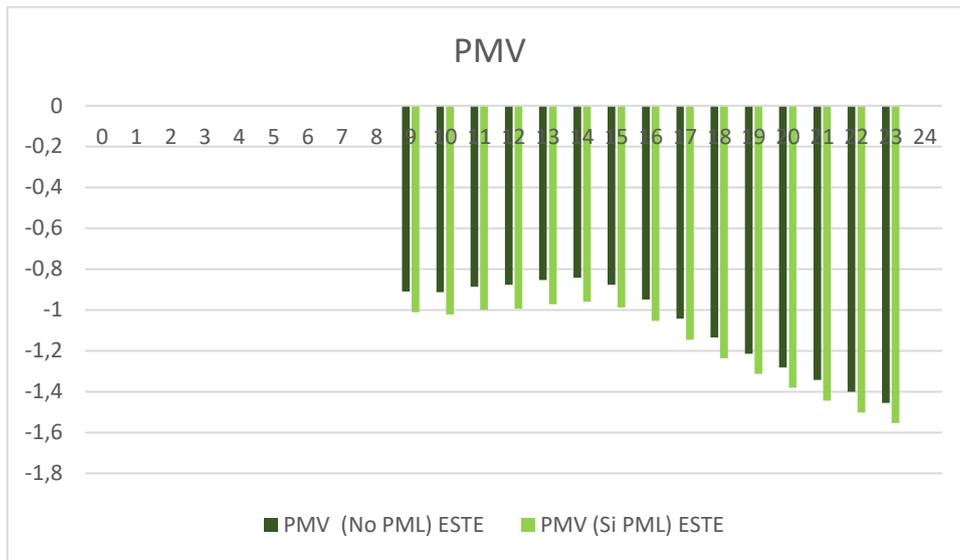
C9. Evolución de la temperatura operando marzo 2020 exposición Este

La temperatura operativa también en este caso disminuye durante todo el día activando el funcionamiento del panel.



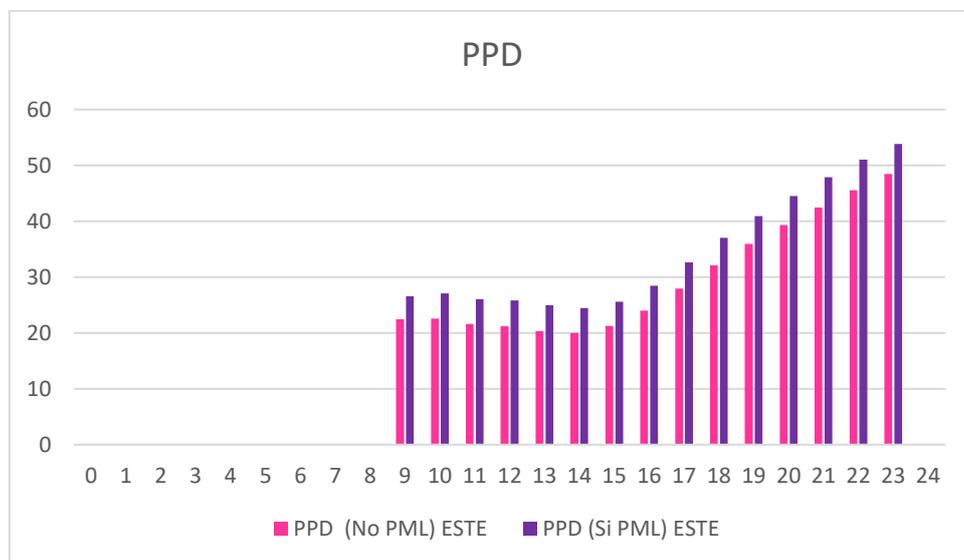
C10. Tendencia humedad relativa marzo 2020 exposición Este

También la humedad relativa disminuye activando el panel alcanzando valores inferiores al 60% de las 13 a las 22.



C11. Evolución PMV marzo 2020 exposición Este

Los valores de PMV disminuyen activando el panel alcanzando valores que superan los -1,4, generando así una disminución del confort interno igual a la situación anterior.

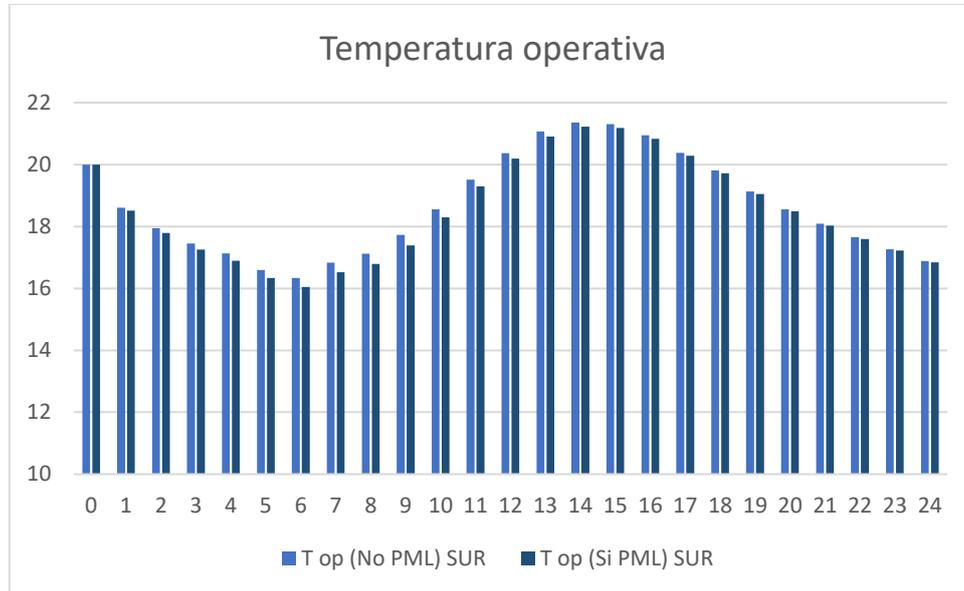


C12. Evolución PPD marzo 2020 exposición Este

También los valores de PPD aumentan como en el caso anterior con el uso del panel en todas las horas del día generando, un aumento del discomfort para los ocupantes.

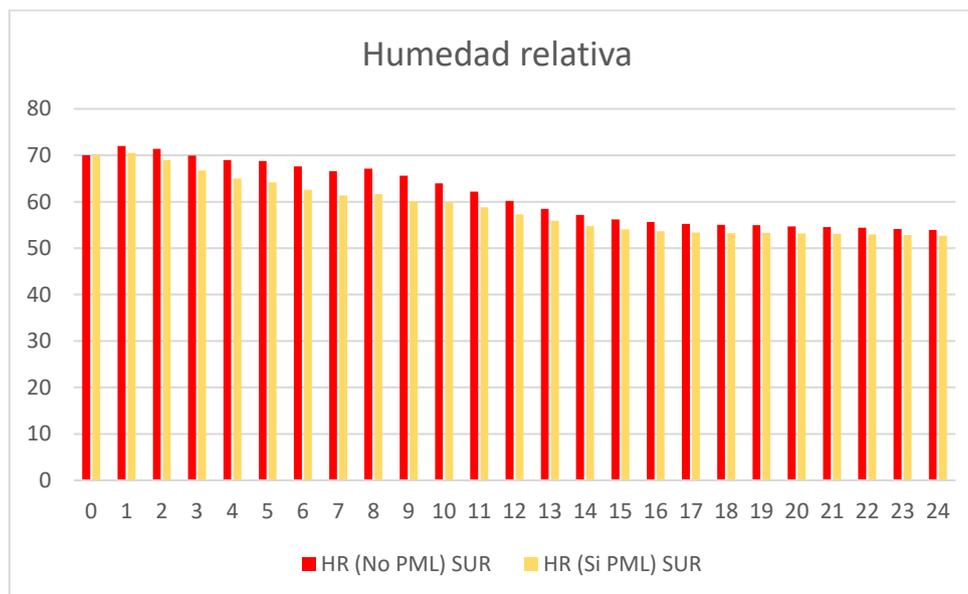
## D. Abril

En abril exponiendo el panel hacia el sur:



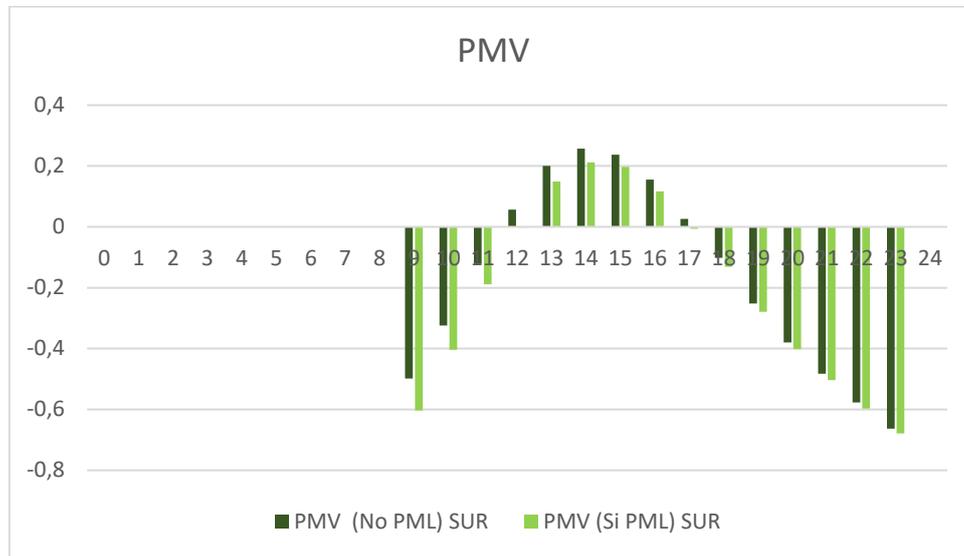
D1. Evolución de la temperatura de funcionamiento abril 2020 exposición Sur

La temperatura operativa permanece prácticamente constante excepto de las 5 a las 11 donde se nota una disminución mayor activando el panel con relación a las condiciones iniciales.



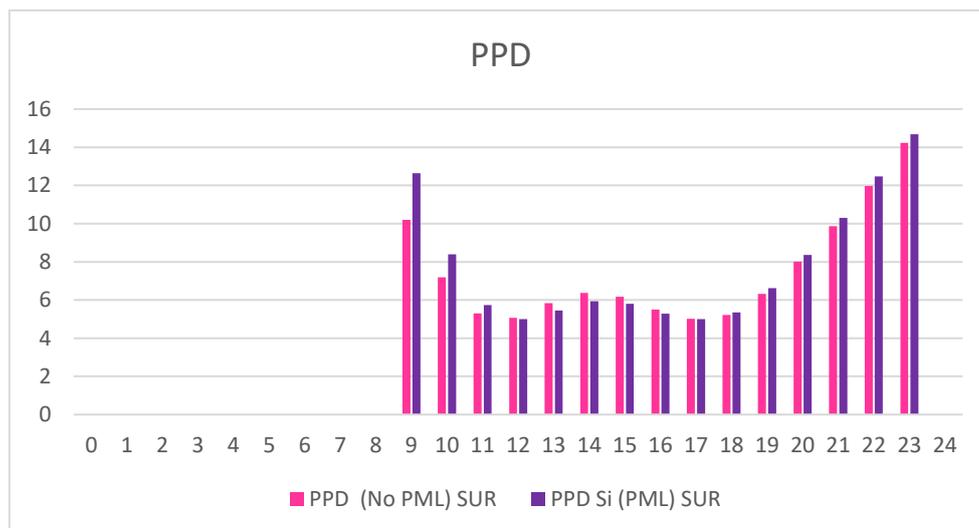
D2. Evolución de la humedad relativa abril 2020 Exposición Sur

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 50% de las 15 a las 24.



D3. Evolución PMV abril 2020 exposición Sur

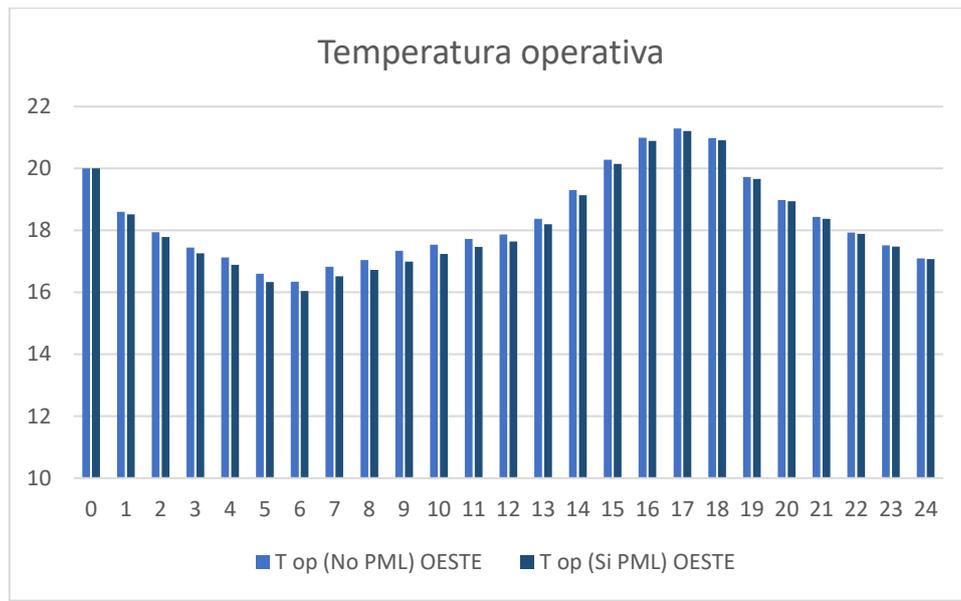
En comparación con los meses anteriores se observa un nivel de confort globalmente mejor. Además, de las 12 a las 17 el índice PMV disminuye, en el lado positivo, activando el panel con respecto a la condición inicial y esto produce un aumento del confort interno con relación al resto de horas del día donde se tiene un aumento del índice PMV y por lo tanto un relativo aumento del discomfort.



D4. Evolución PPD abril 2020 exposición Sur

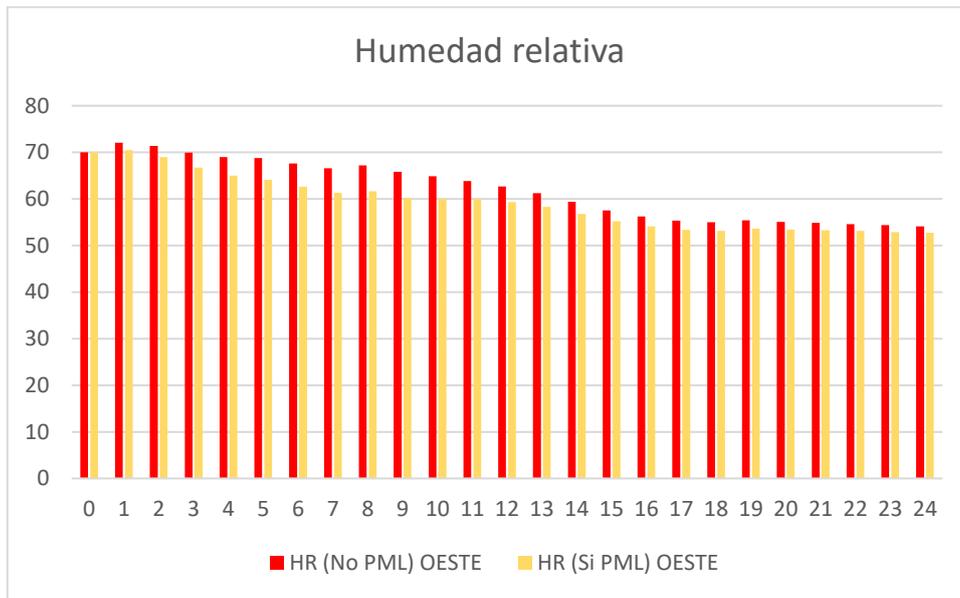
Los valores de PPD se contienen a pesar de los meses anteriores, y en general de las 12 a las 17 con el uso del panel este valor disminuye generando un aumento del confort interno con respecto al resto del día en que dicho índice aumenta.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



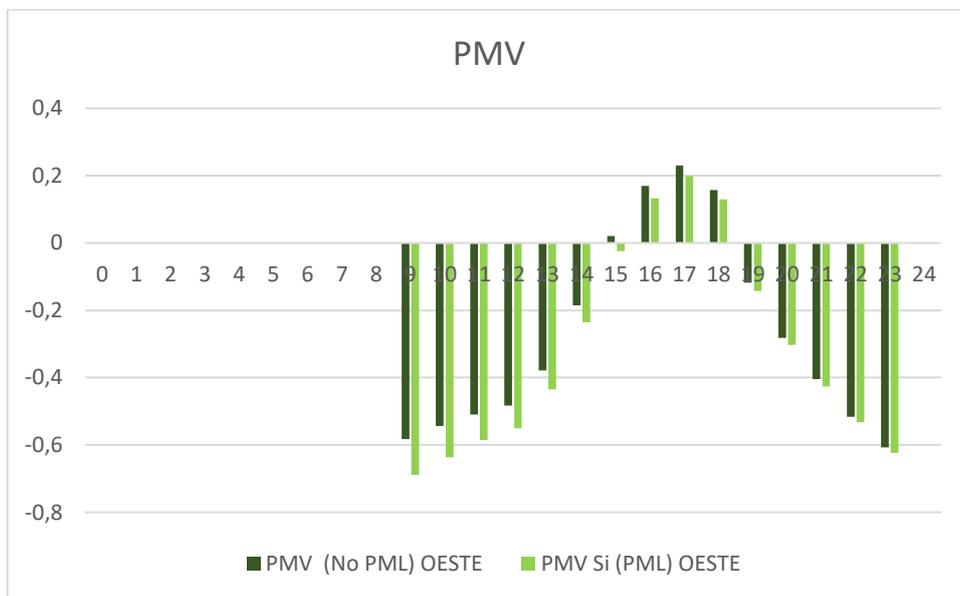
D5. Evolución de la temperatura de funcionamiento abril 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa se mantiene casi constante excepto de las 4 a las 15 donde se nota una disminución mayor activando el panel.



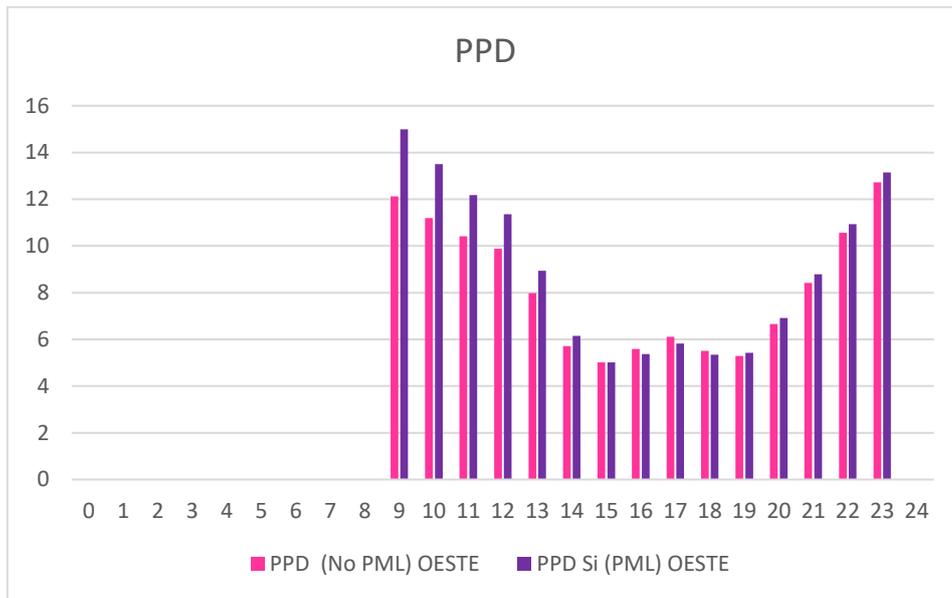
D6. Evolución de la humedad relativa abril 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 50% de las 15 a las 24.



D7. Evolución PMV abril 2020 exposición Oeste

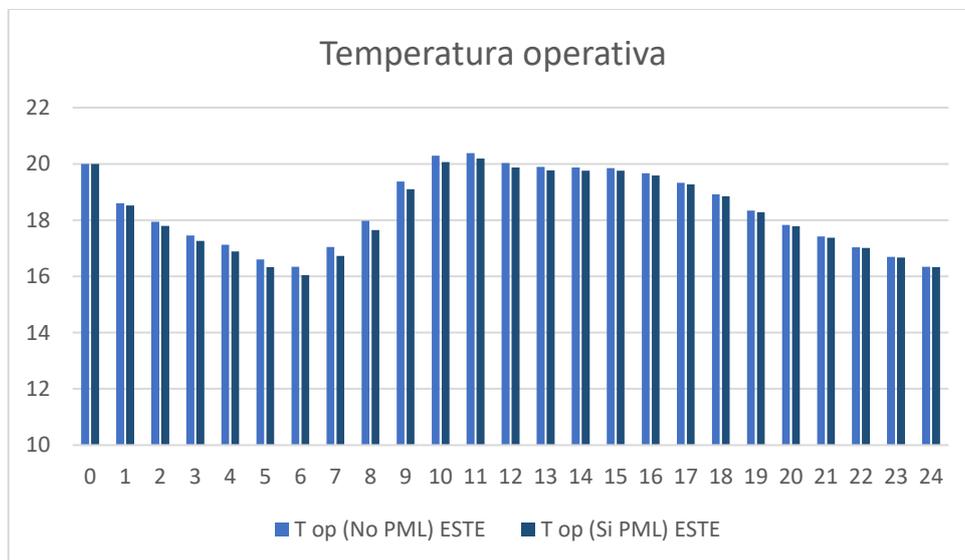
También en este caso, el índice PMV tiene un valor que se aproxima más a la condición de neutralidad térmica, además activando el panel se observa que de las 15 a las 18 hay una disminución, en el lado positivo, lo que resulta en un aumento del nivel de confort interno en comparación con las horas restantes del día.



D8. Evolución PPD abril 2020 exposición Oeste

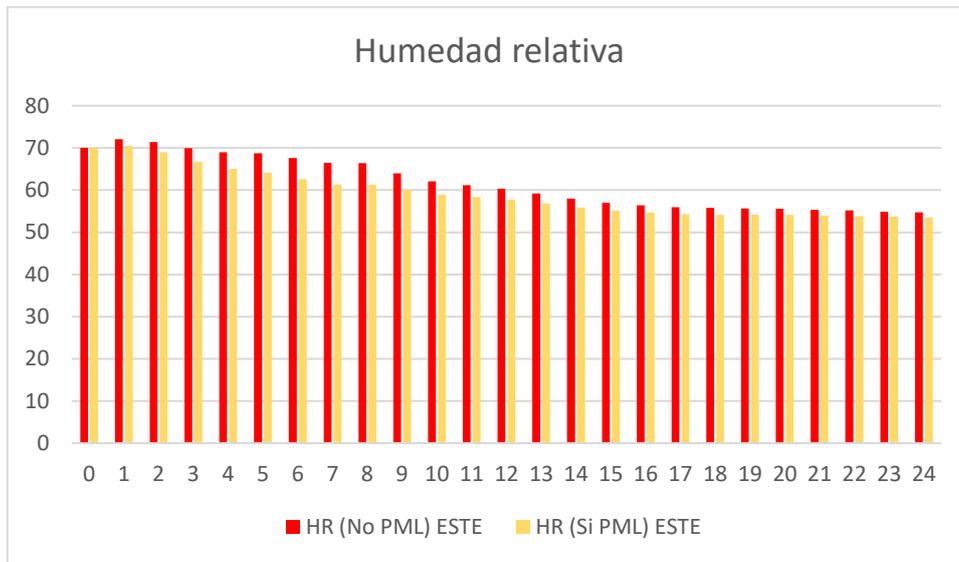
Lo mismo sucede con el índice PPD, que disminuye de las 15 a las 18 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



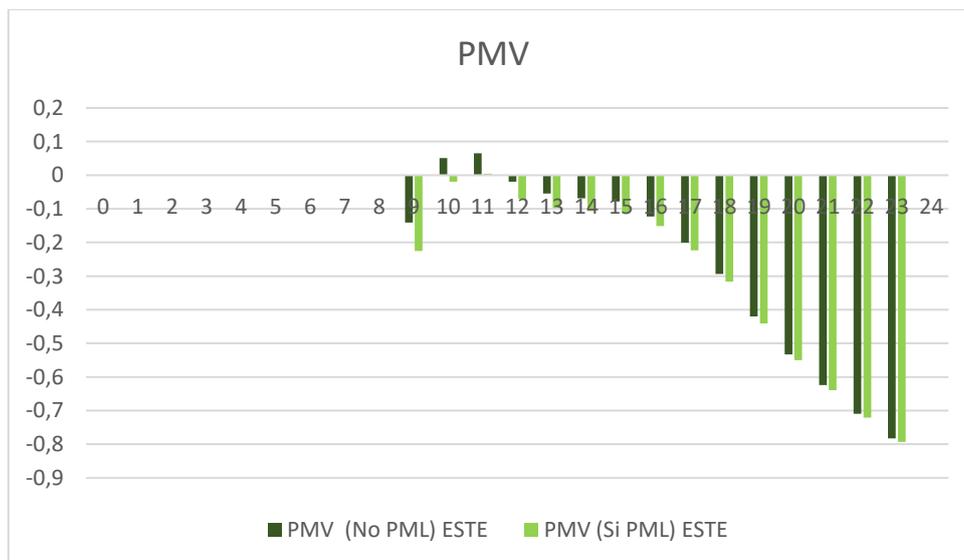
D9. Evolución de la temperatura de funcionamiento abril 2020 exposición Este

Se registra una temperatura operativa prácticamente constante con ligeras disminuciones de las 6 a las 9 con el funcionamiento activo del panel.



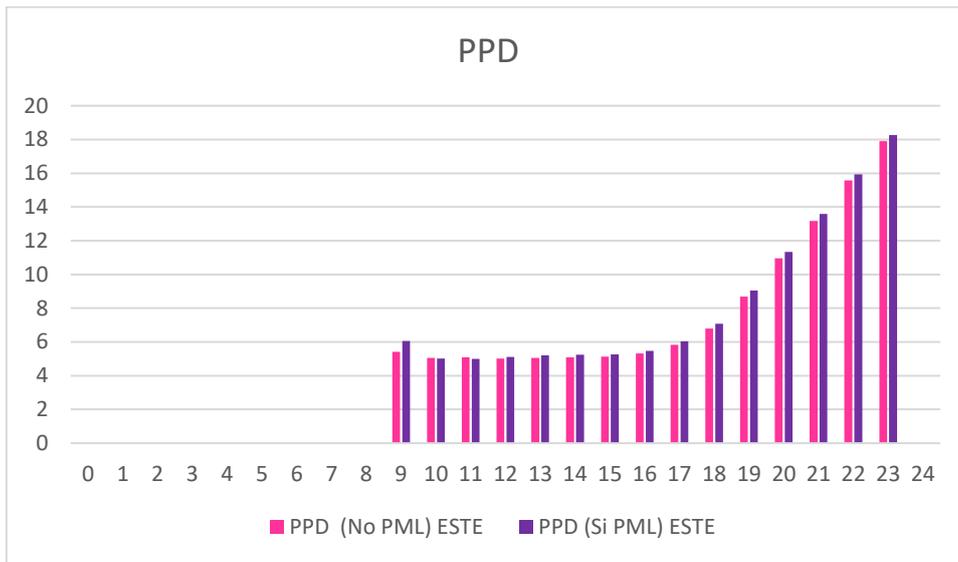
D10. Evolución de la humedad relativa abril 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 50% de las 15 a las 24.



D11. Evolución PMV abril 2020 exposición Este

El índice PMV es ligeramente menor, con el uso del panel excepto de las 10 a las 11 donde se registra un aumento del nivel de confort ya que se registra una disminución del índice en la dirección positiva.

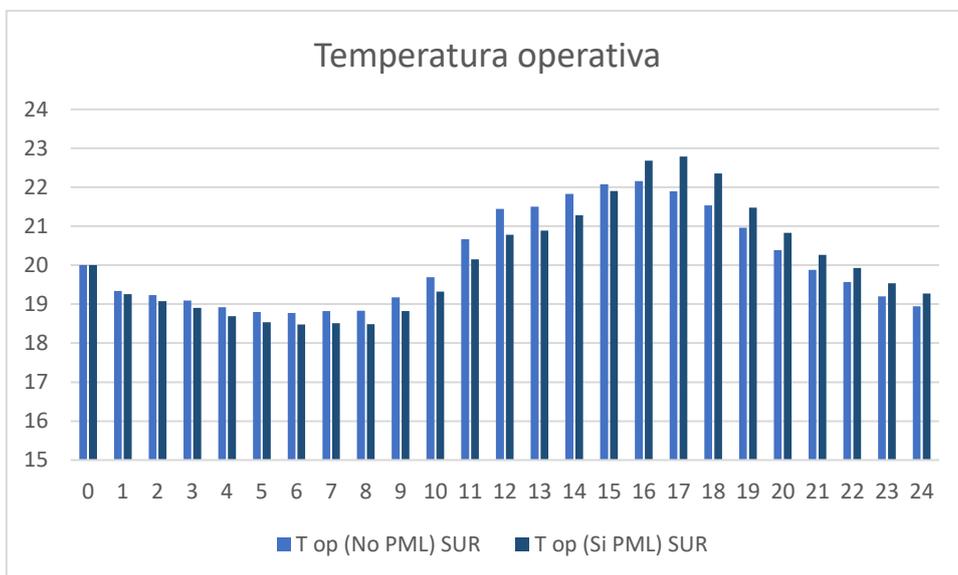


D12. Evolución PPD abril 2020 exposición Este

Lo mismo sucede con el índice PPD, que disminuye de las 10 a las 11 generando un aumento del confort interno con respecto a las horas restantes del día.

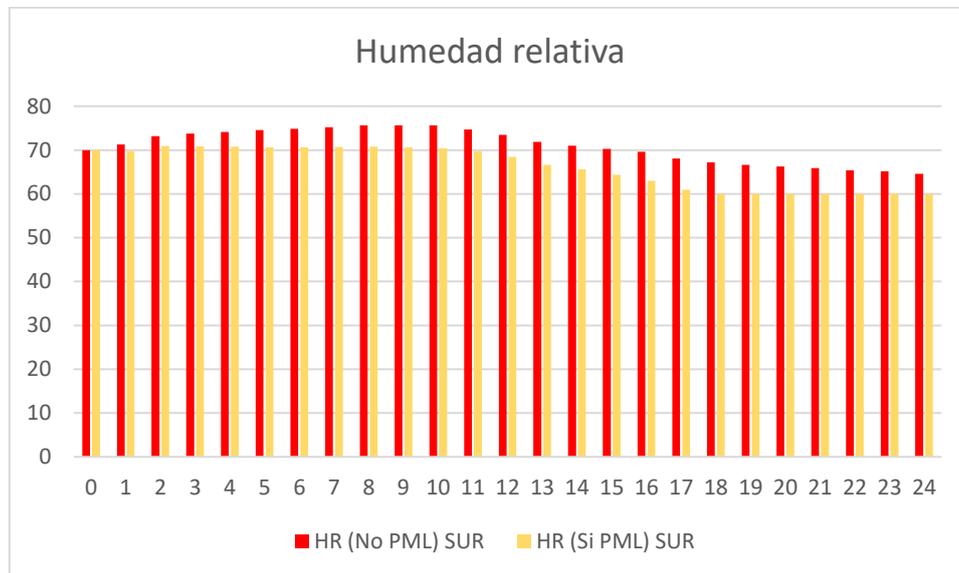
## E. Mayo

En mayo, exponiendo el panel hacia el sur:



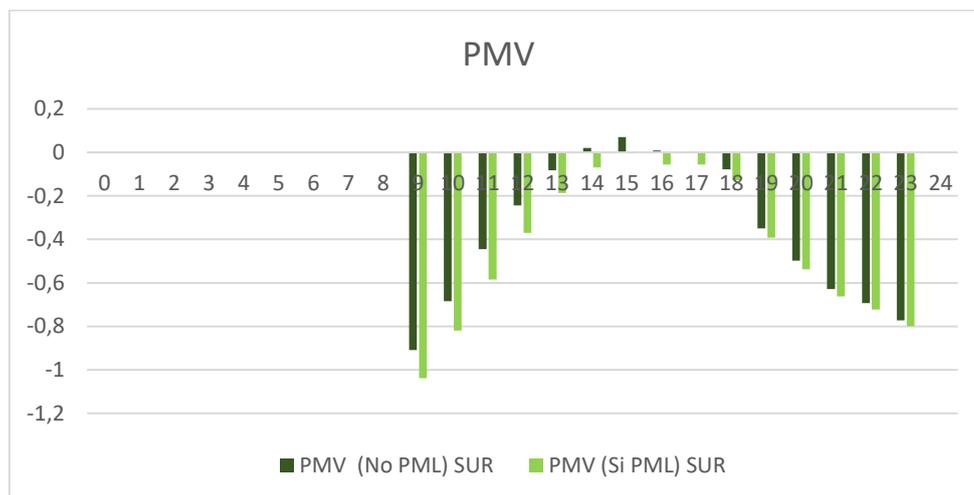
E1. Evolución de la temperatura operando mayo 2020 exposición Sur

La temperatura operativa con el uso del panel, en comparación con la condición inicial, permanece constante en las primeras horas, de las 4 a las 14 disminuye ligeramente y de las 15 a las 24 aumenta ligeramente por encima de los 20 °C.



E2. Evolución humedad relativa msggio 2020 exposición Sur

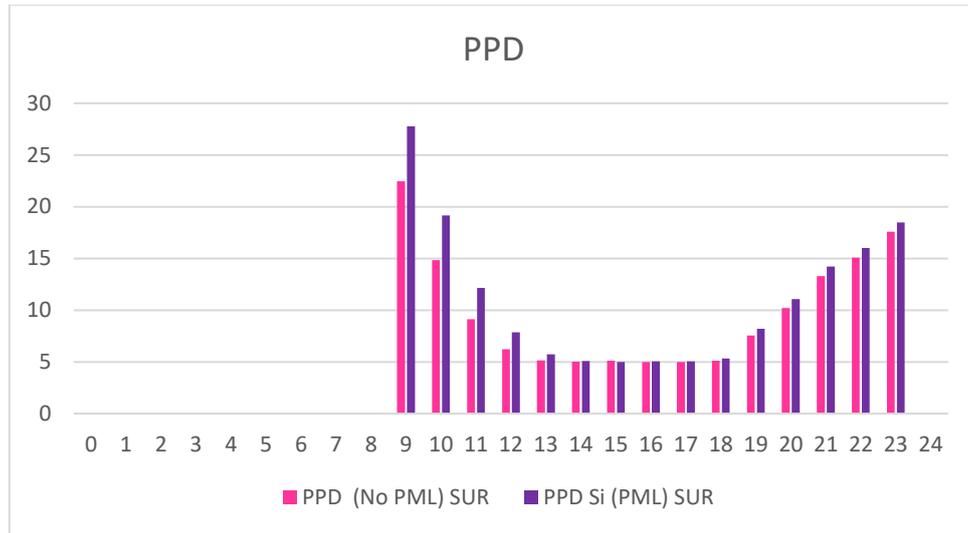
La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% de las 18 a las 24.



E3. Evolución PMV mayo 2020 exposición Sur

El índice PMV, con el uso del panel, aumenta su rango de las 9 a las 14 y de las 16 a las 23 superando el umbral de -1 a las 9. Este valor disminuye, en el lado positivo,

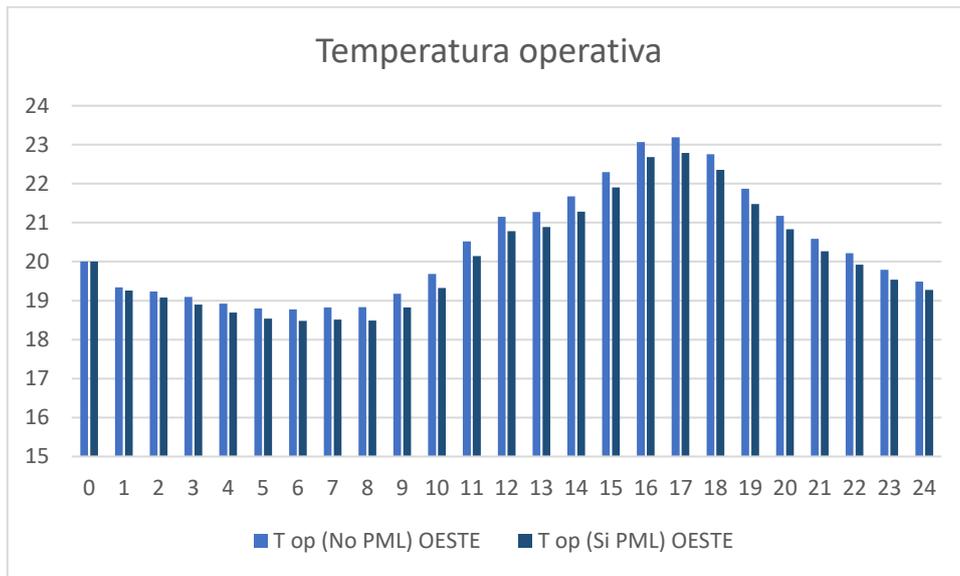
a las 15 acercándose al umbral de la neutralidad térmica y por lo tanto en ese momento genera un aumento del confort interno en comparación con el resto de las horas del día donde la activación del panel acerca el PMV más a la sensación de frío.



E4. Evolución PPD mayo 2020 exposición Sur

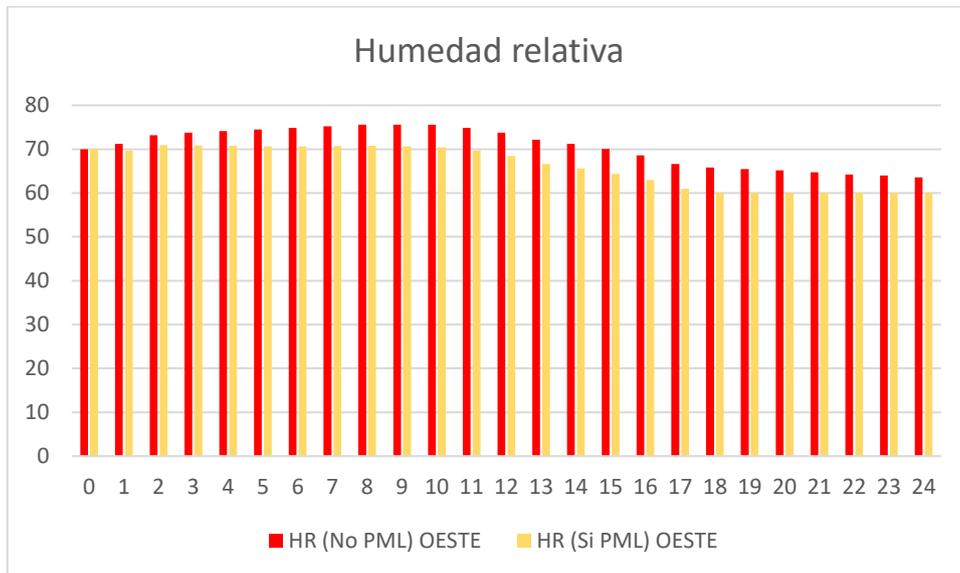
Lo mismo sucede con el índice PPD, en comparación con la condición inicial, sólo disminuye a las 15 generando un aumento del confort interno en comparación con las horas restantes del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



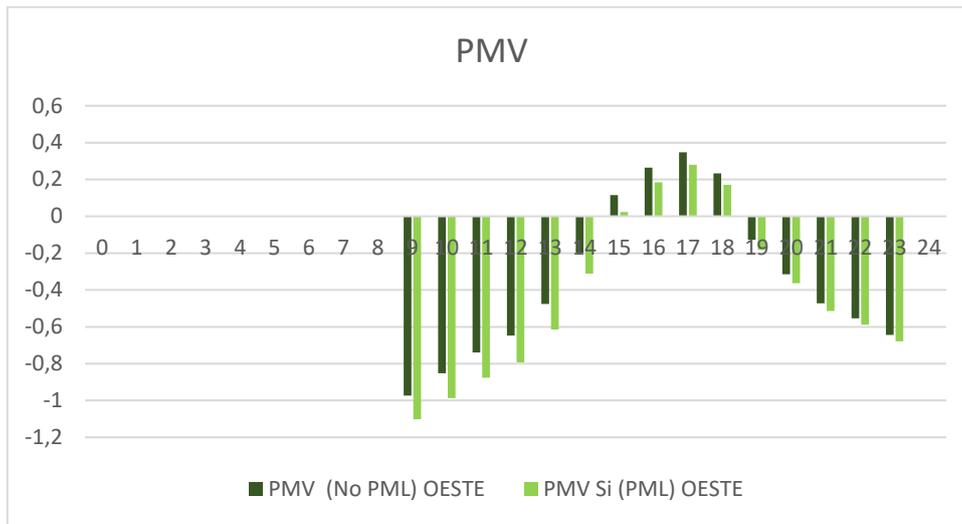
E5. Evolución de la temperatura operando mayo 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa, con la activación del panel, disminuye de manera poco significativa durante todo el arco del día con respecto a la condición inicial.



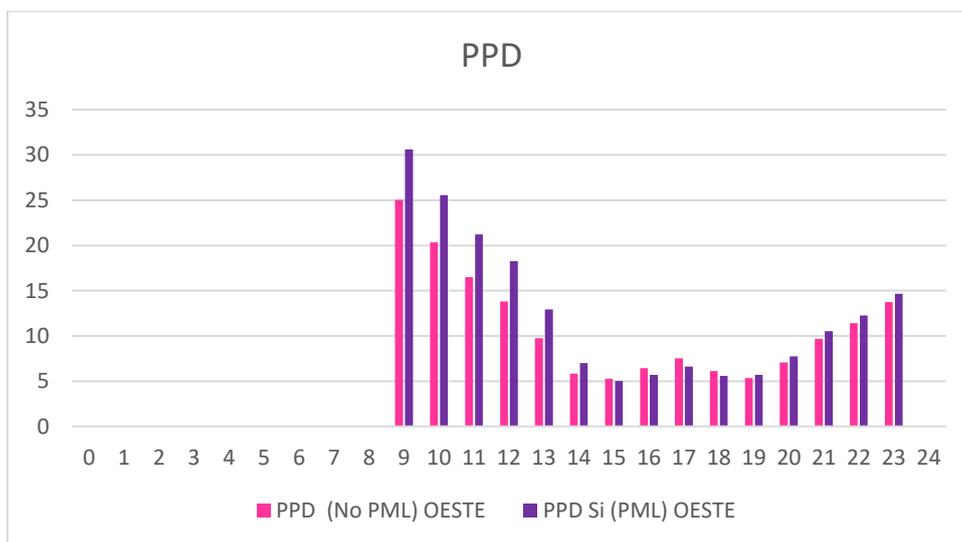
E6. Evolución humedad relativa msggio 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% de las 18 a las 24.



E7. Evolución PPD mayo 2020 exposición Oeste

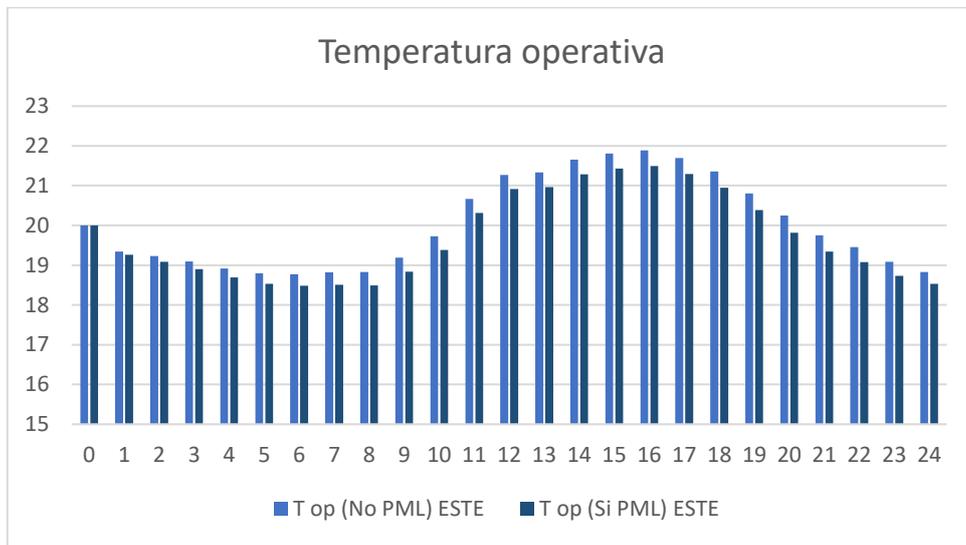
El índice PMV, con el uso del panel, aumenta su rango de las 9 a las 14 y de las 19 a las 23 superando el umbral de -1 a las 9. Este valor disminuye de las 15 a las 18 por lo que genera un aumento del confort interno en comparación con las horas restantes del día donde la activación del panel acerca el PMV más a la sensación de frío.



E8. Evolución PPD mayo 2020 exposición Oeste

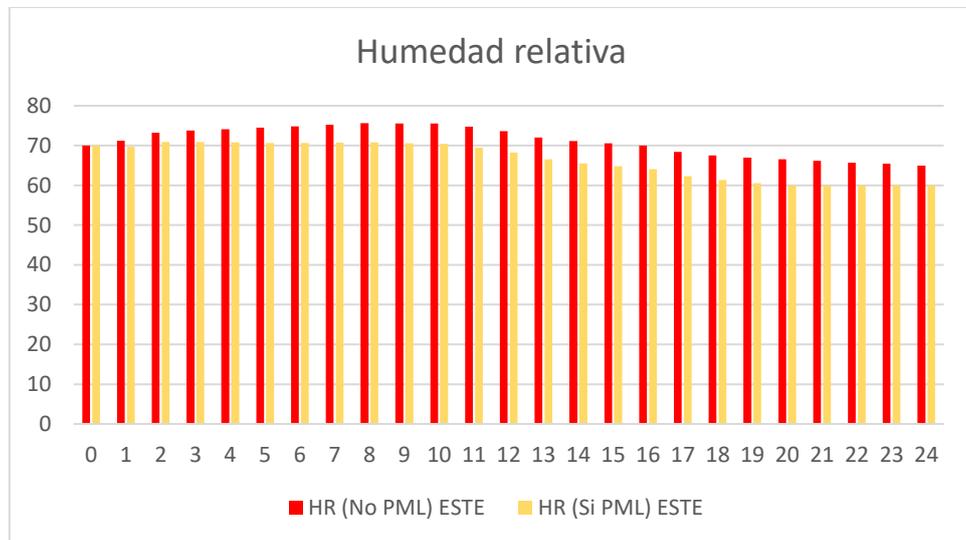
Lo mismo sucede con el índice PPD, en comparación con la condición inicial, disminuye de las 15 a las 18 generando un aumento del confort interno en comparación con las horas restantes del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



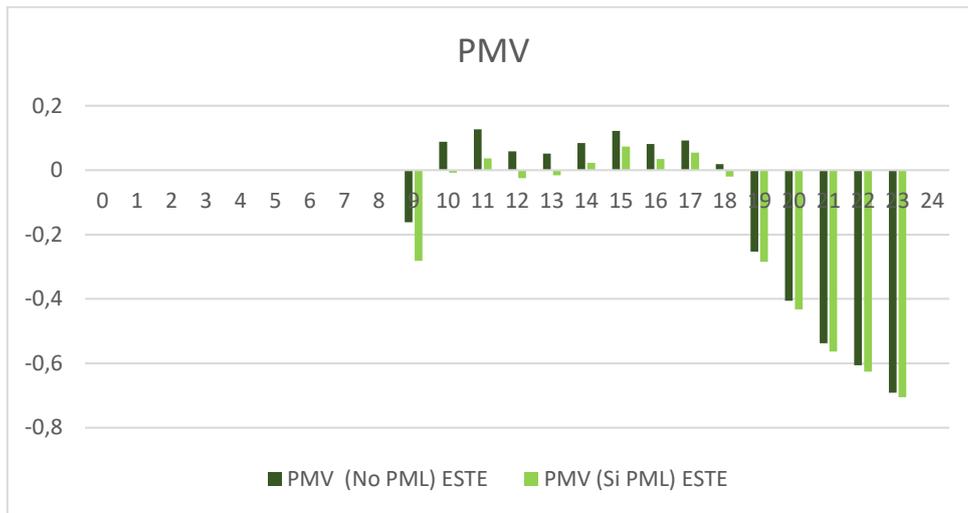
E9. Evolución de la temperatura operando mayo 2020 exposición Este

La temperatura operativa, con la activación del panel, disminuye durante todo el arco del día con respecto a la condición inicial.



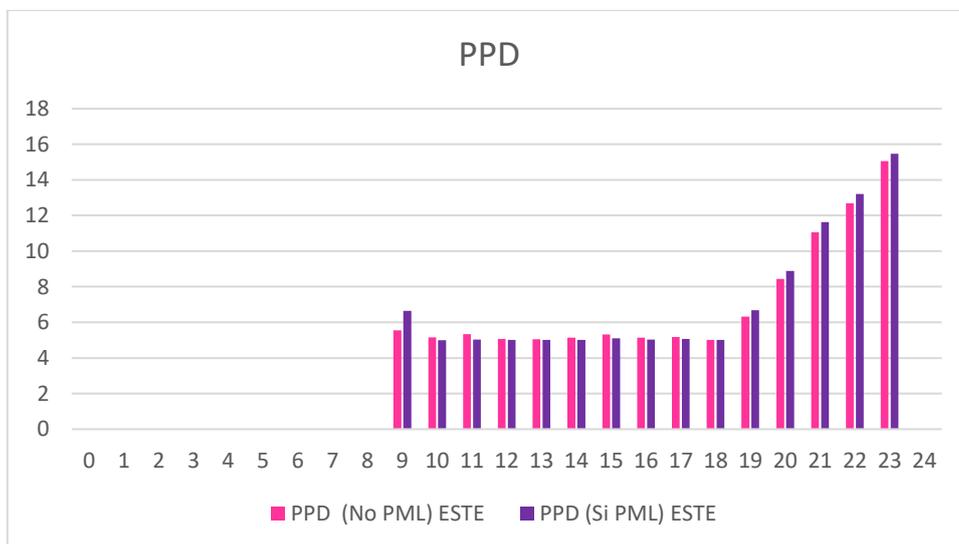
E10. Evolución humedad relativa mayo 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% de las 20 a las 24.



E11. Evolución PPD mayo 2020 exposición Este

El índice PMV, con el uso del panel, aumenta su rango a las 9 y de las 19 a las 23 superando el umbral de -0,7 a las 23. El valor de este índice disminuye de las 10 a las 18 por lo que genera un aumento del confort interno en comparación con las horas restantes del día donde la activación del panel acerca el PMV más a la sensación de frío.

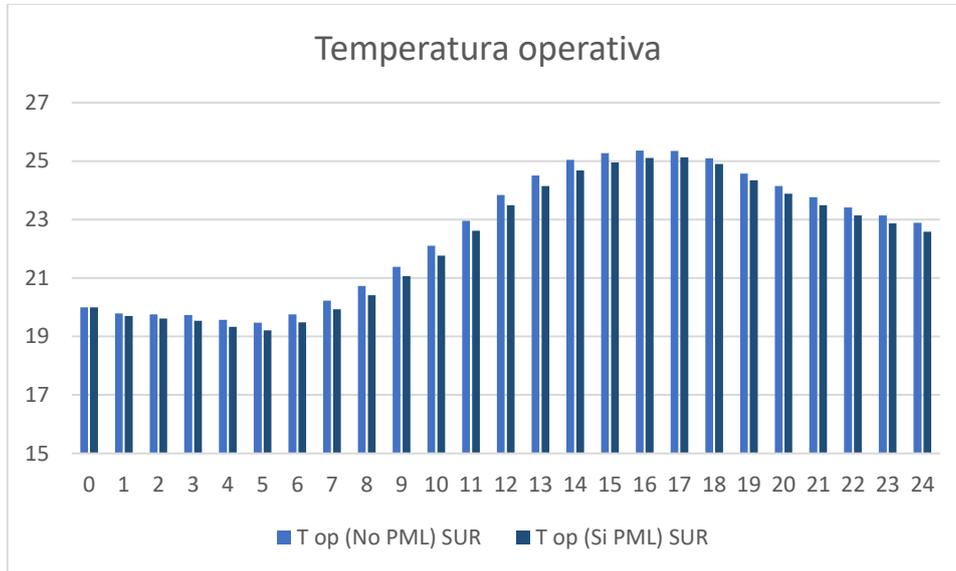


E12. Evolución PPD mayo 2020 exposición Este

Lo mismo sucede con el índice PPD, en comparación con la condición inicial, disminuye de las 10 a las 17 generando un aumento del confort interno en comparación con las horas restantes del día.

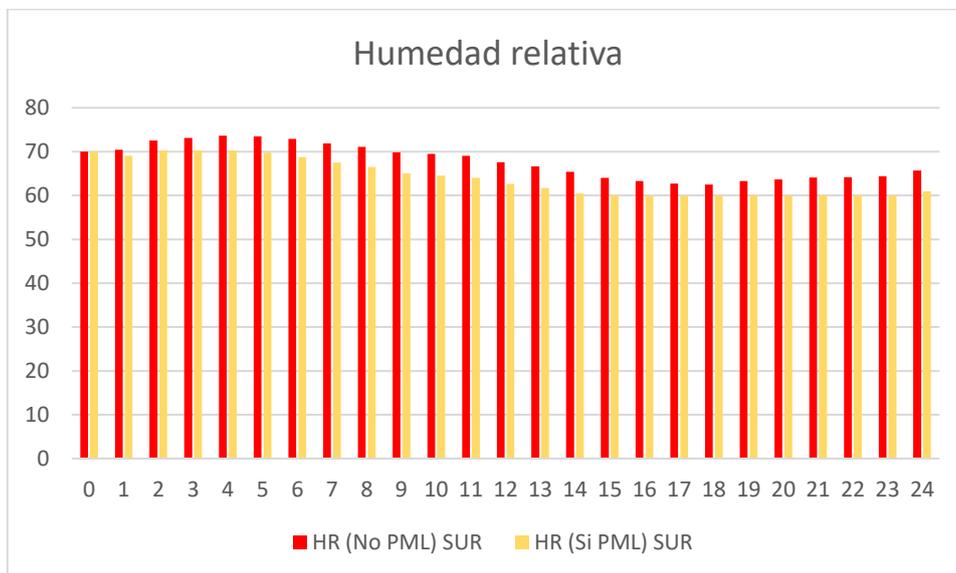
## F. Junio

En junio exponiendo el panel hacia el sur:



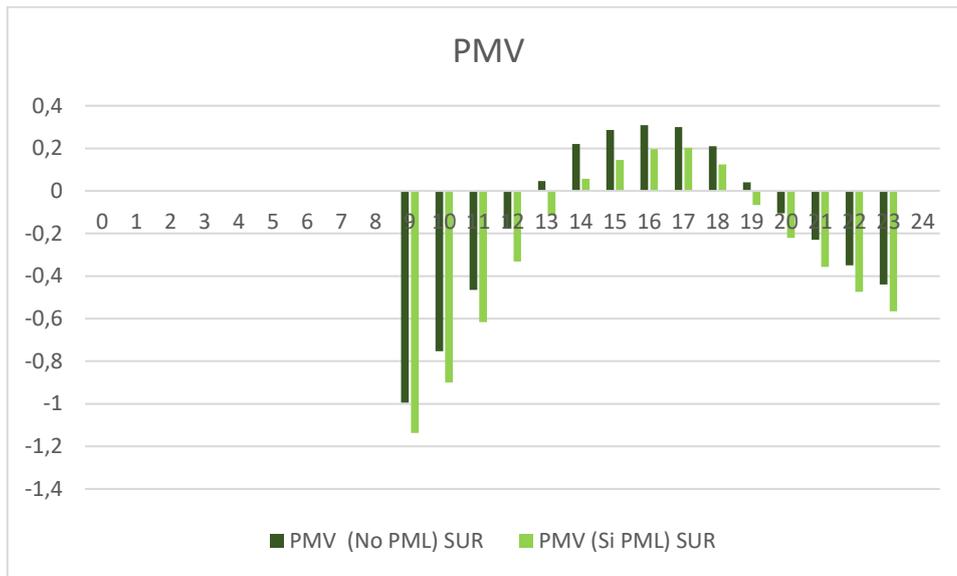
F1. Evolución de la temperatura operando junio 2020 exposición Sur

La temperatura operante disminuye ligeramente durante el día mostrando una diferencia mayor de las 9 a las 13.



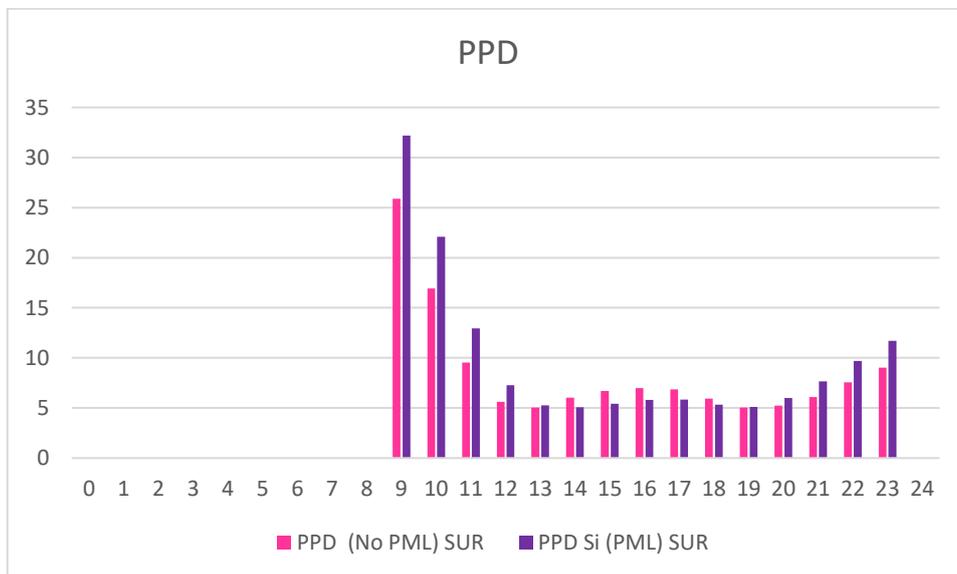
F2. Evolución de la humedad relativa junio 2020 Exposición Sur

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% de las 15 a las 23.



F3. Evolución PPD junio 2020 exposición Sur

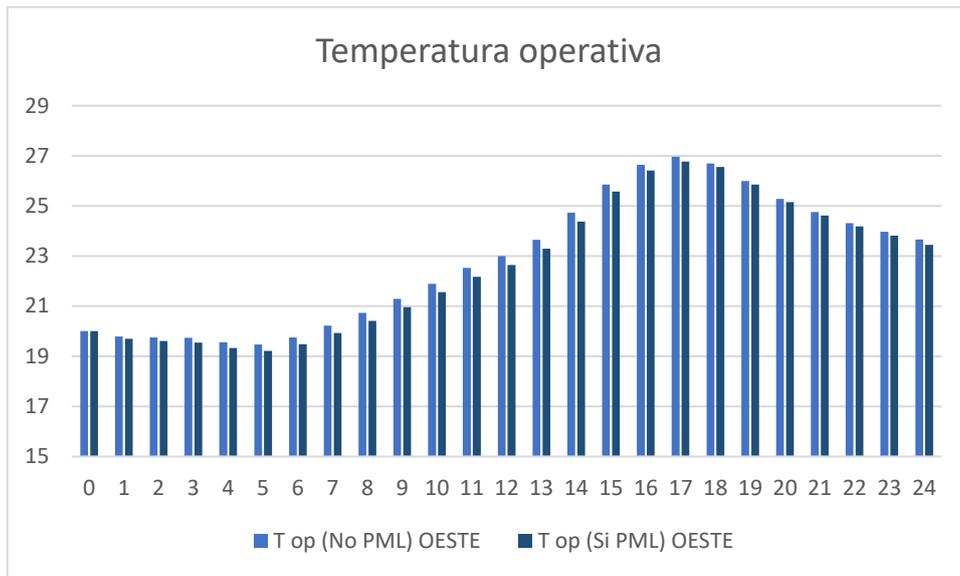
El índice PMV, accionando el funcionamiento del panel se reduce, en el lado positivo, de las 14 a las 18 aumentando así en este período de tiempo el confort en el ambiente interno con relación a las restantes horas del día.



F4. Evolución PPD junio 2020 exposición Sur

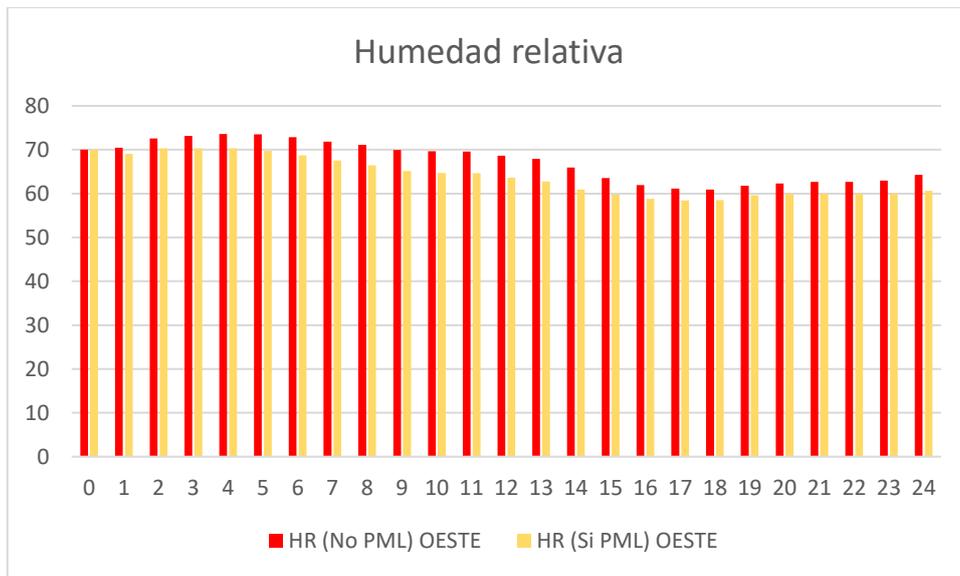
Incluso el índice PPD disminuye de las 14 a las 18 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



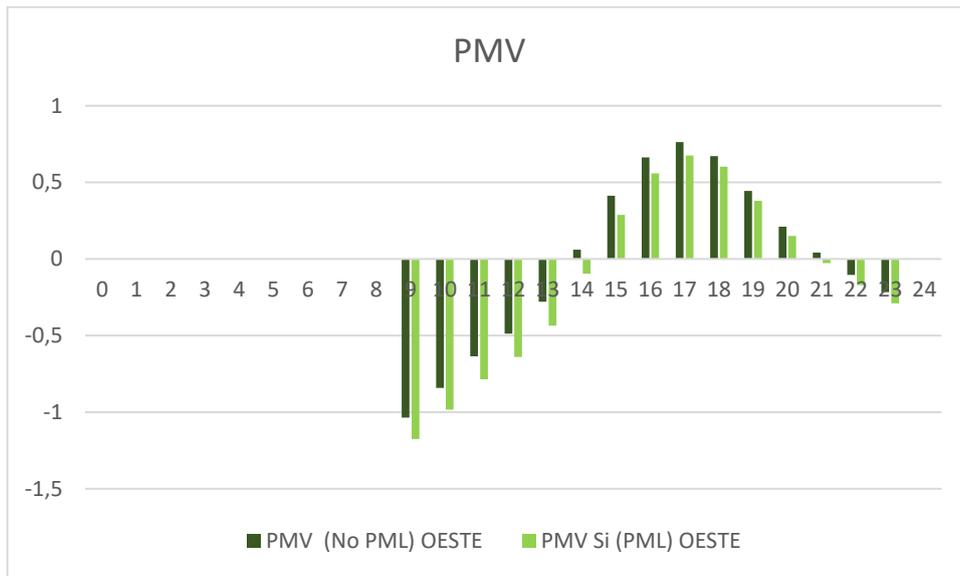
F5. Evolución de la temperatura operando junio 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa, con la activación del panel, disminuye ligeramente durante el día mostrando una diferencia mayor de las 8 a las 14.



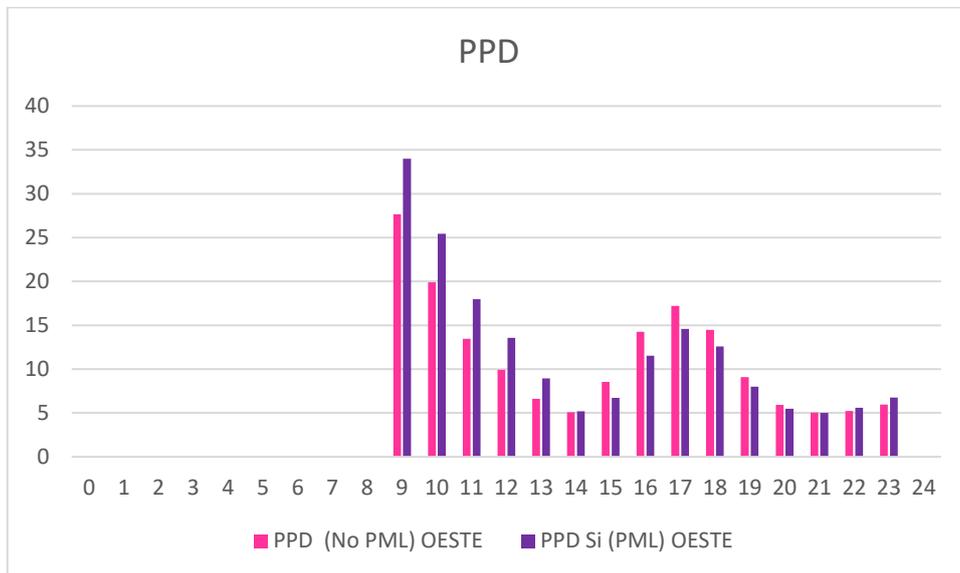
F6. Evolución de la humedad relativa junio 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% de las 15 a las 22.



F7. Evolución PPD junio 2020 exposición Oeste

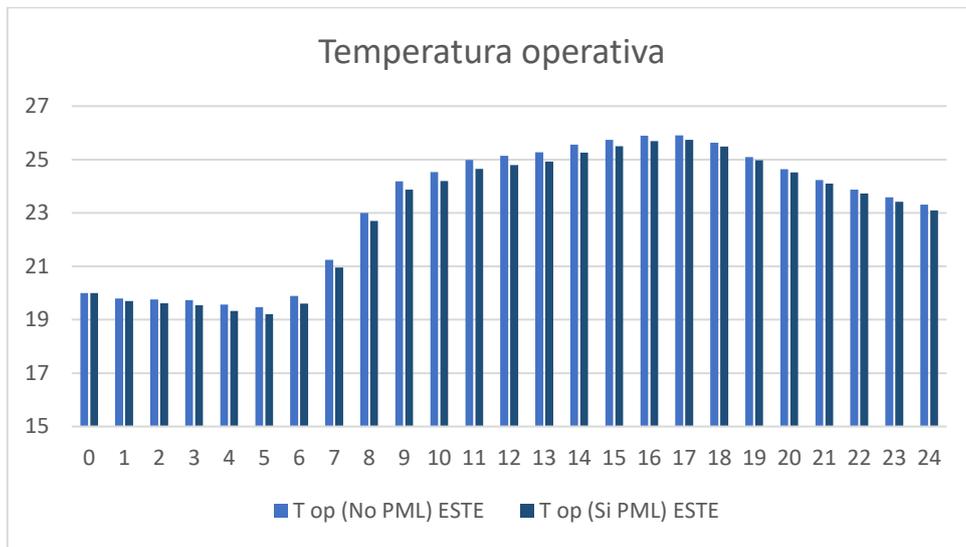
El índice PMV al accionar del funcionamiento del panel se reduce, en la dirección positiva, de las 15 a las 21 aumentando así en este período de tiempo el confort en el ambiente interno con relación a las horas restantes del día en que dicho índice aumenta con relación a la condición inicial.



F8. Evolución PPD junio 2020 exposición Oeste

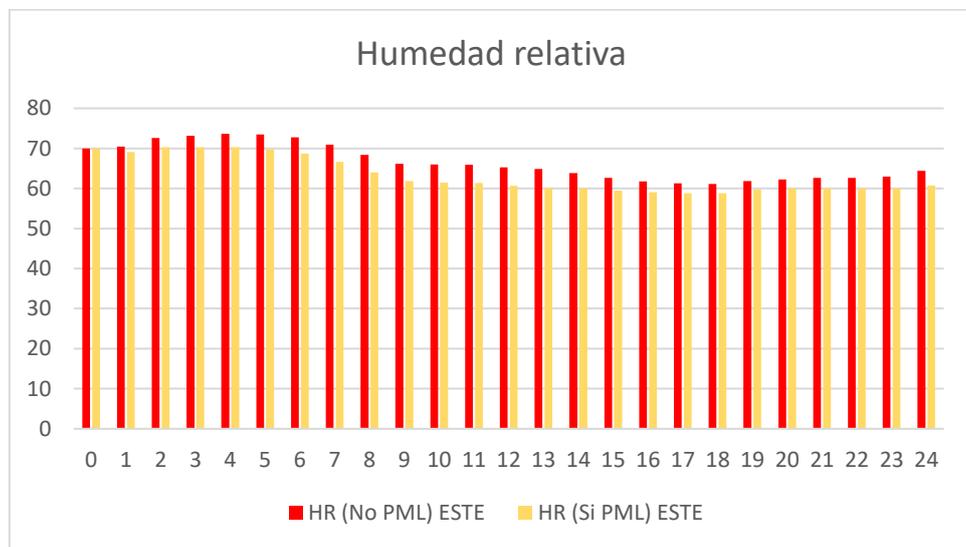
También el índice PPD disminuye de las 15 a las 21 generando un aumento del confort interno respecto al resto de horas del día donde se alcanza el límite máximo que alcanza casi el 30%.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



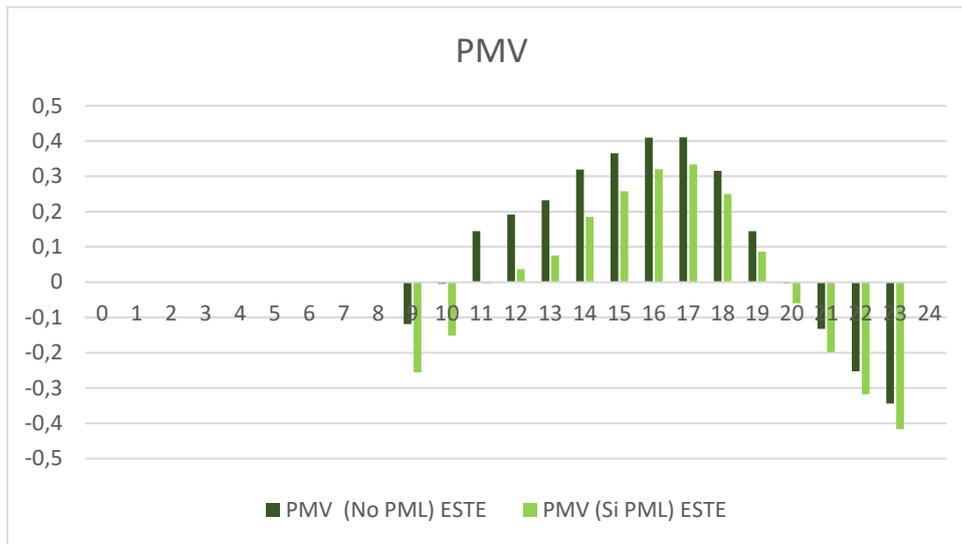
F9. Evolución de la temperatura operando junio 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel con relación a la condición inicial.



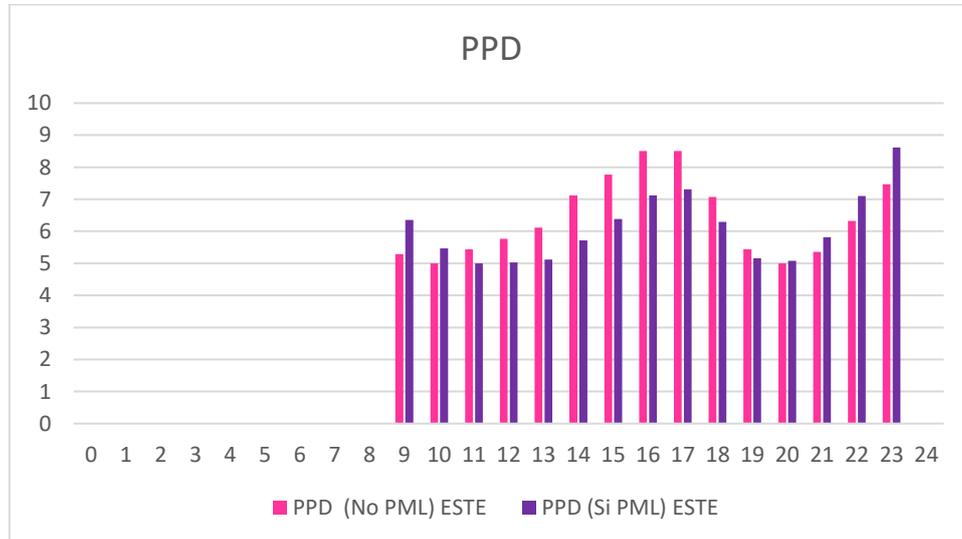
F10. Evolución de la humedad relativa junio 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 19.



F11. Evolución PPD junio 2020 exposición Este

El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel se reduce, en el signo positivo, de las 11 a las 19 aumentando así en este período de tiempo el confort en el ambiente interno con relación a las horas restantes del día en que dicho índice aumenta con relación a la condición inicial.

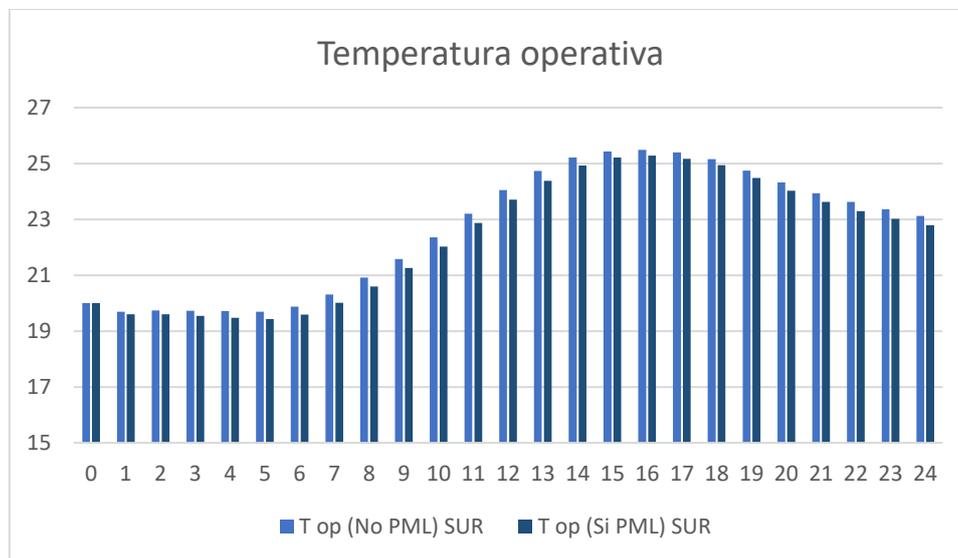


F12. Evolución PPD junio 2020 exposición Este

También el índice PPD disminuye de las 11 a las 19 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día donde se alcanza el límite máximo del 8%.

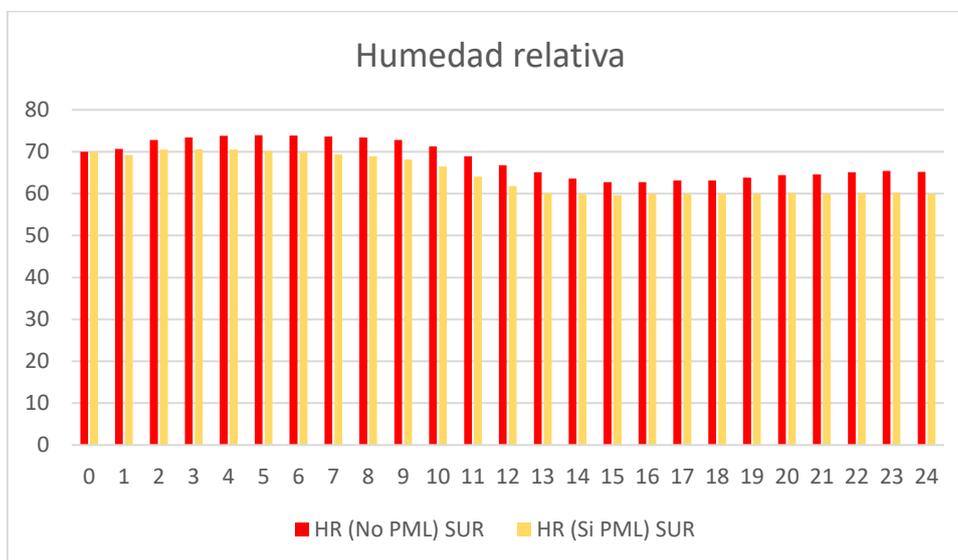
## G. Julio

En el mes de julio, en cambio, exponiendo el panel hacia el sur:



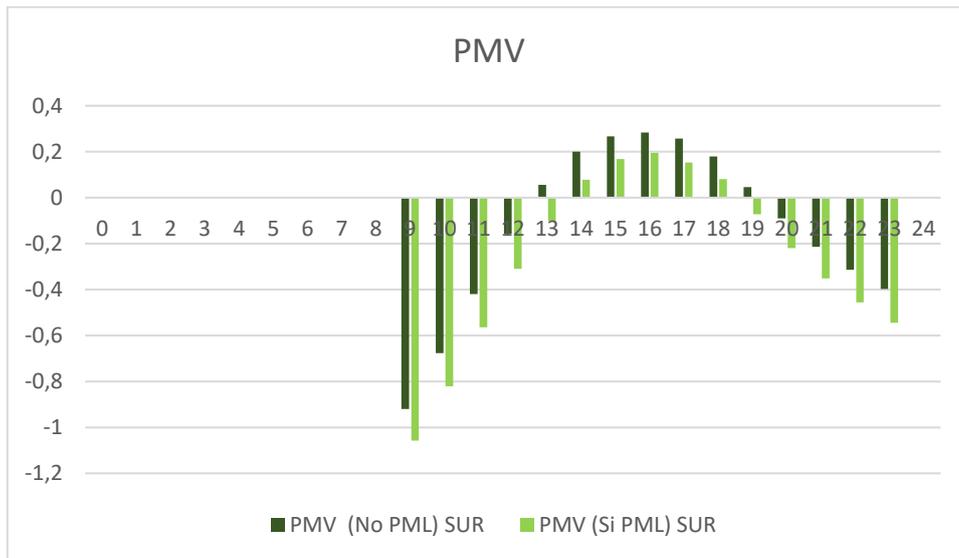
G1. Evolución de la temperatura operando julio 2020 exposición Sur

La temperatura operante disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel con relación a la condición inicial.



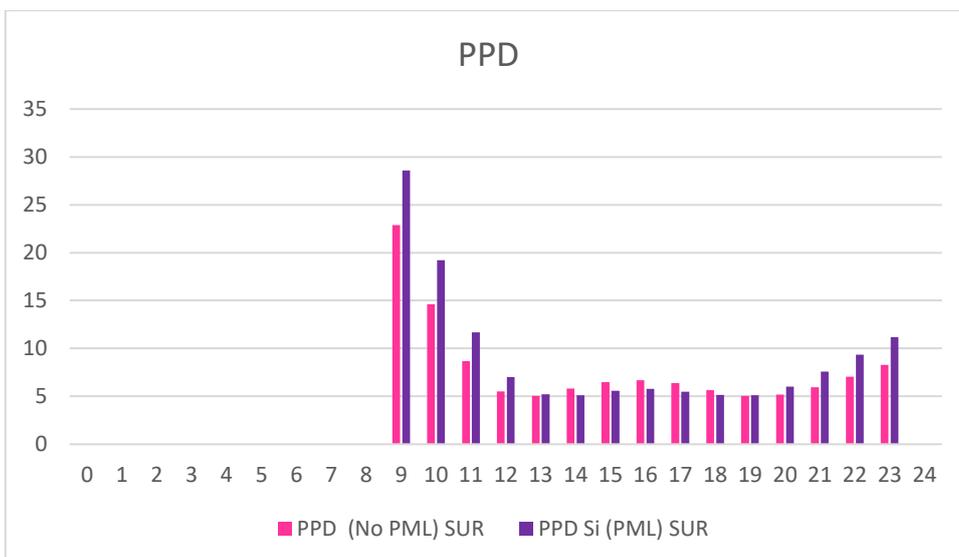
G2. Evolución de la humedad relativa julio 2020 Exposición Sur

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 19.



G3. Evolución PPD julio 2020 exposición Sur

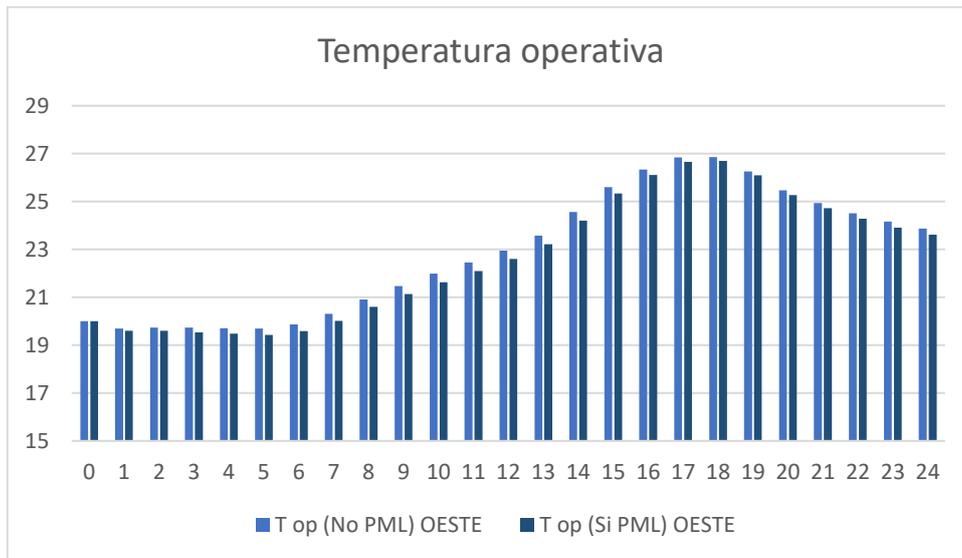
El índice PMV como en junio, al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en la señal positiva, de las 14 a las 18 aumentando así en este lapso de tiempo el confort en el ambiente interno.



G4. Evolución PPD julio 2020 exposición Sur

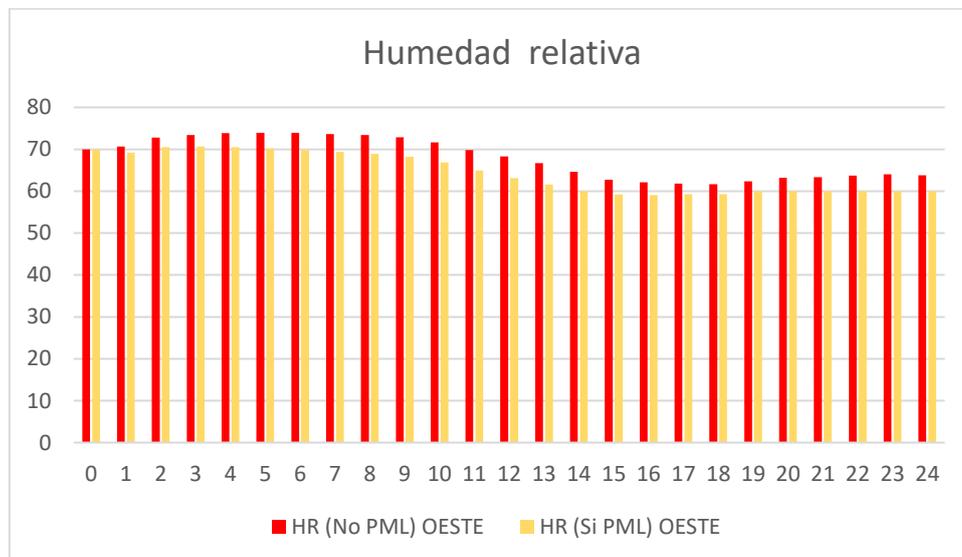
Incluso el índice PPD disminuye de las 14 a las 18 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



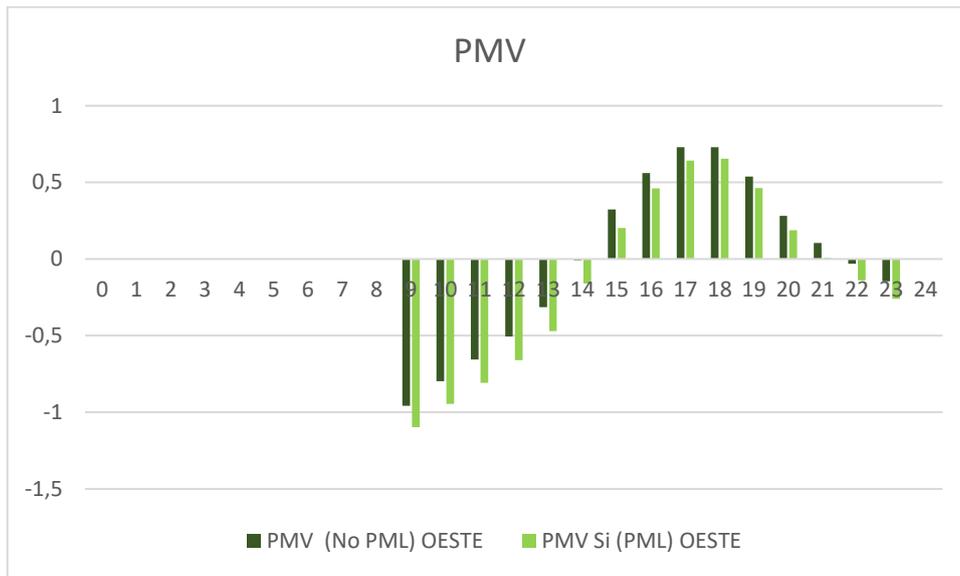
G5. Evolución de la temperatura operando julio 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



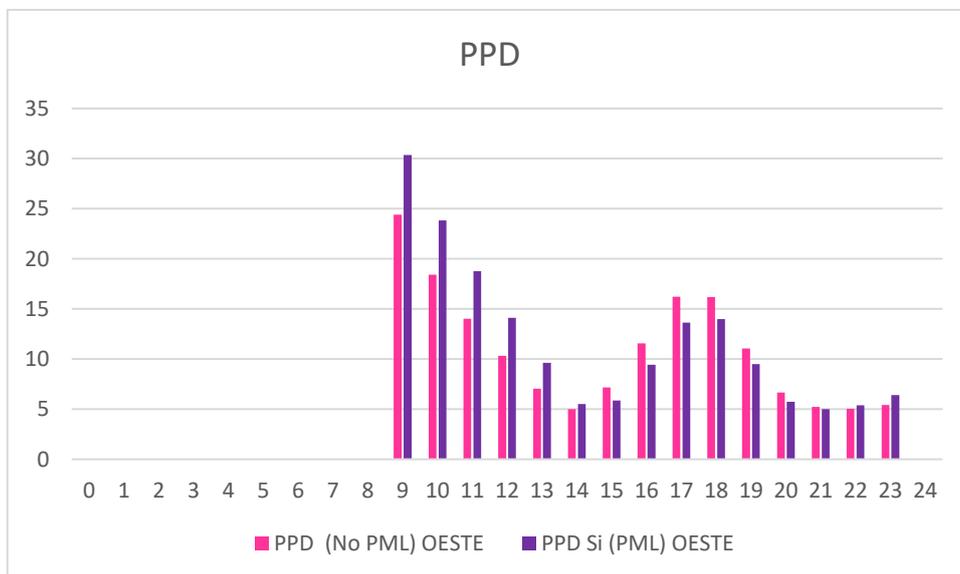
G6. Evolución de la humedad relativa julio 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 24.



G7. Evolución PPD julio 2020 exposición Oeste

El rango del índice PMV en general aumenta ligeramente respecto al caso anterior, al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el lado positivo, de las 15 a las 21 aumentando así en este período de tiempo el confort en el ambiente interno.

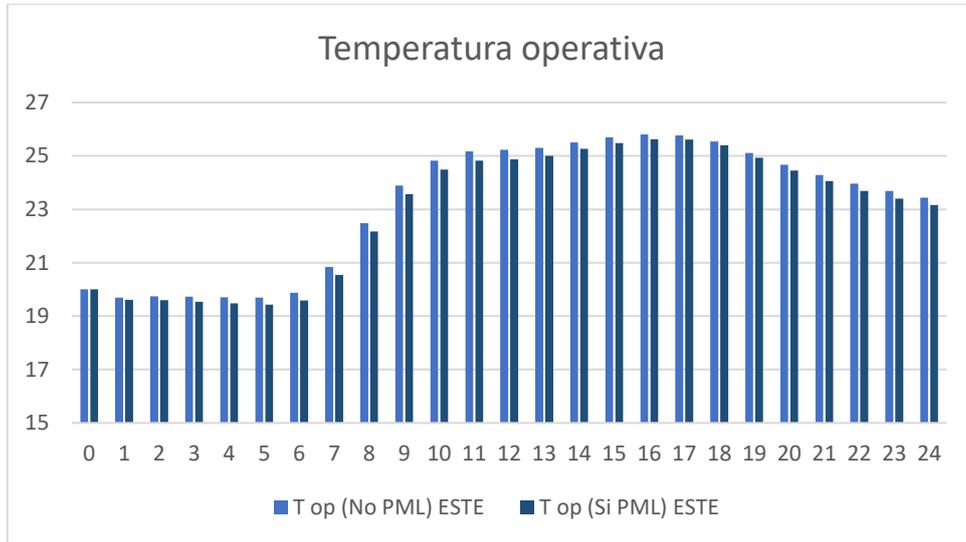


G8. Evolución PPD julio 2020 exposición Oeste

El índice PPD también aumenta ligeramente en general en comparación con el caso anterior. Además, al activar el panel, se nota que este índice disminuye de las 15 a

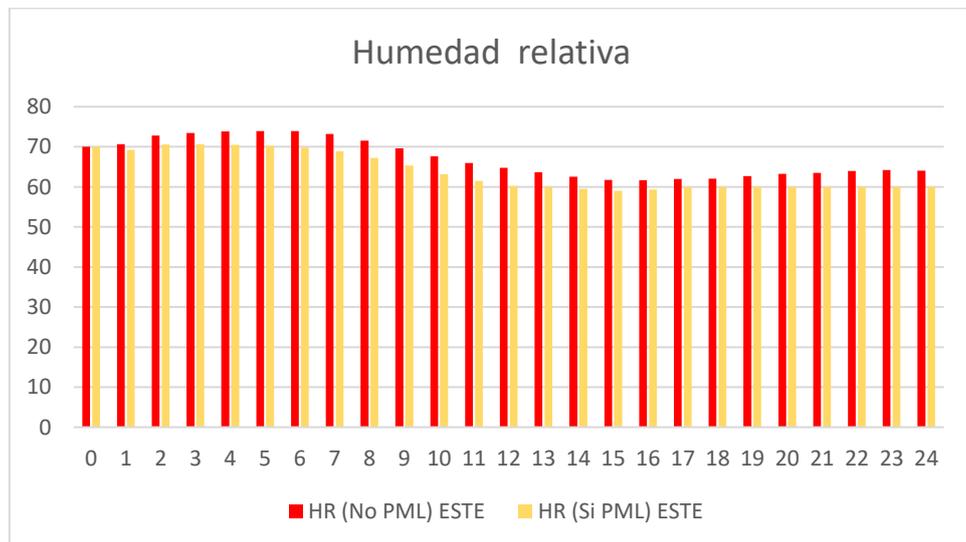
las 20 generando un aumento del confort interno con respecto a las restantes horas del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



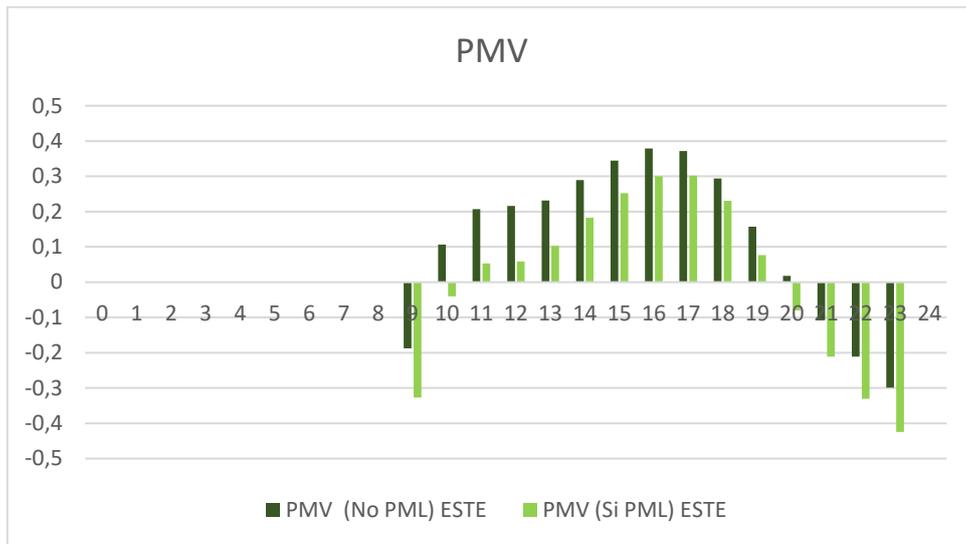
G9. Evolución de la temperatura operando julio 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



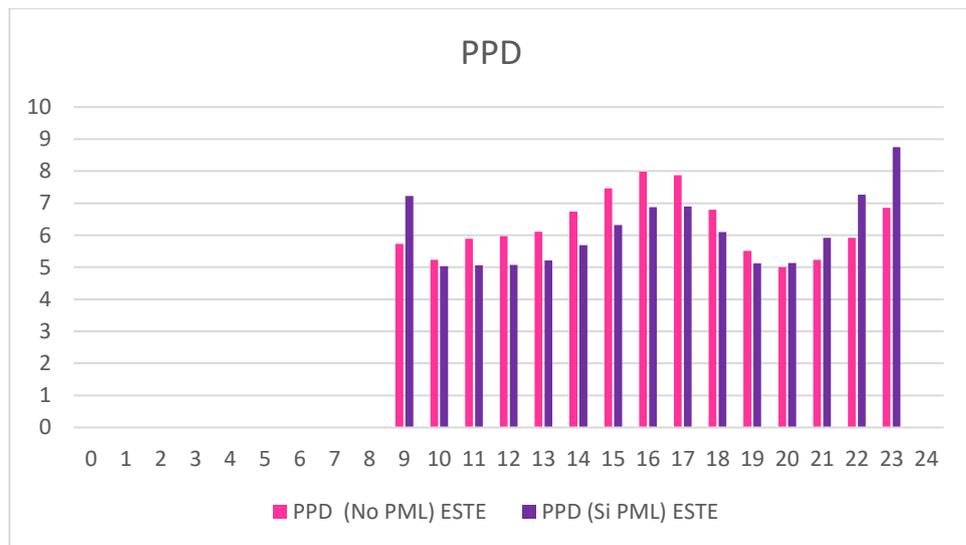
G10. Evolución de la humedad relativa julio 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 24.



G11. Evolución PPD julio 2020 exposición Este

El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el signo positivo, de las 10 a las 19 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno.

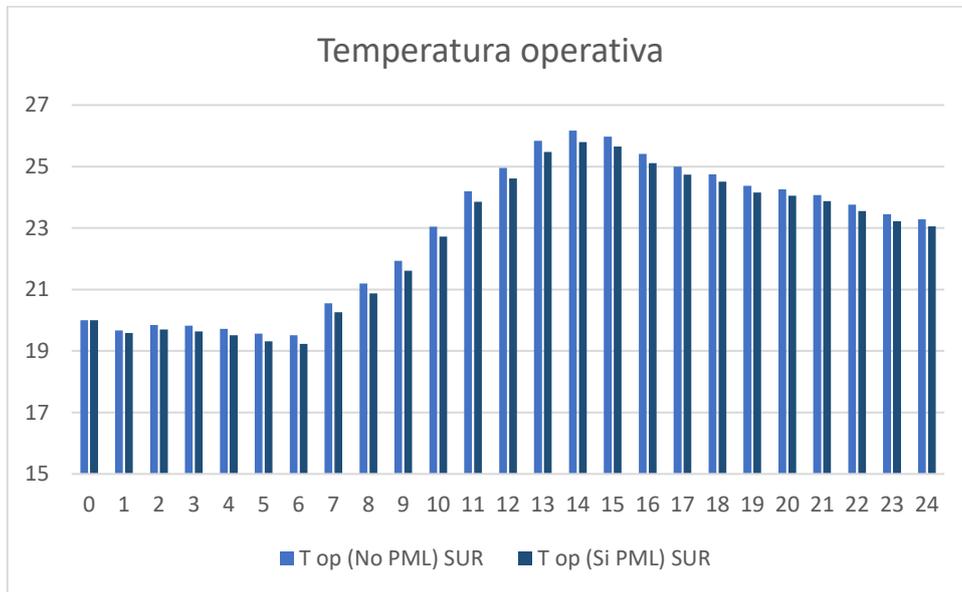


G12. Evolución PPD julio 2020 exposición Este

Incluso el índice PPD activando el panel disminuye de las 15 a las 20 generando un aumento del confort interno con relación al resto de horas del día.

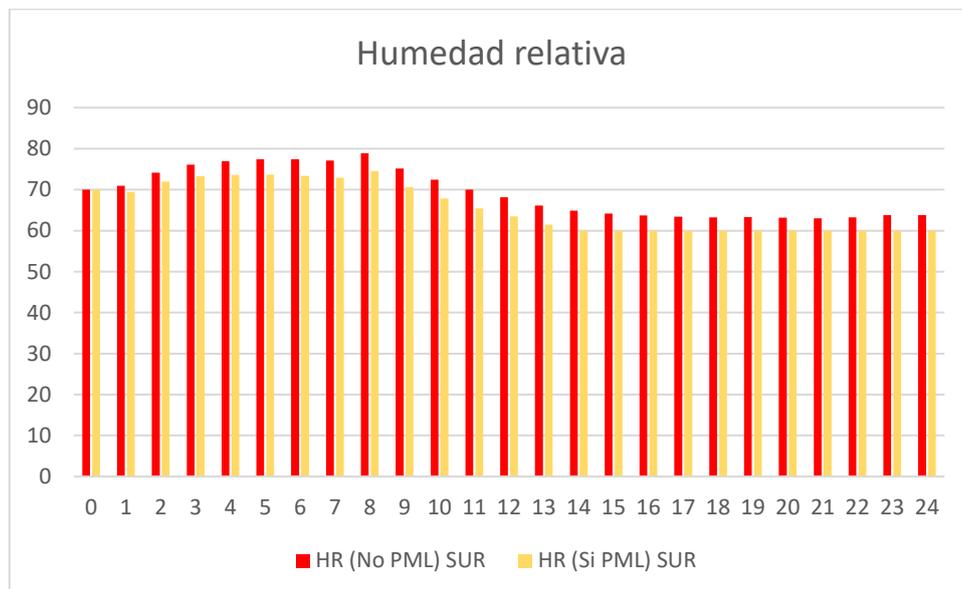
## H. Agosto

En agosto exponiendo el panel hacia el sur:



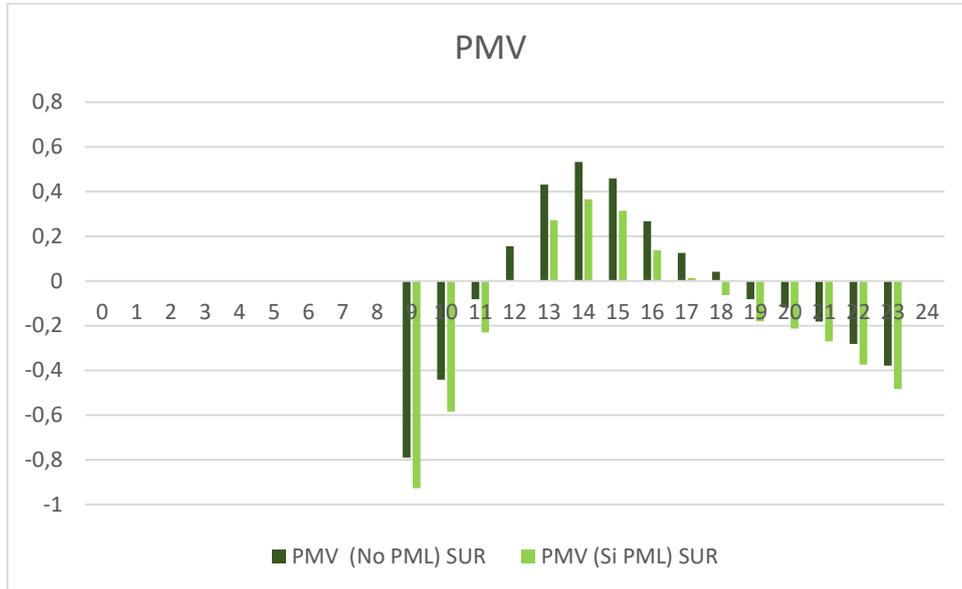
H1. Evolución de la temperatura operando agosto 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



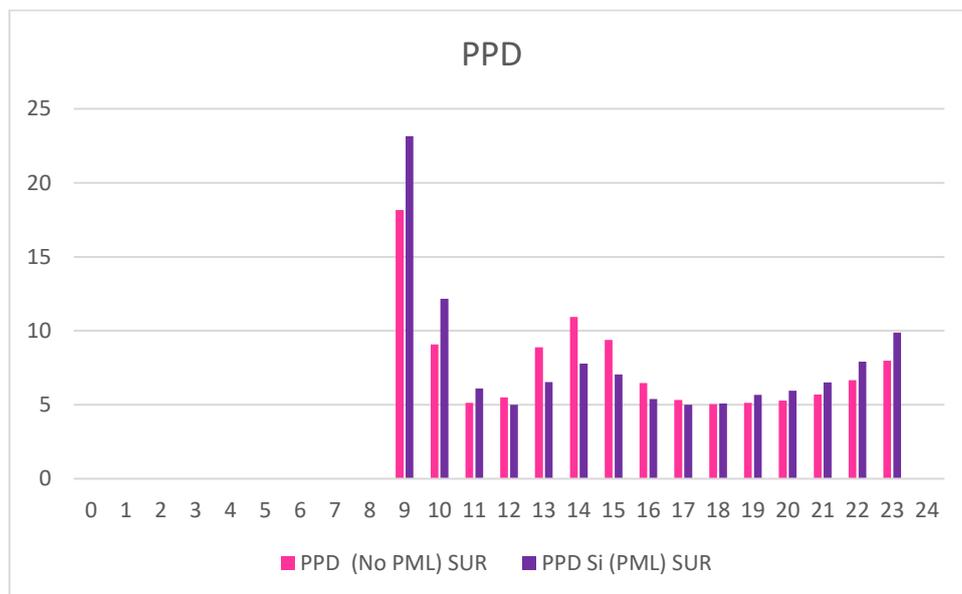
H2. Evolución humedad relativa agosto 2020 exposición Sur

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 24.



### H3. Evolución PPD agosto 2020 Exposición Sur

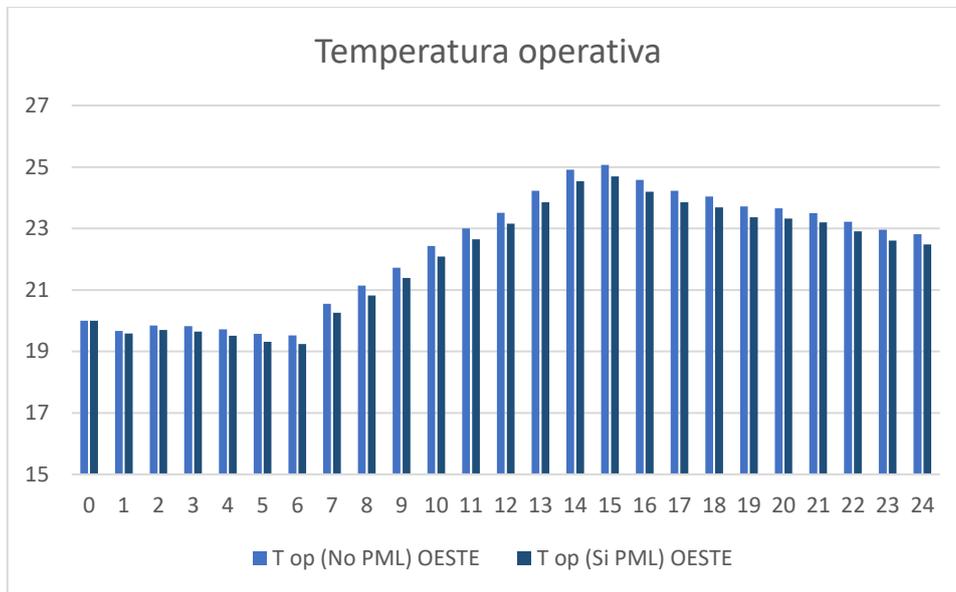
El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el signo positivo, de las 12 a las 17 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno.



### H4. Evolución PPD agosto 2020 Exposición Sur

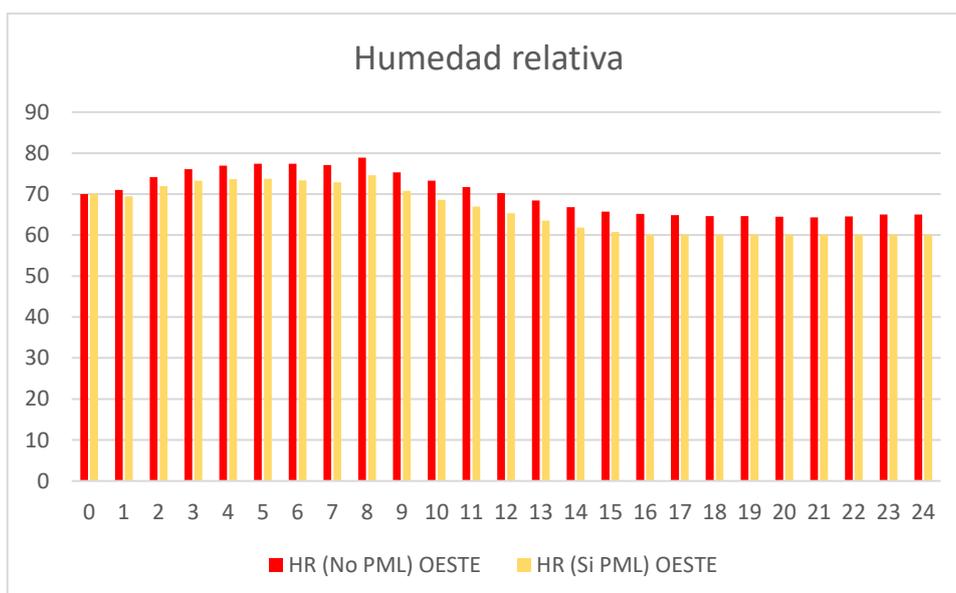
Incluso el índice PPD disminuye de las 14 a las 18 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



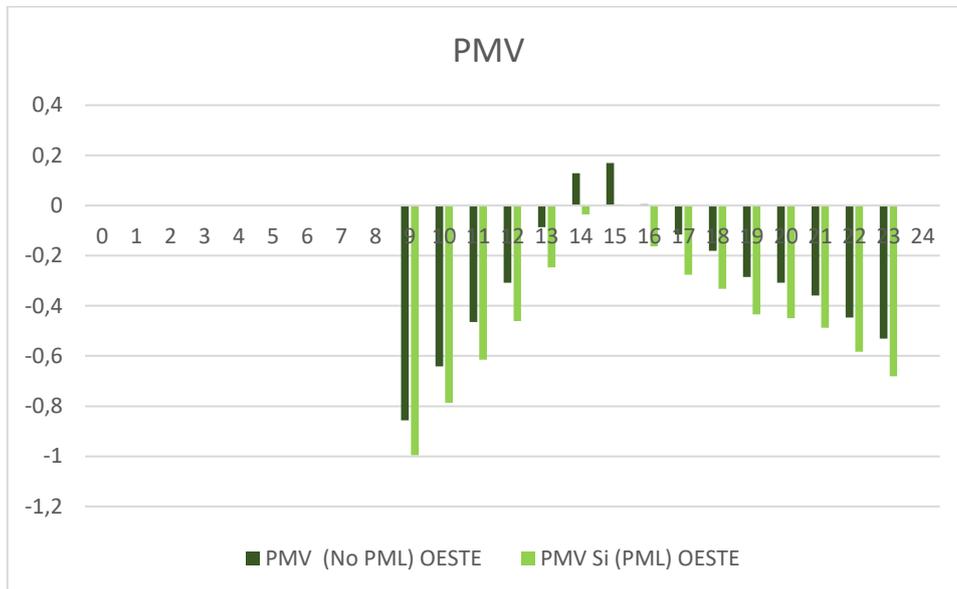
H5. Evolución de la temperatura operando agosto 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el panel con respecto a las condiciones iniciales.



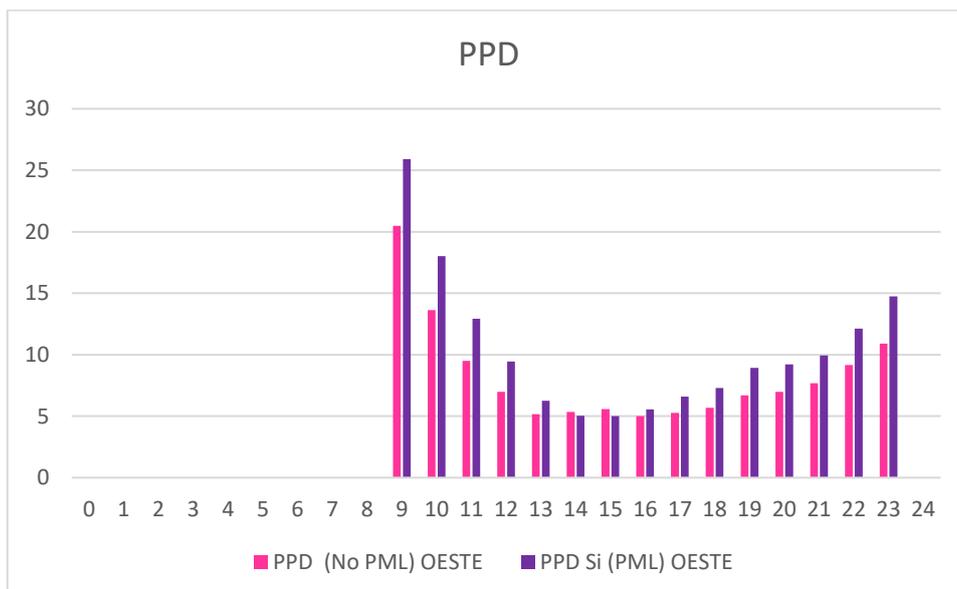
H6. Evolución humedad relativa agosto 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 24.



H7. Evolución PPD agosto 2020 exposición Oeste

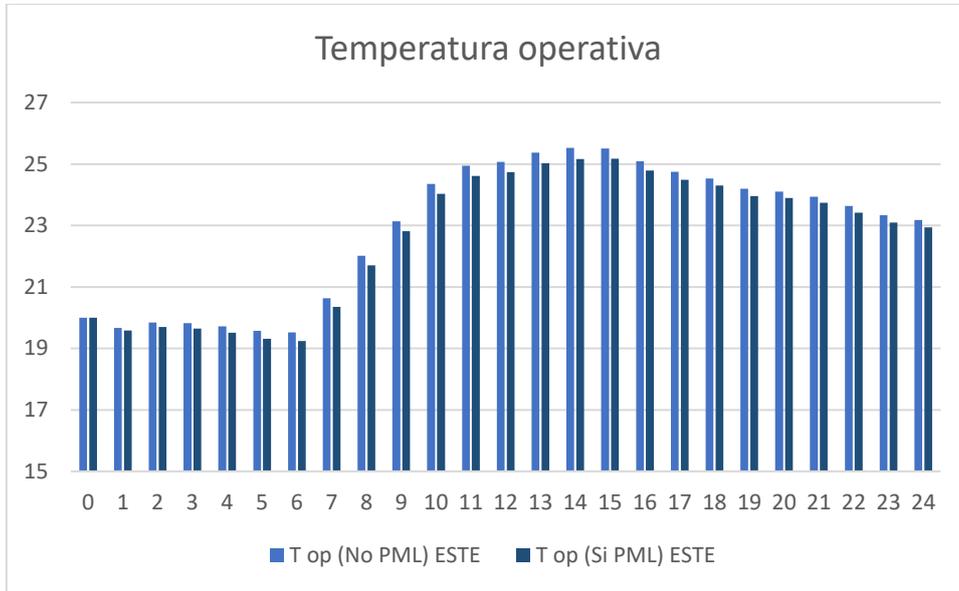
El índice PMV accionando el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el signo positivo, sólo de las 14 a las 15 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno.



H8. Evolución PPD agosto 2020 exposición Oeste

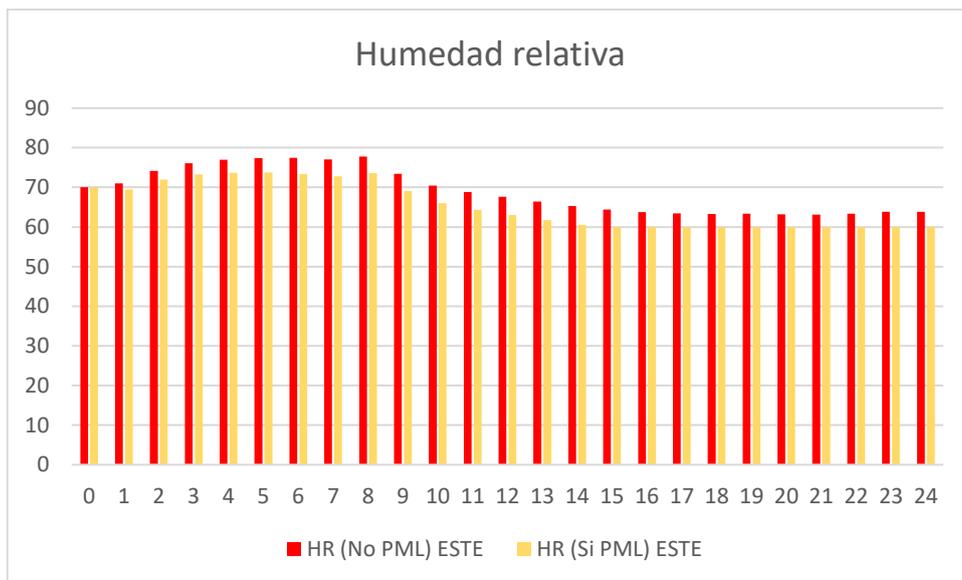
También el índice PPD disminuye de las 14 a las 15 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



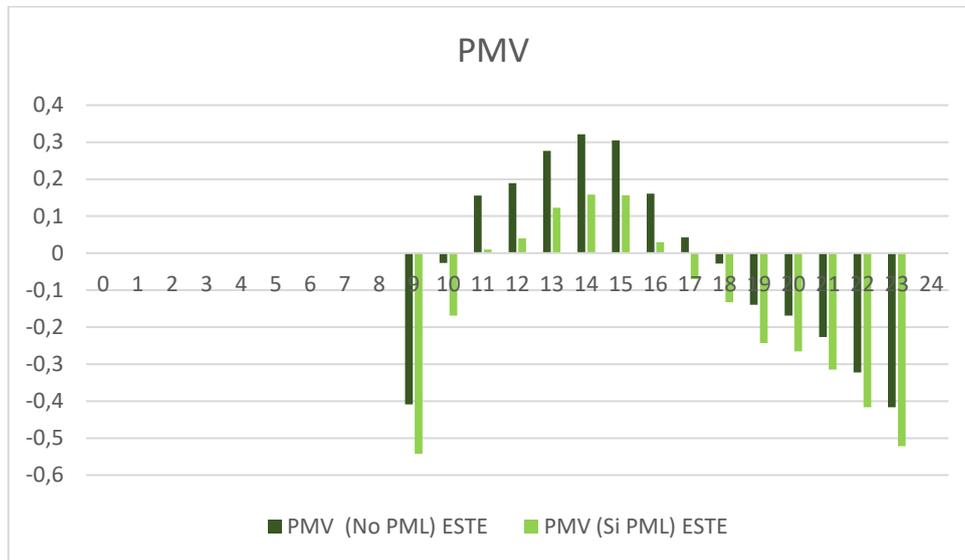
H9. Evolución de la temperatura operando agosto 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel con relación a la condición inicial.



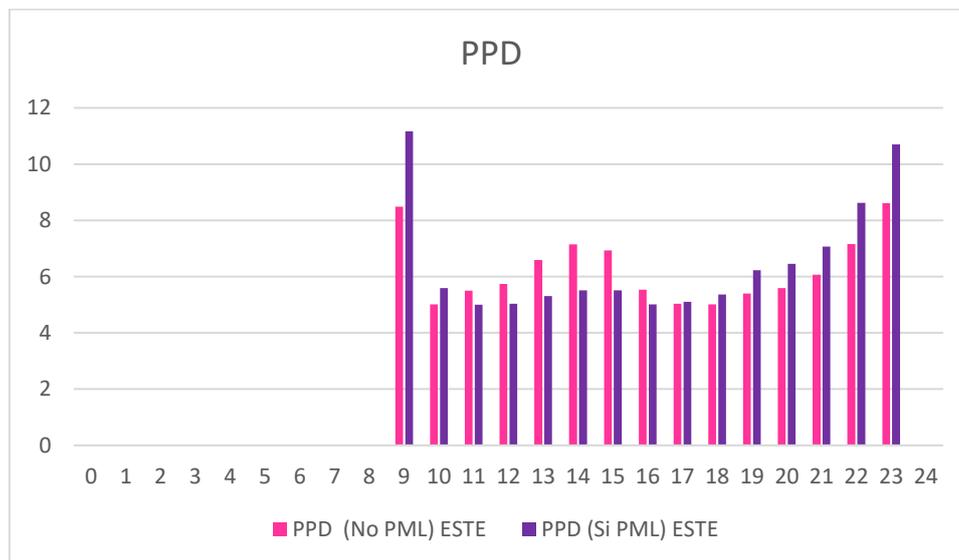
H10. Evolución humedad relativa agosto 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 60% de las 15 a las 24.



H11. Evolución PPD agosto 2020 exposición Este

El índice PMV accionando el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el signo positivo, sólo de las 11 a las 16 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno.

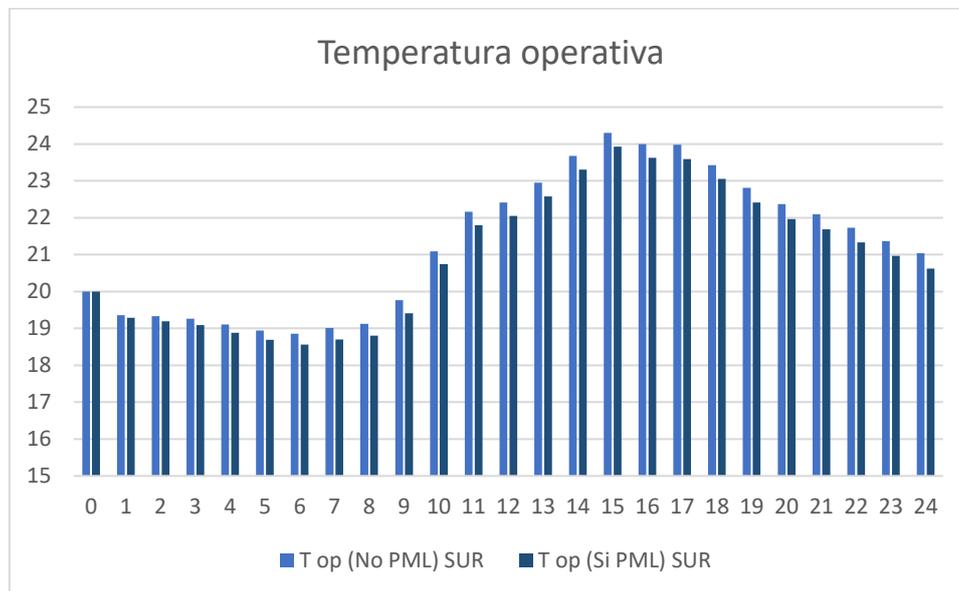


H12. Evolución PPD agosto 2020 exposición Este

También el índice PPD disminuye de las 14 a las 16 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

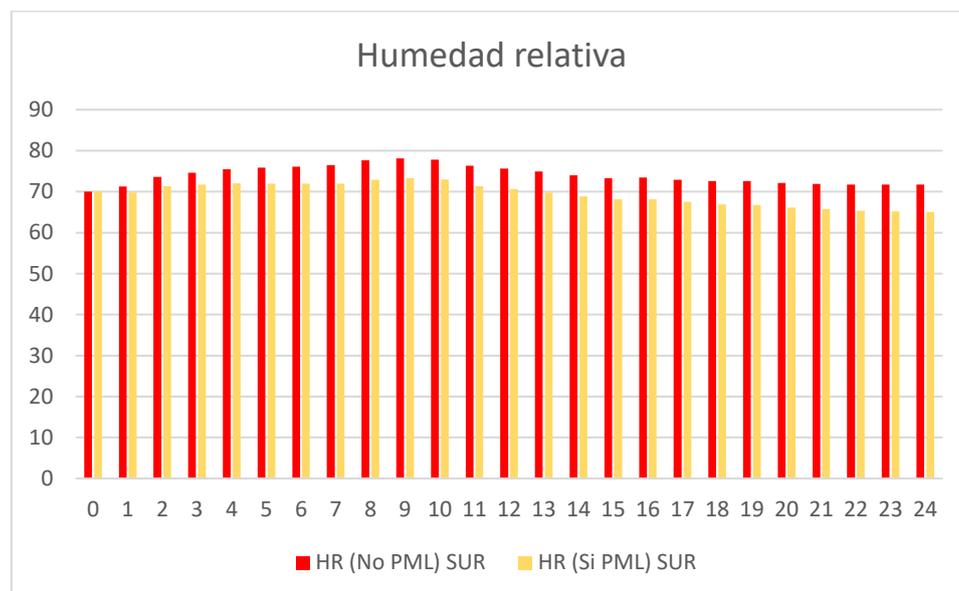
# I. Septiembre

En septiembre, orientando el panel hacia el sur:



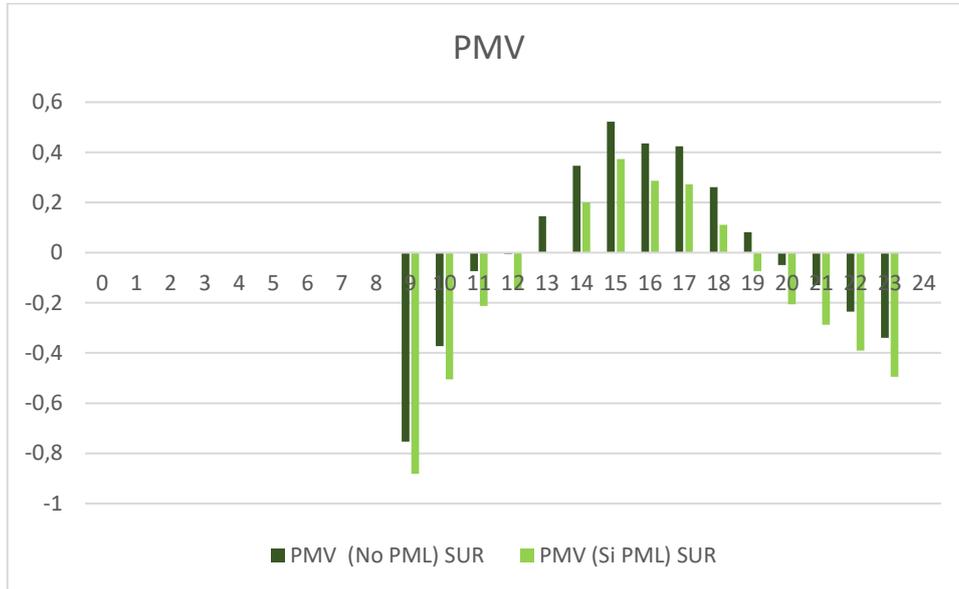
I1. Evolución de la temperatura operando septiembre 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



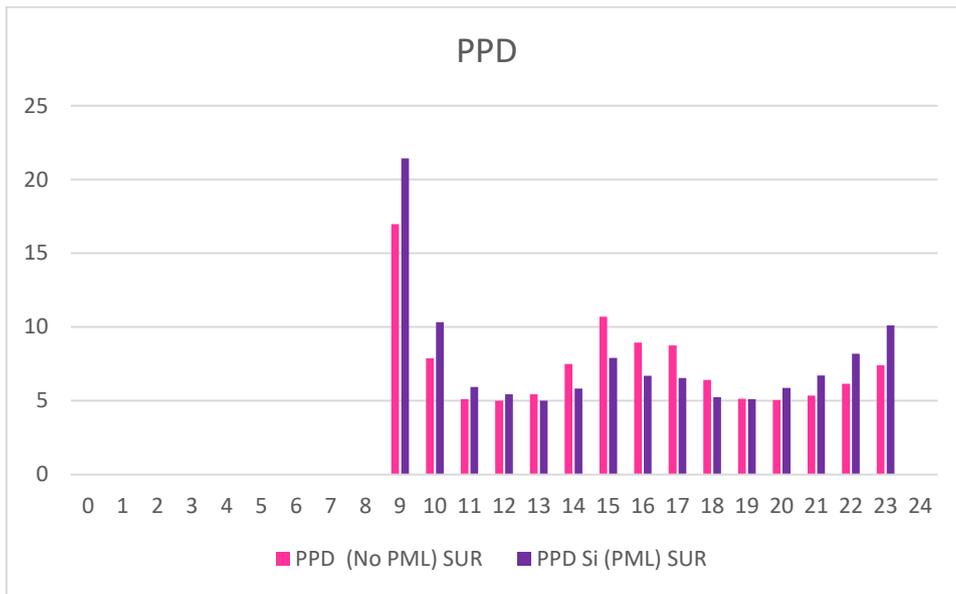
I2. Evolución humedad relativa septiembre 2020 exposición Sur

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 70% de las 14 a las 24.



### 13. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Sur

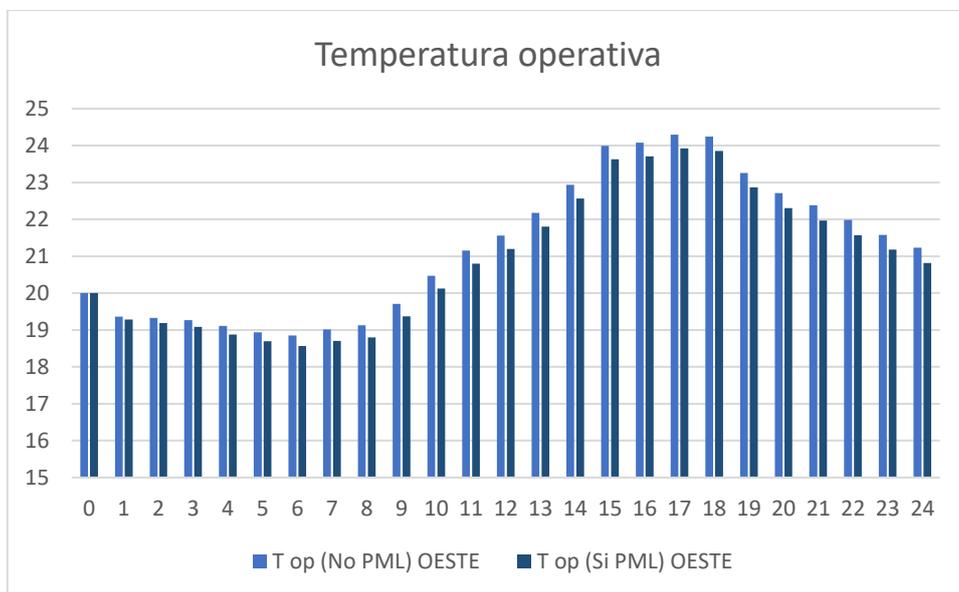
El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el signo positivo, de las 13 a las 19 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno con relación al resto de horas del día en que el valor disminuye en el verso negativo.



14. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Sur

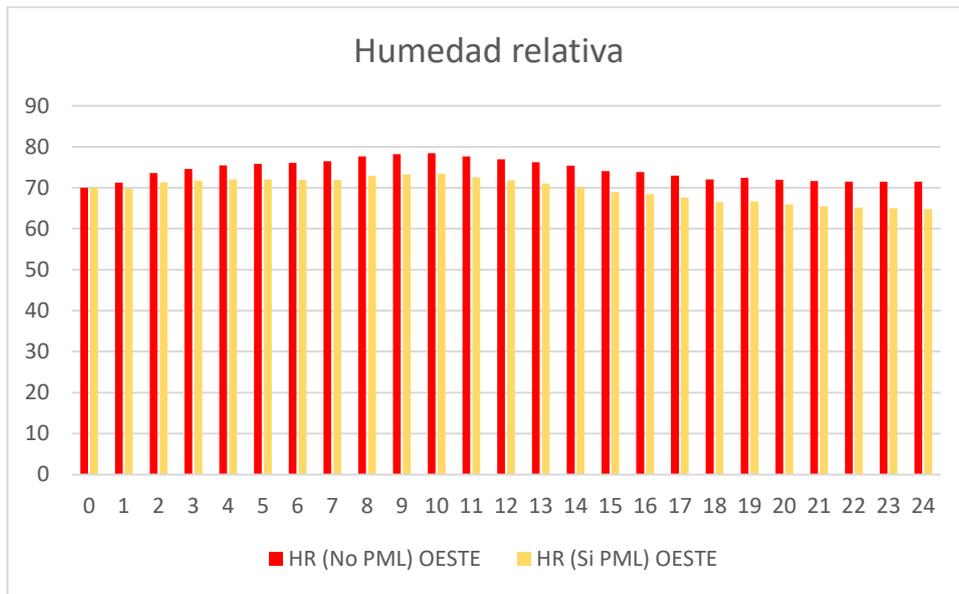
Incluso el índice PPD disminuye de las 13 a las 19 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



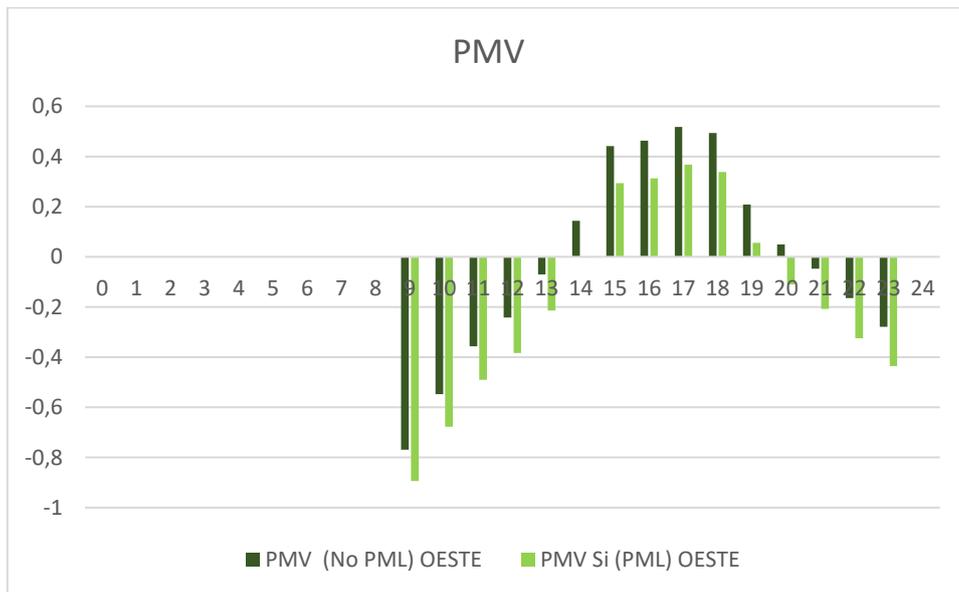
15. Evolución de la temperatura operando septiembre 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



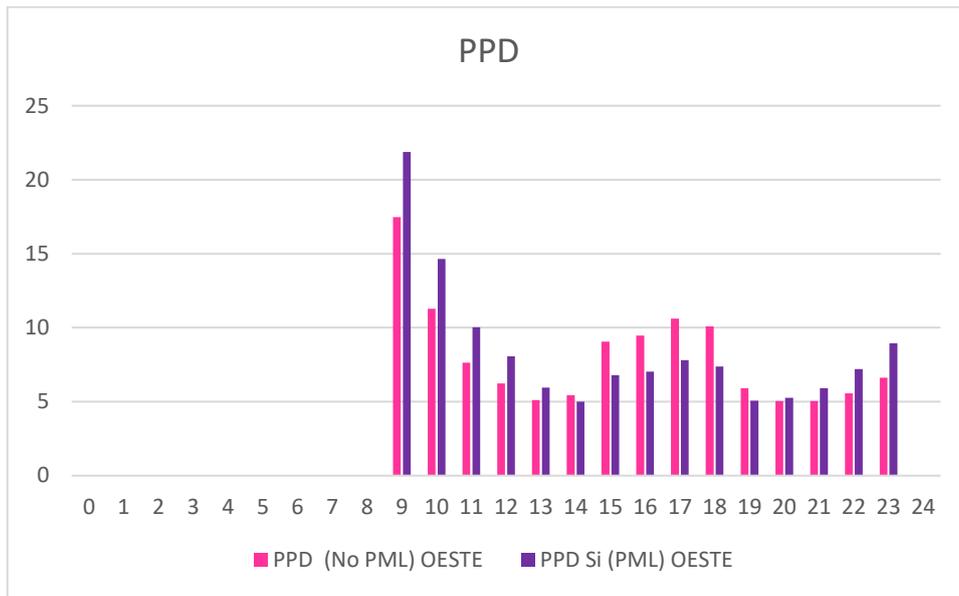
16. Evolución humedad relativa septiembre 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 70% de las 14 a las 24.



17. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Oeste

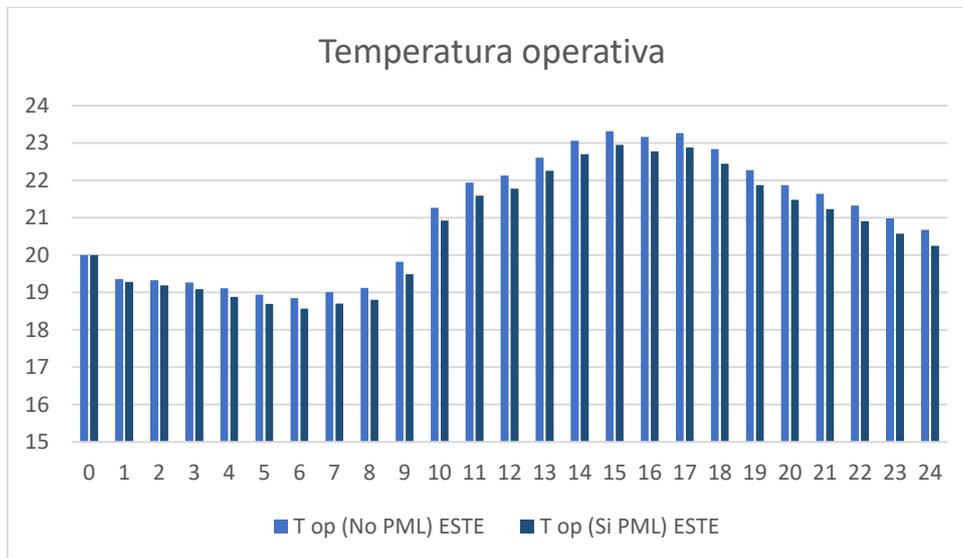
El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el lado positivo, de las 14 a las 19 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno con relación al resto de horas del día en que el valor disminuye en el lado negativo.



18. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Oeste

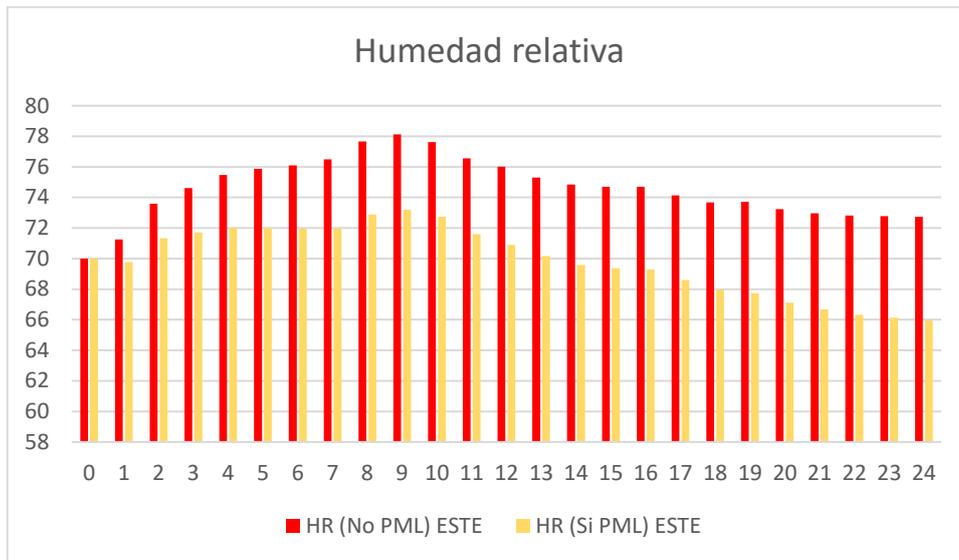
También el índice PPD disminuye de las 14 a las 19 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



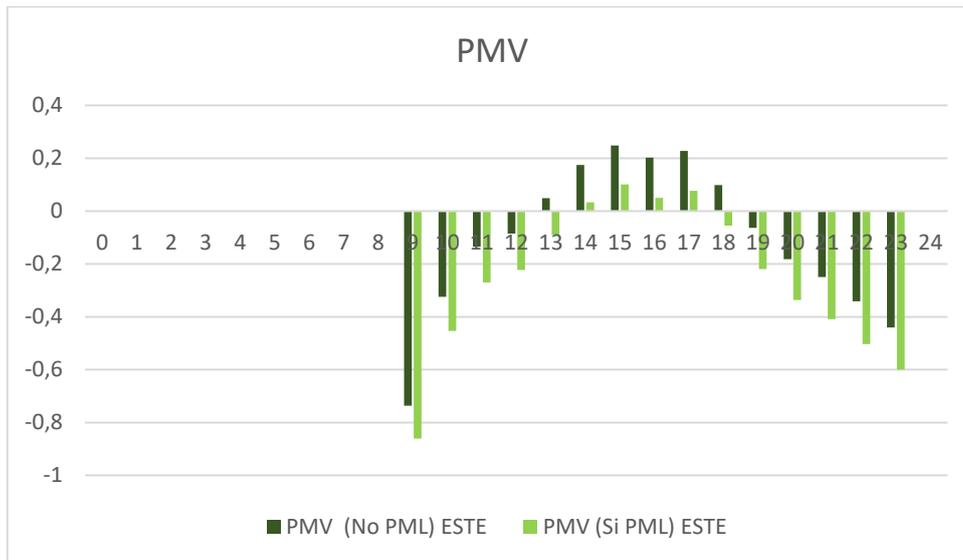
19. Evolución de la temperatura operando septiembre 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye de manera poco significativa durante el día al accionar el funcionamiento del panel.



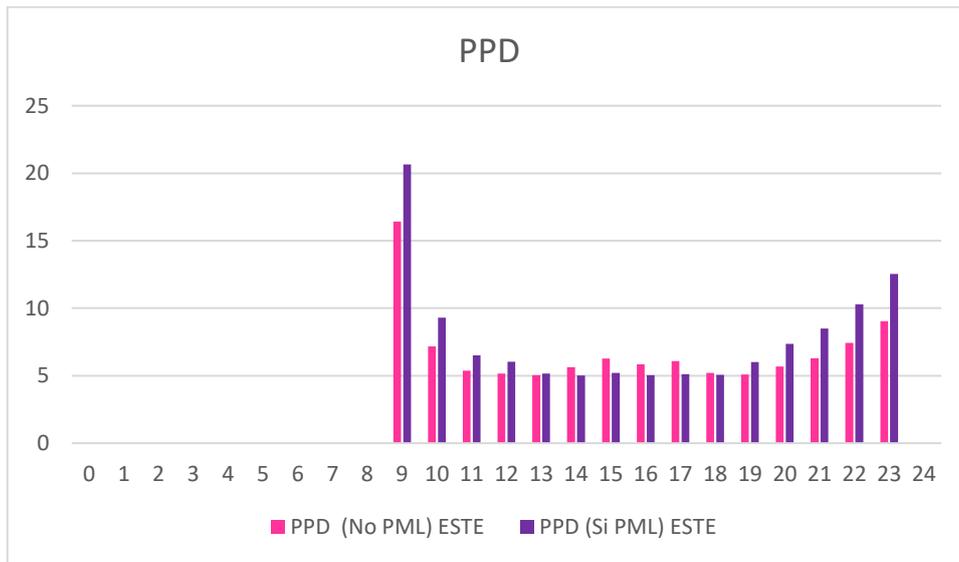
I10. Evolución humedad relativa septiembre 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye progresivamente con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 70% de las 14 a las 24.



I11. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Este

El índice PMV al accionar el funcionamiento del panel sufre una reducción, en el verso positivo, de las 14 a las 18 aumentando así en este lapso el confort en el ambiente interno con relación al resto de horas del día en que el valor disminuye en el verso negativo.

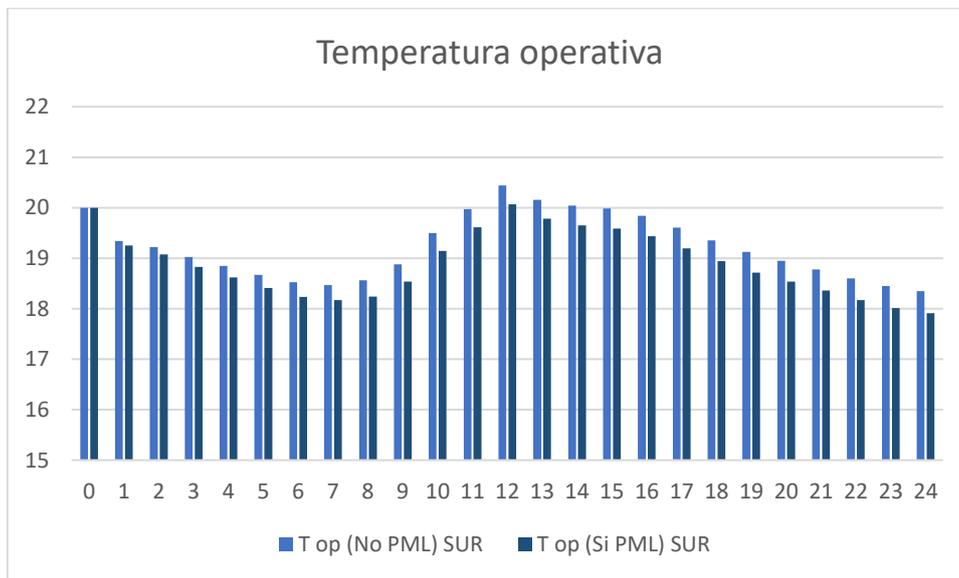


I12. Evolución PPD septiembre 2020 exposición Este

Incluso el índice PPD disminuye de las 14 a las 18 generando un aumento del confort interno con respecto al resto de horas del día.

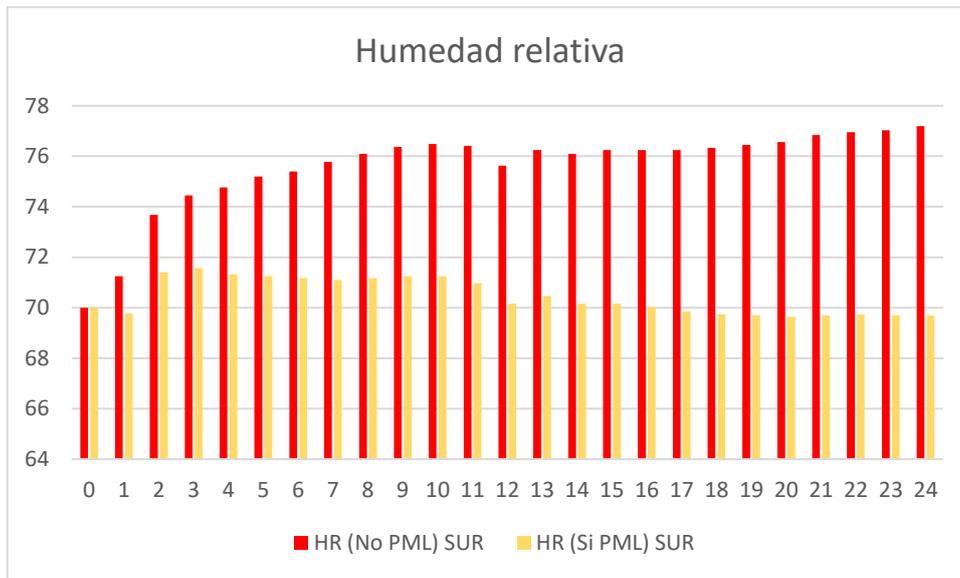
## L. Octubre

En octubre, exponiendo el panel hacia el sur:



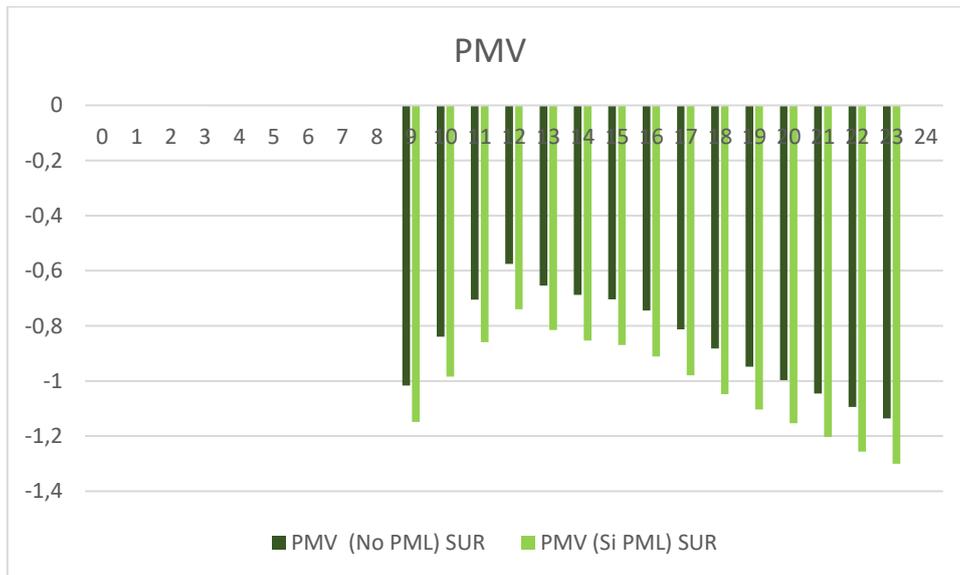
L1. Evolución de la temperatura operando octubre 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye significativamente durante el día al accionar el panel en comparación con la condición inicial.



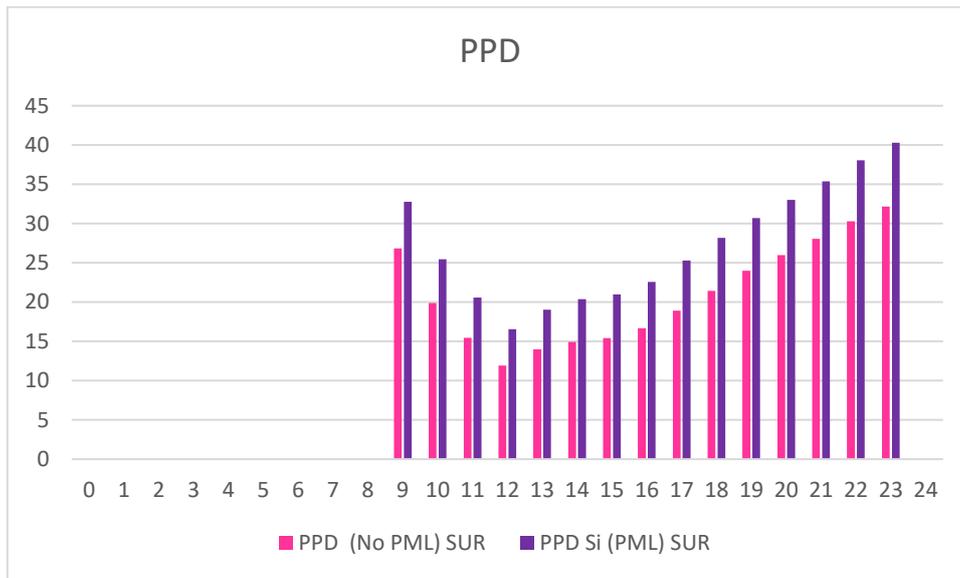
L2. Evolución humedad relativa octubre 2020 exposición Sur

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente inferiores al 70% de las 16 a las 24.



L3. Evolución PPD octubre 2020 exposición Sur

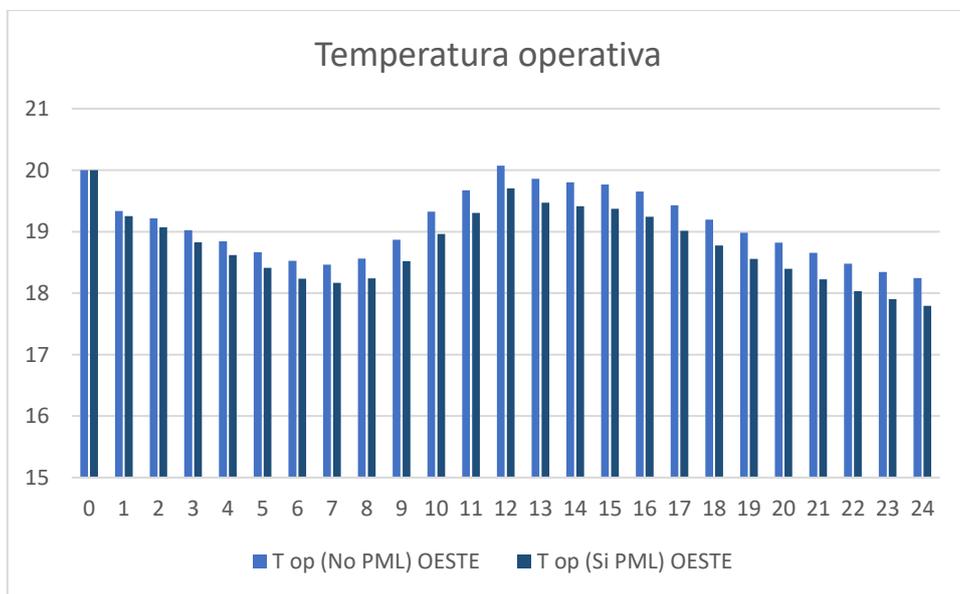
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.2 a las 23, esto implica un aumento del discomfort en cada momento del día.



L4. Evolución PPD octubre 2020 exposición Sur

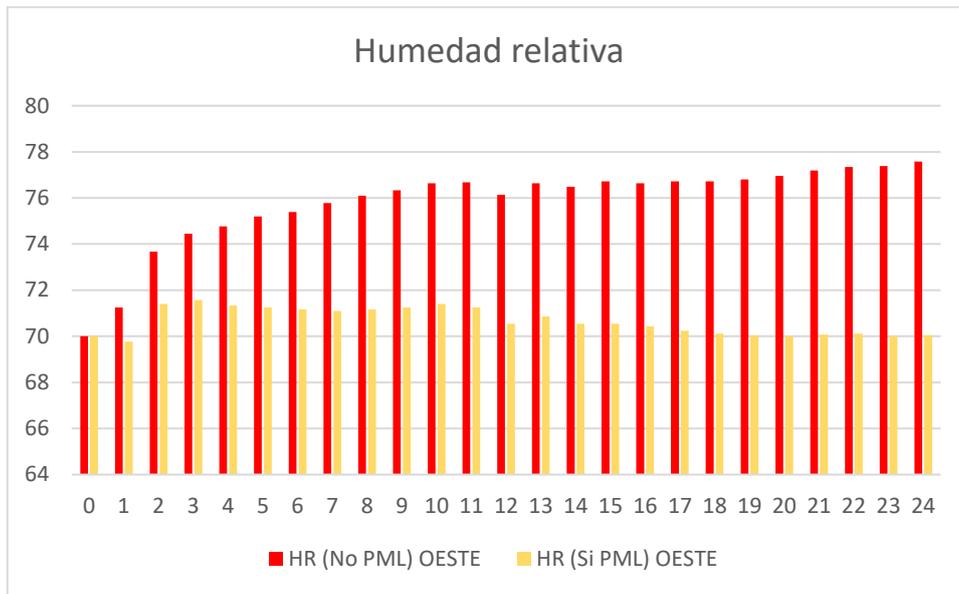
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



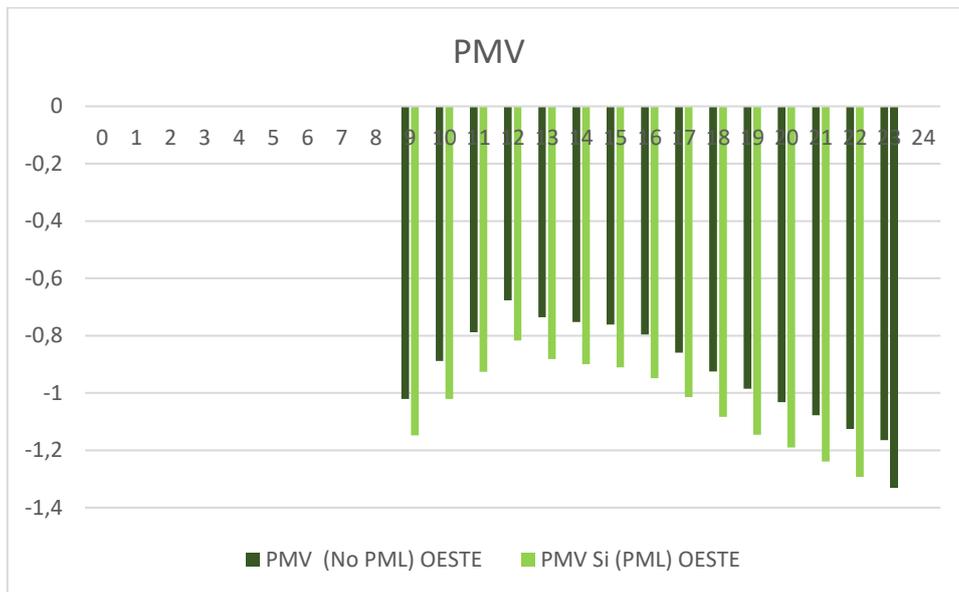
L5. Evolución de la temperatura operando octubre 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa, como en el caso anterior, disminuye de manera significativa durante el día accionando el funcionamiento del panel.



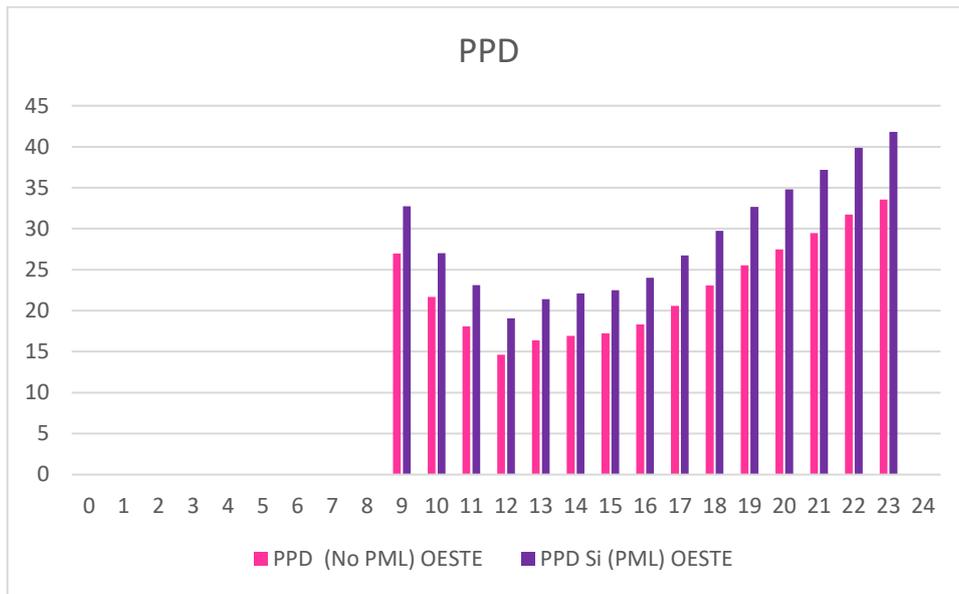
L6. Evolución de la humedad relativa octubre 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye con el uso del panel llegando a valores ligeramente superiores al 70% durante todo el día.



L7. Evolución PPD octubre 2020 exposición Oeste

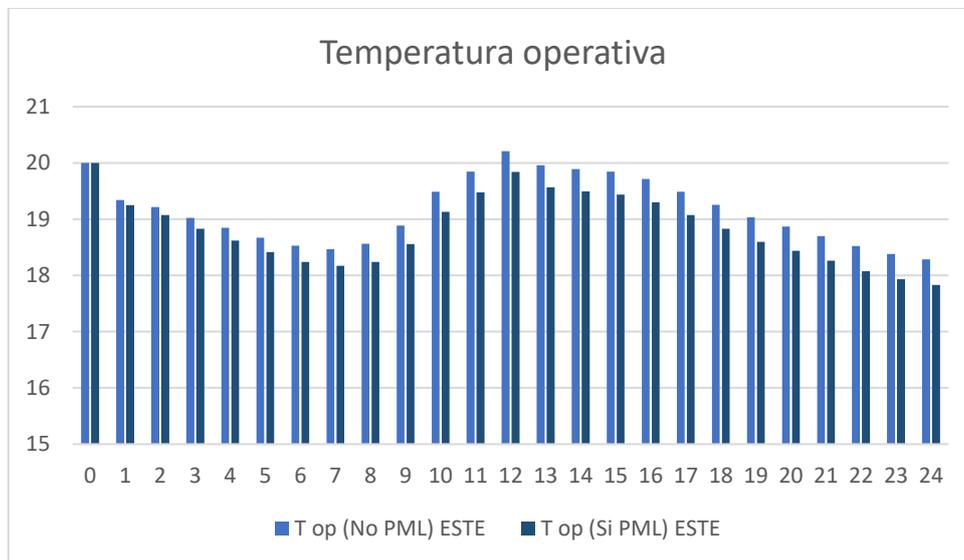
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.2 a las 23 aumentando el nivel de discomfort.



L8. Evolución PPD octubre 2020 exposición Oeste

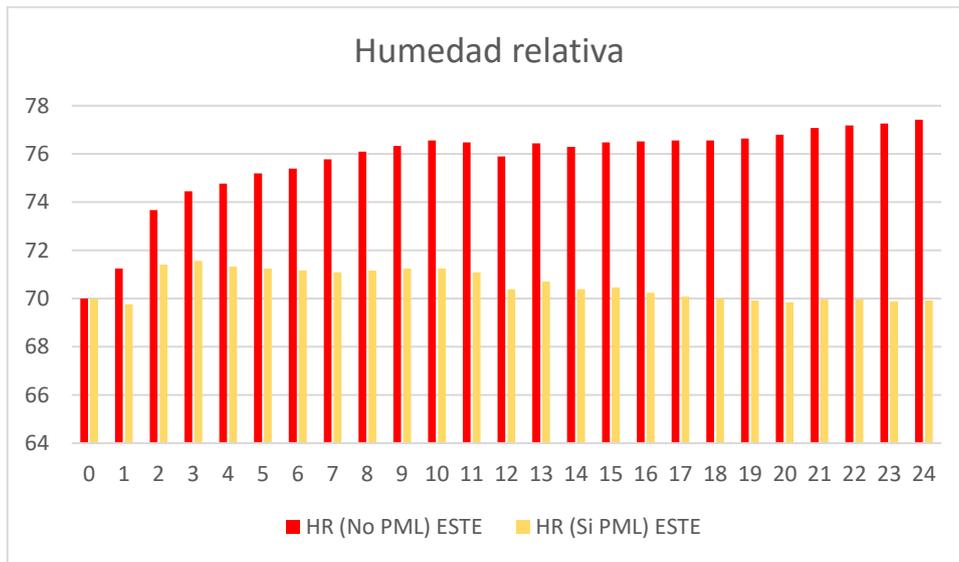
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



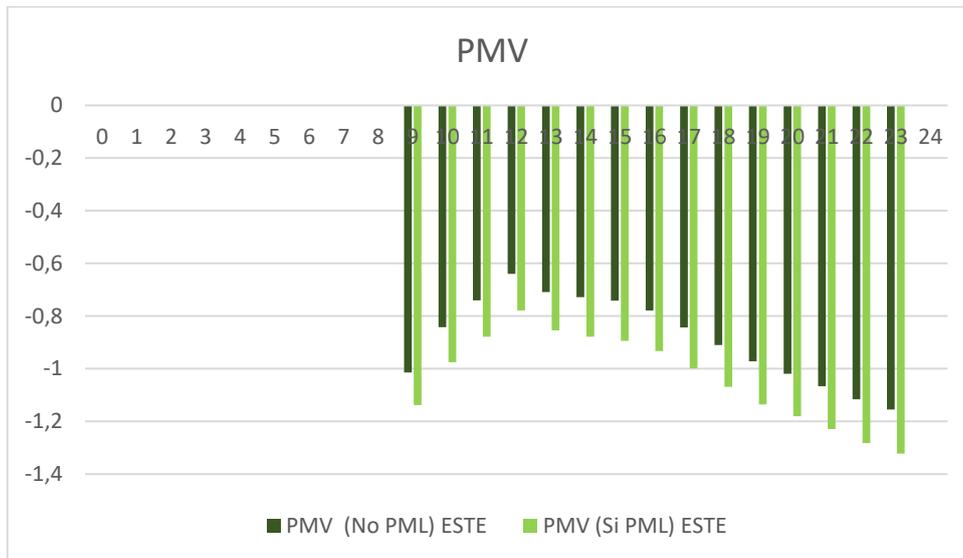
L9. Evolución de la temperatura operando octubre 2020 exposición Este

La temperatura operativa, como en el caso anterior, disminuye de manera significativa durante el día accionando el funcionamiento del panel.



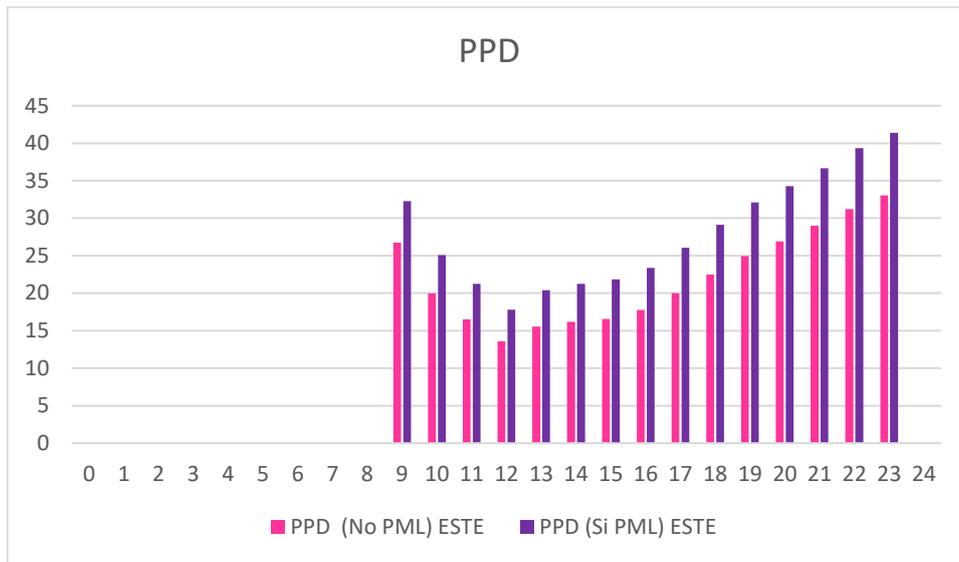
L10. Tendencia humedad relativa octubre 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye con el uso del panel llegando a valores ligeramente superiores al 70% durante todo el día.



L11. Evolución PPD octubre 2020 exposición Este

Los valores de PMV, con el uso del panel, aumentan en el verso negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.2 a las 23 provocando un aumento del discomfort.

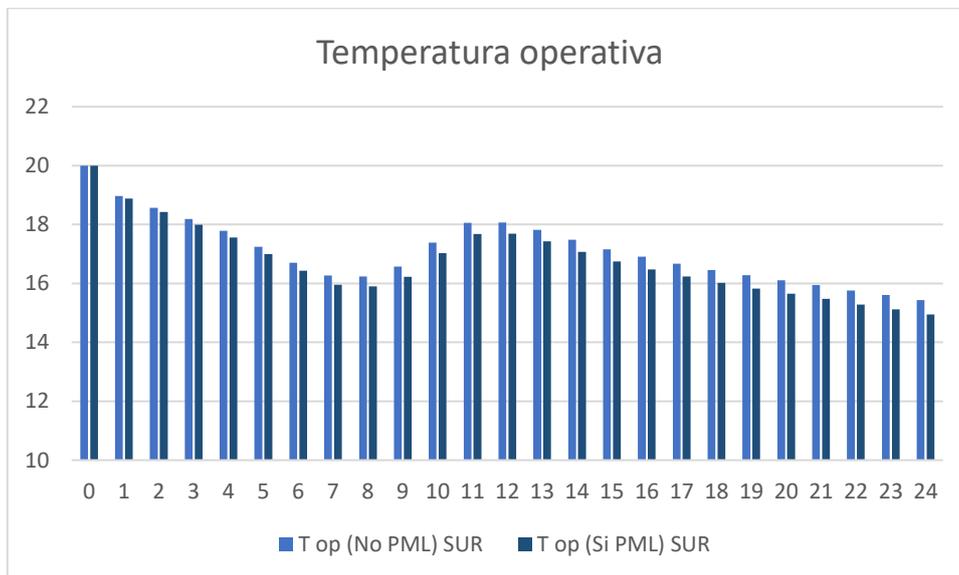


L12. Evolución PPD octubre 2020 exposición Este

También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

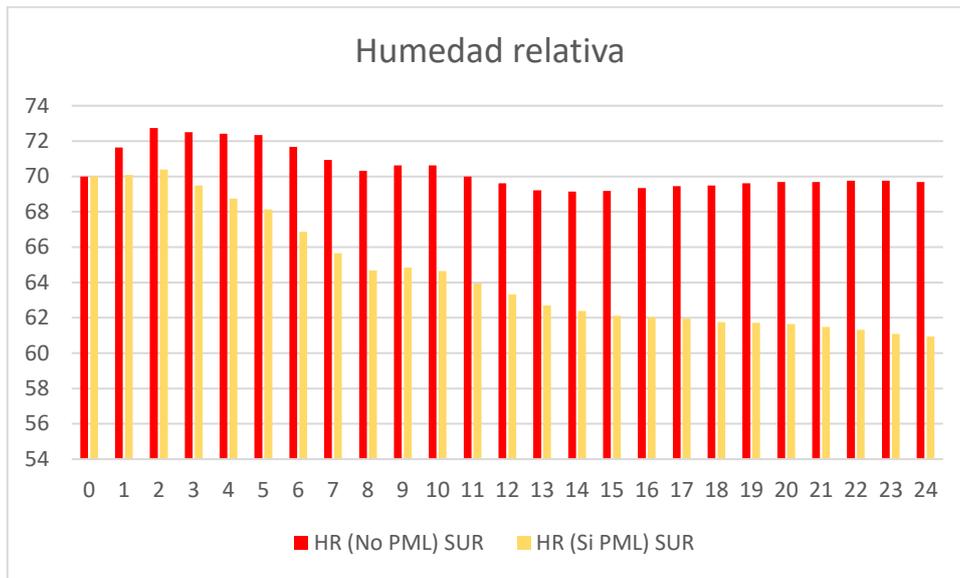
## M. Noviembre

En noviembre, exponiendo el panel al sur:



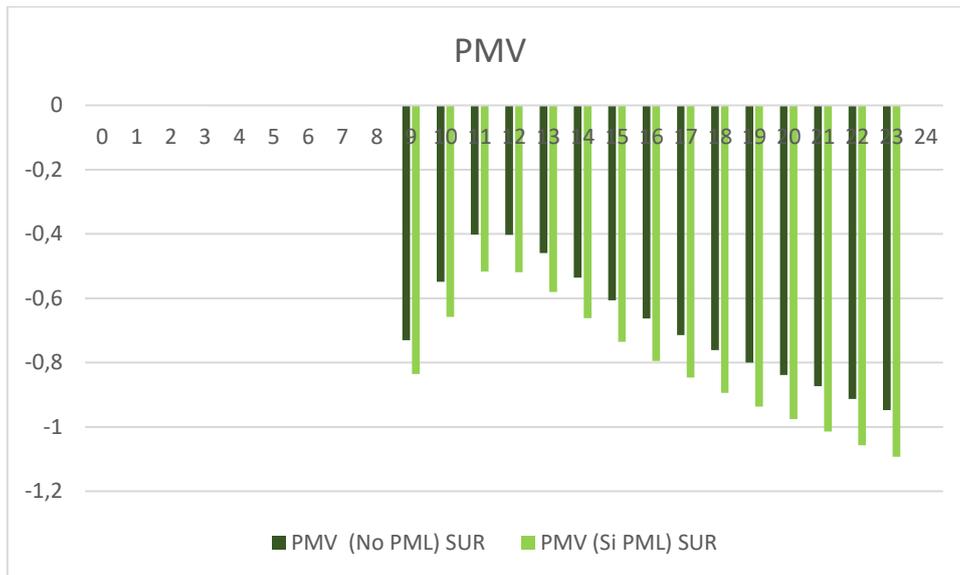
M1. Evolución de la temperatura operando noviembre 2020 exposición Sur

La temperatura operativa disminuye durante el día al accionar el funcionamiento del panel con respecto a la condición inicial.



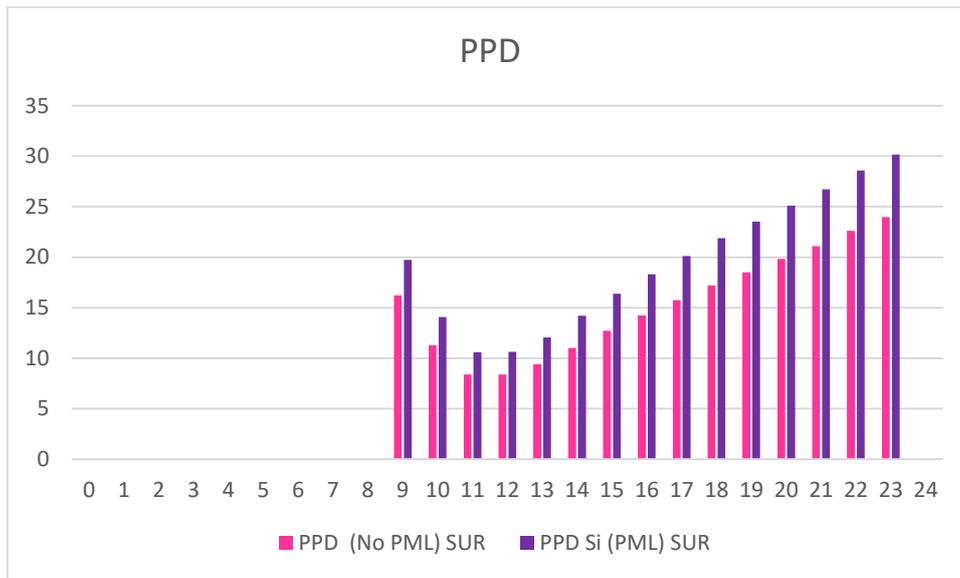
M2. Evolución de la humedad relativa noviembre 2020 Exposición Sur

La humedad relativa disminuye con el uso del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante todo el día.



M3. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Sur

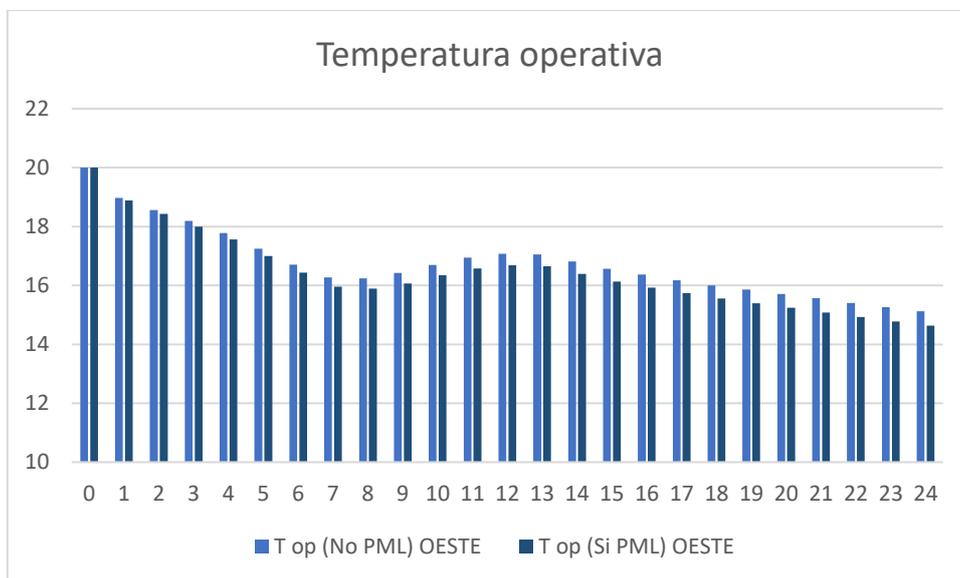
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.



M4. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Sur

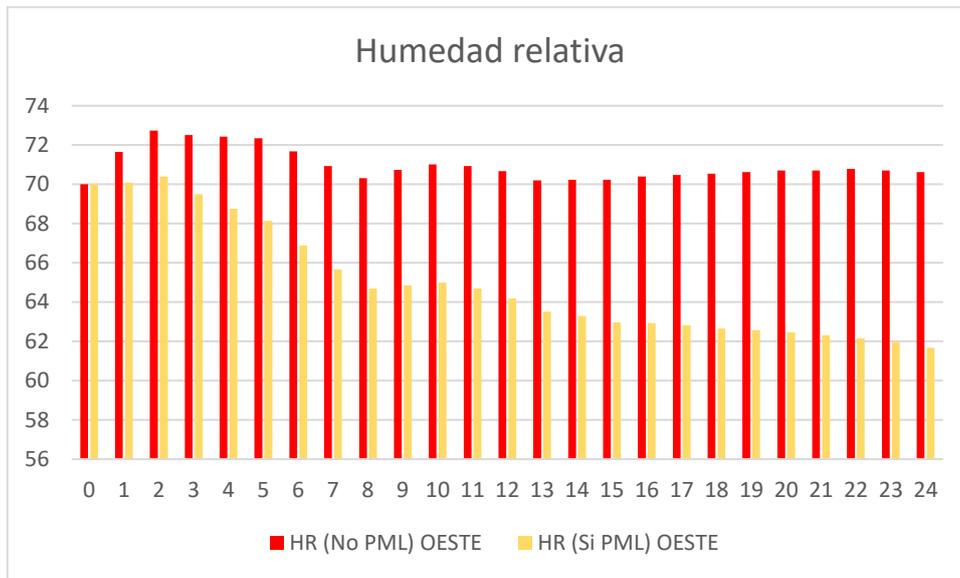
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



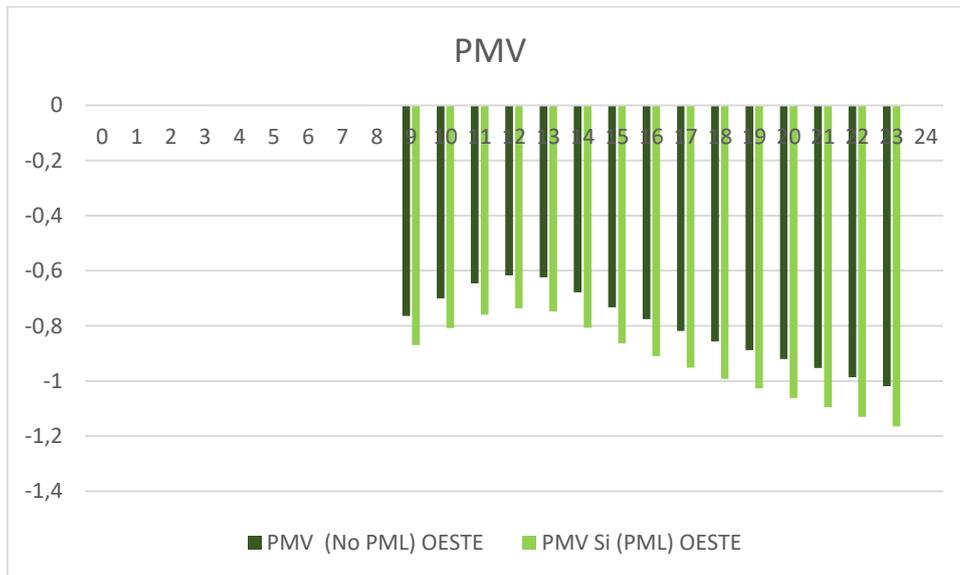
M5. Evolución de la temperatura operando noviembre 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa disminuye durante el día al accionar el funcionamiento del panel con respecto a la condición inicial.



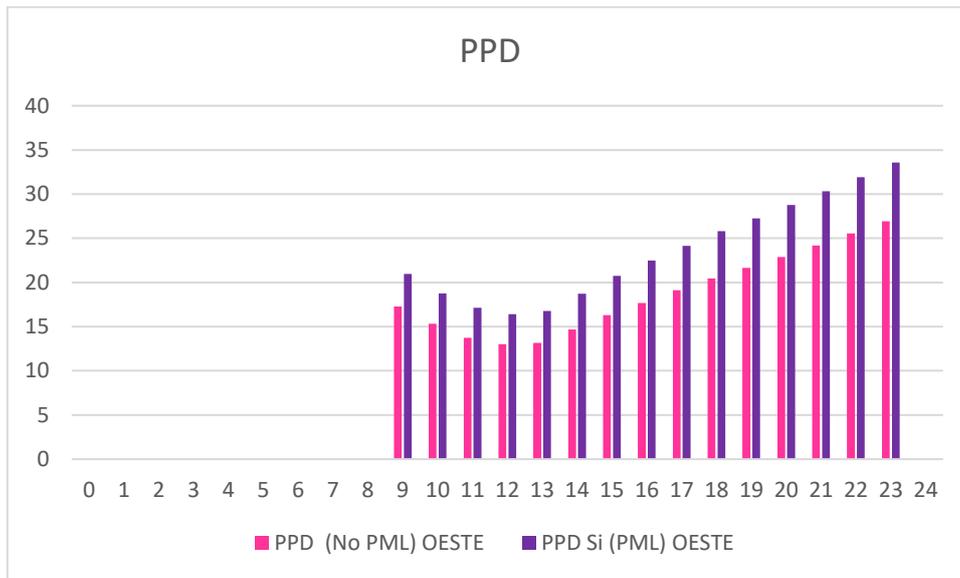
M6. Evolución de la humedad relativa noviembre 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye con el uso del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante todo el día.



M7. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Oeste

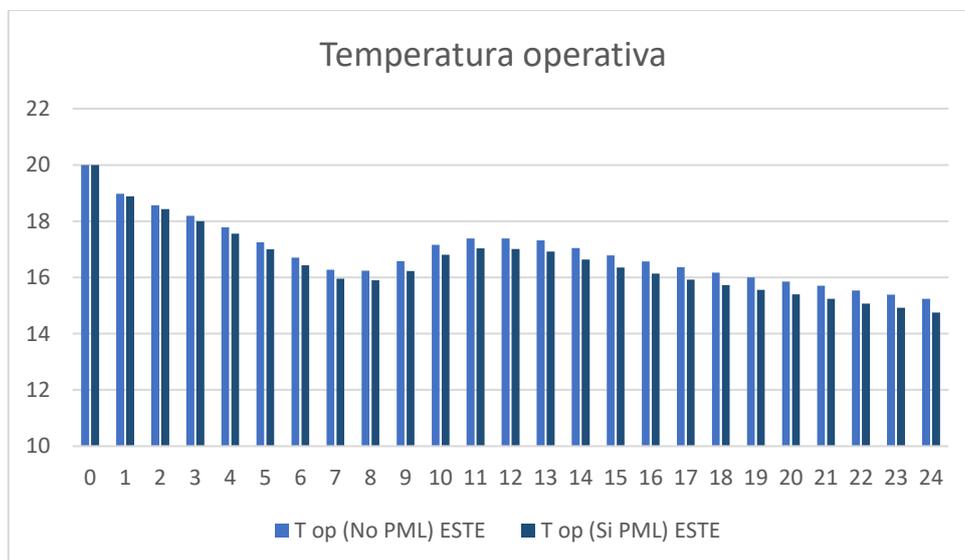
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1 de las 19 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.



M8. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Oeste

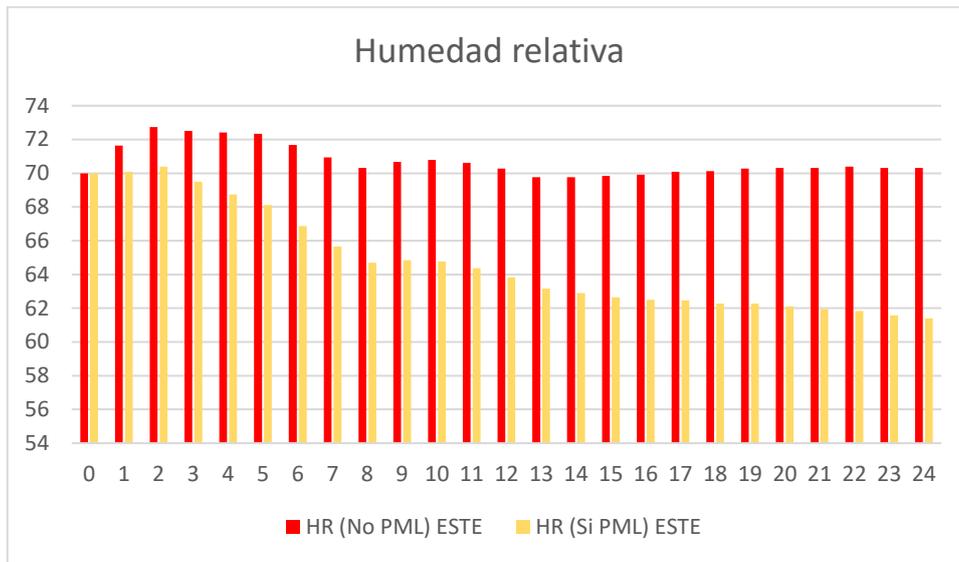
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



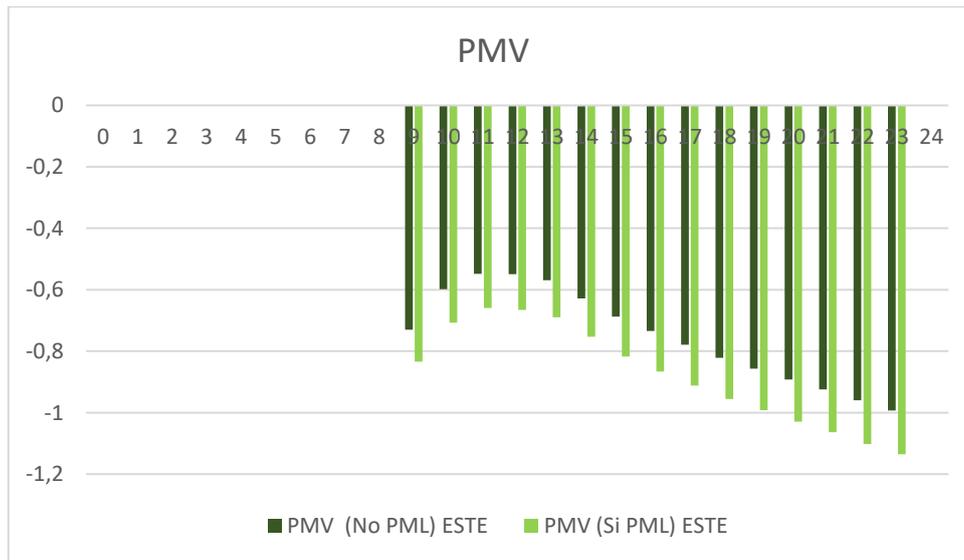
M9. Evolución de la temperatura operando noviembre 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye durante el día al accionar el funcionamiento del panel con respecto a la condición inicial.



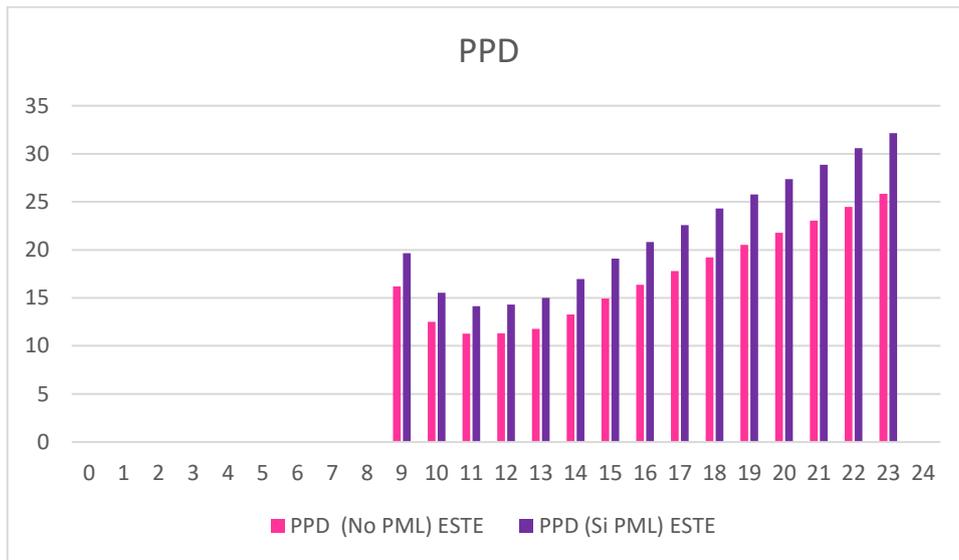
M10. Evolución humedad relativa noviembre 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye con el uso del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante todo el día.



M11. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Este

Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1 de 21 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.

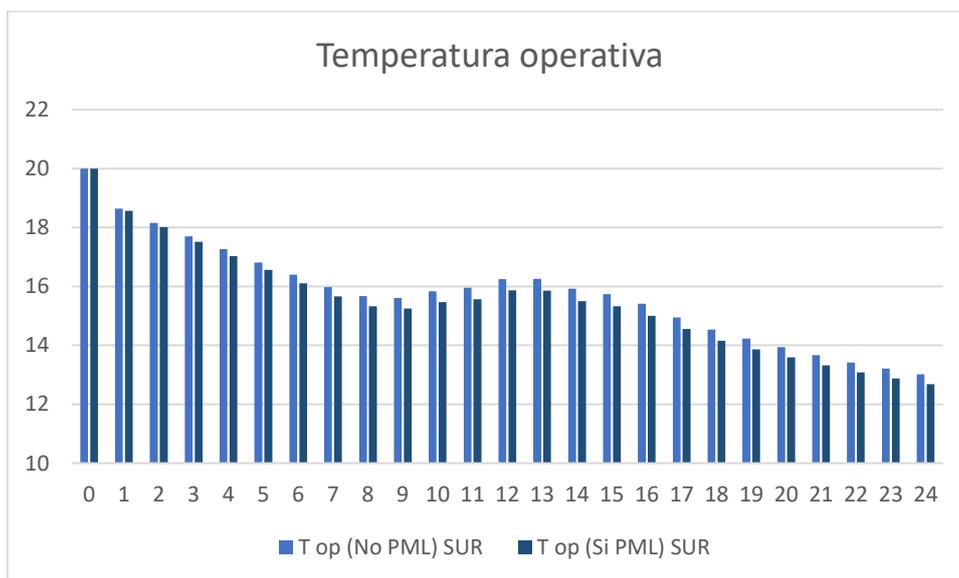


M12. Evolución PPD noviembre 2020 exposición Este

También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

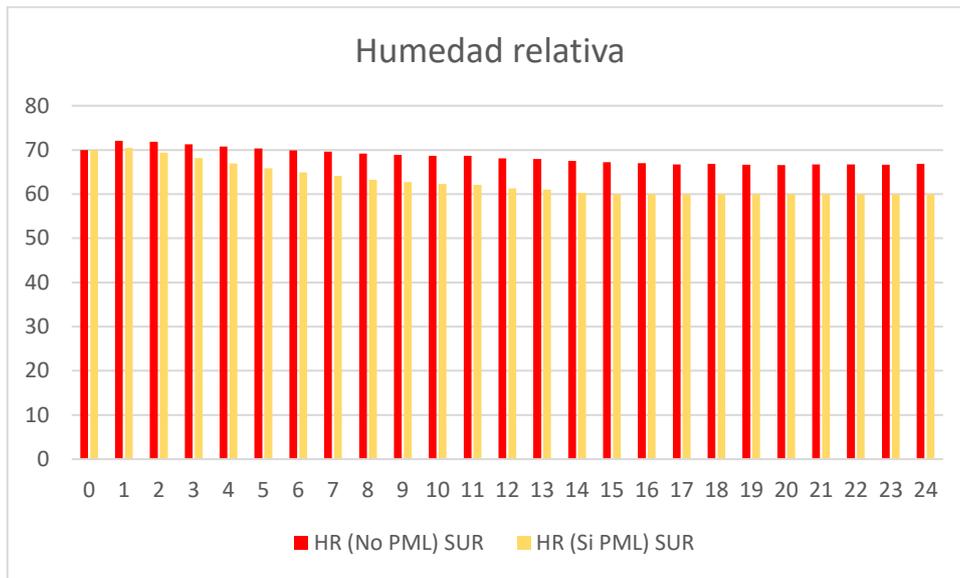
## N. Diciembre

En diciembre, exponiendo el panel al sur:



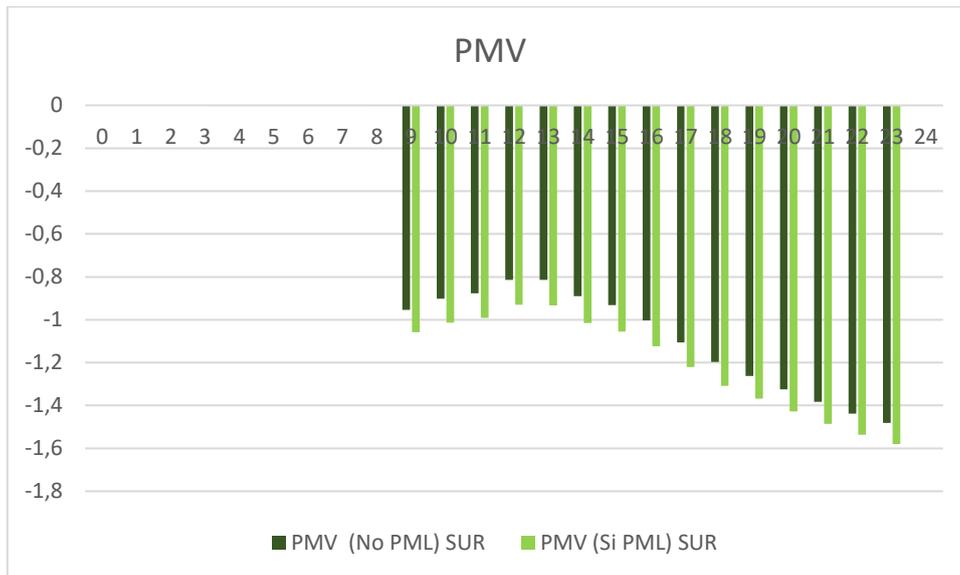
N1. Evolución de la temperatura de funcionamiento diciembre 2020 Exposición Sur

La temperatura operativa disminuye durante el día mediante el funcionamiento del panel.



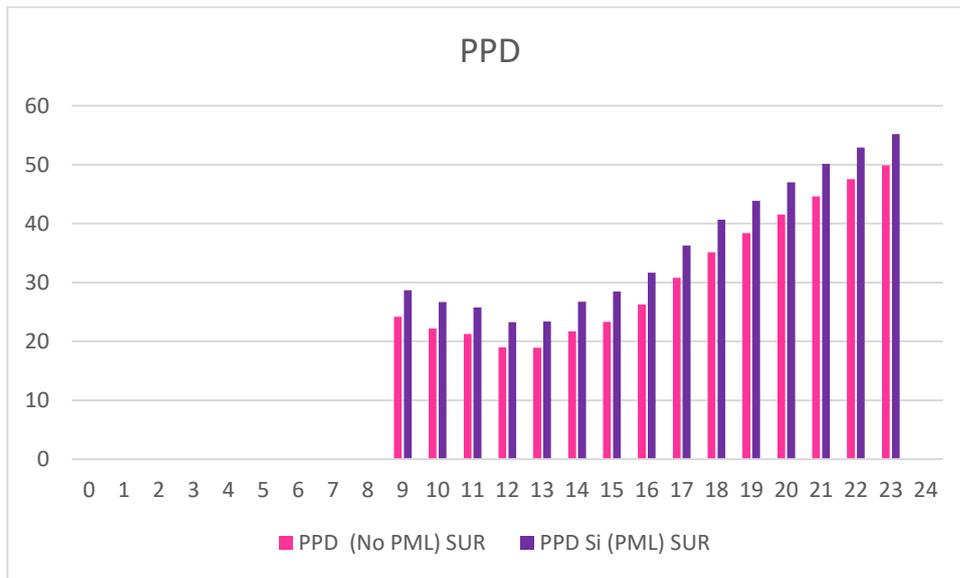
N2. Evolución de la humedad relativa diciembre 2020 Exposición Sur

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante casi todo el arco del día.



N3. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Sur

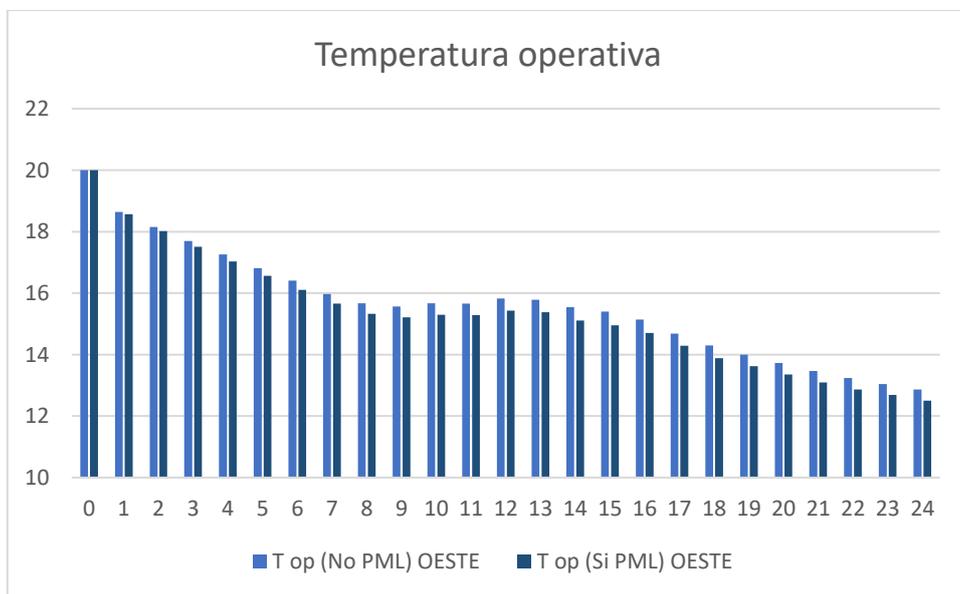
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.4 de las 20 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.



N4. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Sur

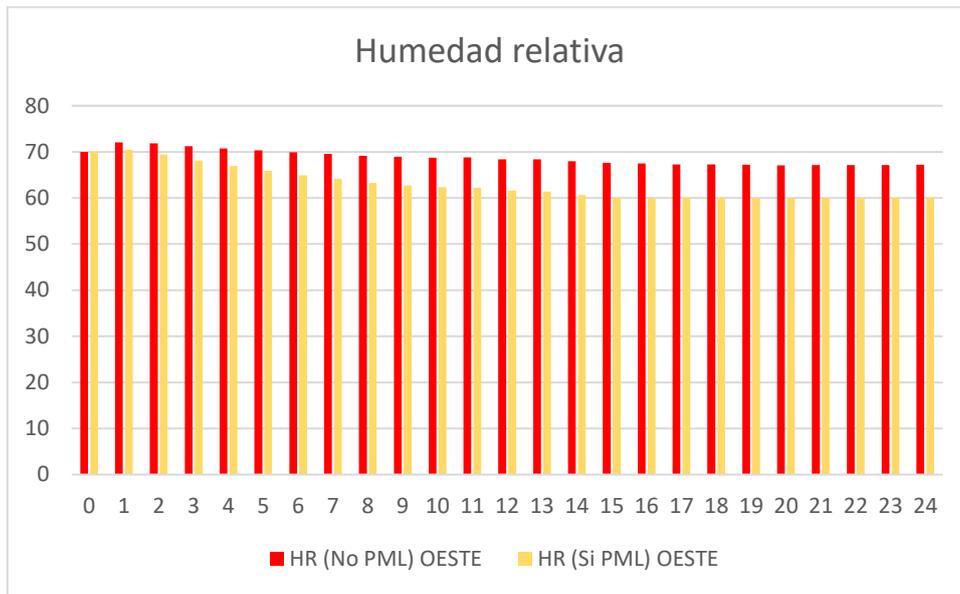
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Exponiendo el panel hacia el oeste en su lugar:



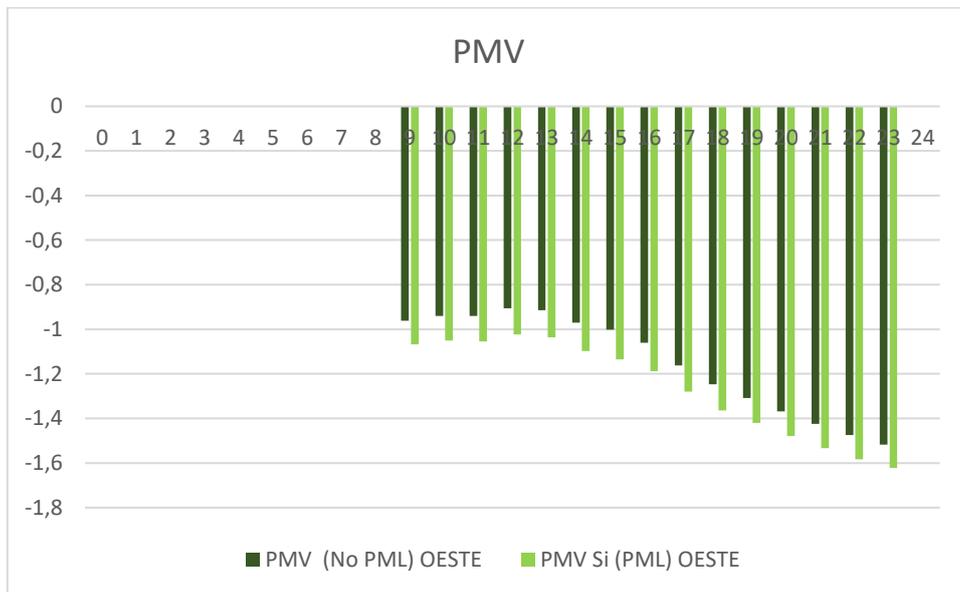
N5. Evolución de la temperatura de funcionamiento diciembre 2020 exposición Oeste

La temperatura operativa disminuye durante el día mediante el funcionamiento del panel.



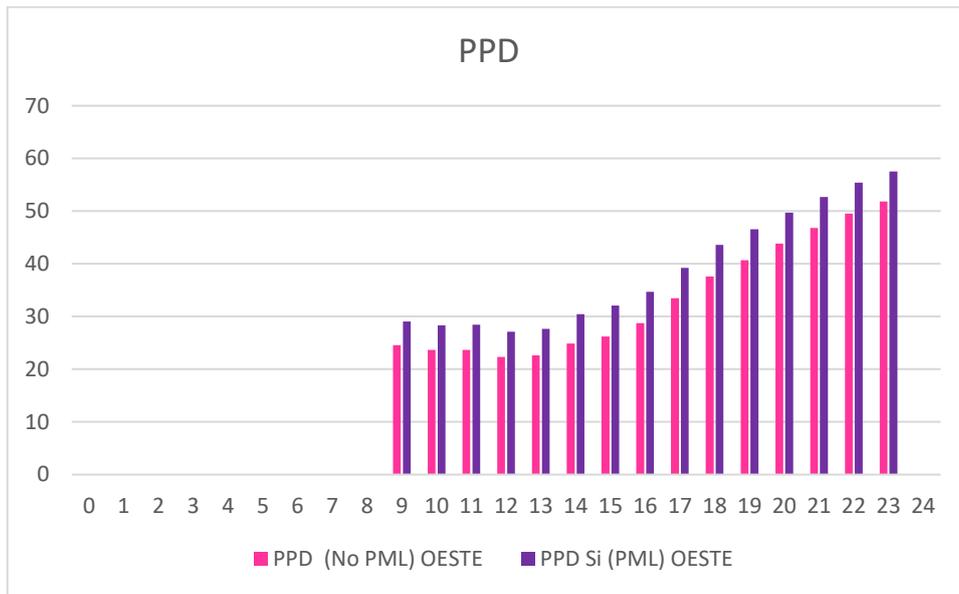
N6. Evolución de la humedad relativa diciembre 2020 exposición Oeste

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante casi todo el arco del día.



N7. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Oeste

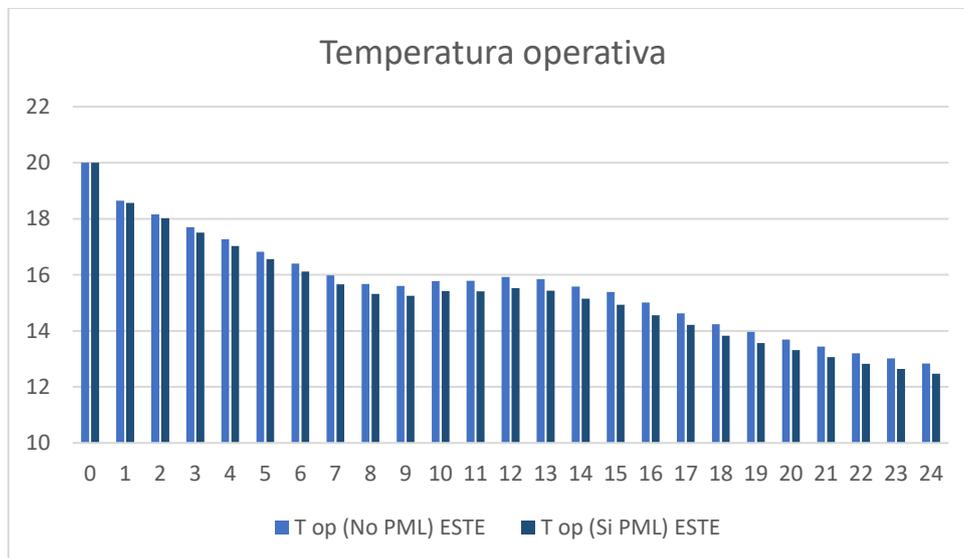
Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.6 de las 20 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.



N8. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Oeste

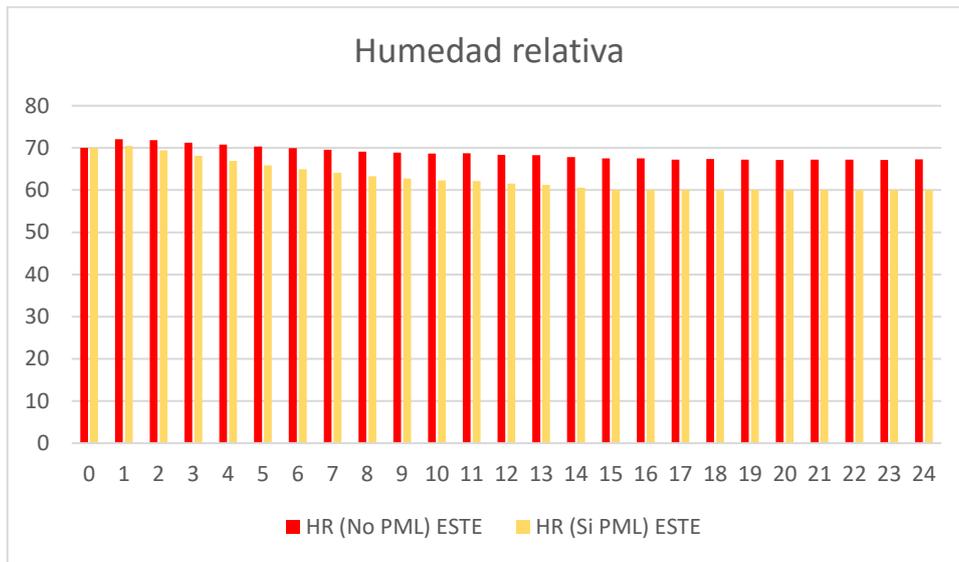
También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.

Cambiando la exposición hacia el este se obtiene:



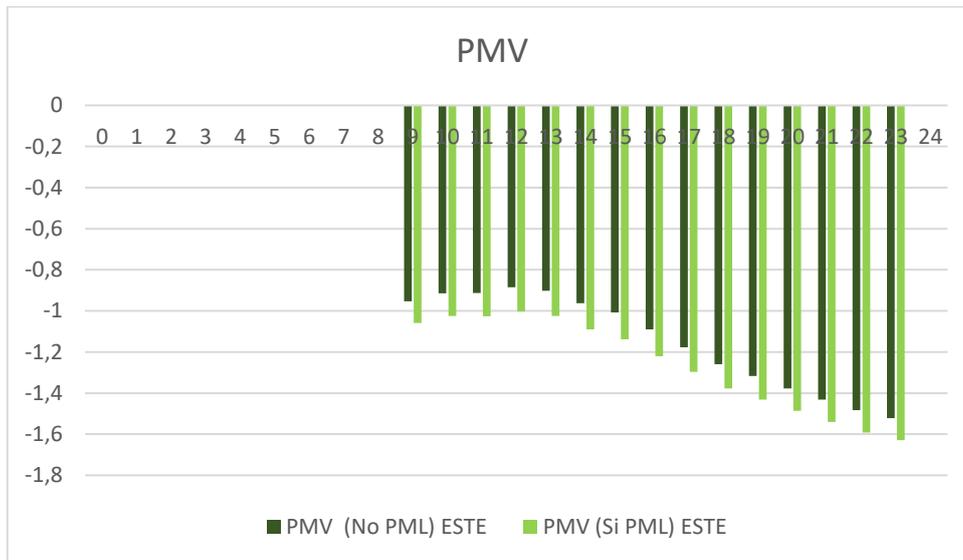
N9. Evolución de la temperatura de funcionamiento diciembre 2020 exposición Este

La temperatura operativa disminuye durante el día mediante el funcionamiento del panel.



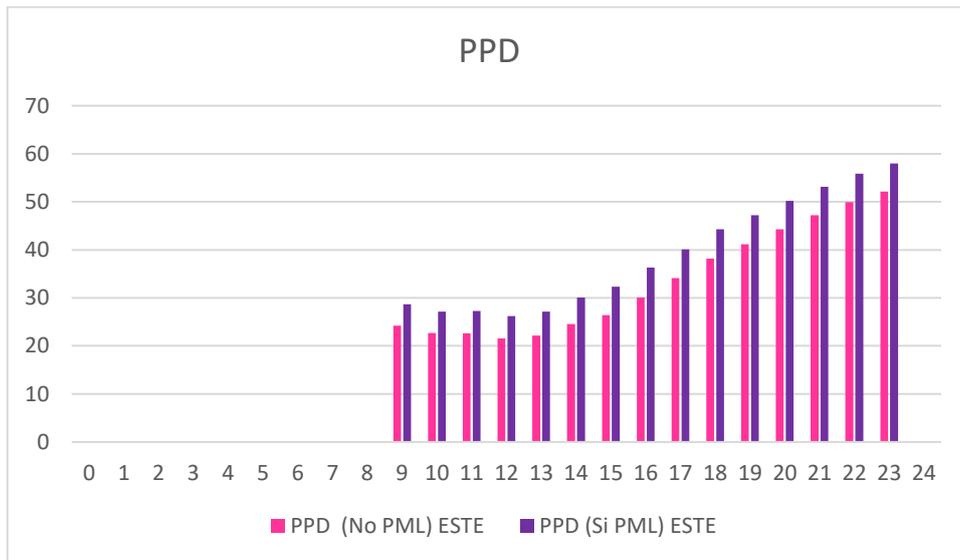
N10. Evolución humedad relativa diciembre 2020 exposición Este

La humedad relativa disminuye con la utilización del panel llegando a valores ligeramente superiores al 60% durante casi todo el arco del día.



N11. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Este

Los valores de PMV aumentan, en el lado negativo, en cualquier momento del día con el uso del panel rozando casi el umbral de los -1.6 a las 23, aumentando el nivel de discomfort del ambiente interno.



N12. Evolución PPD diciembre 2020 exposición Este

También para los valores de PPD se observa un aumento con el uso del panel en consecuencia se genera un aumento del discomfort durante todo el arco del día.