

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ciencias Ambientales



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Investigación sobre
climatización sostenible para
arquitectura bioclimática”**

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Sina Elleser

Tutor/a:

**Constantino Torregrosa Cabanilles
Ivan Felis Enguix**

GANDIA, 2019

RESUMEN

La temática del siguiente trabajo gira alrededor de la arquitectura bioclimática. El objetivo se centra en el estudio de dos sistemas, el muro Trombe y el muro EcoCooler. Ambos destinados a conseguir el bienestar y confort higrotérmico en las viviendas aprovechando las condiciones ambientales y minimizando el consumo energético. Se han desarrollado ensayos para cuantificar y poder llegar a una conclusión de la eficacia de estos sistemas. Los experimentos desarrollados se han realizado tanto en laboratorio, en condiciones controladas, como en el exterior. Los resultados obtenidos permiten mejorar la comprensión del desarrollo de estos sistemas.

ABSTRACT

This project is about bioclimatic architecture. The objective is the study of two systems, the Trombe wall and the EcoCooler wall. Both systems have been designed to achieve the hygrothermal comfort in homes taking advantage of environmental conditions and reducing the energy consumption. Models have been developed to quantify and be able to reach a conclusion about the effectiveness of these systems. The experiments developed have been carried out both in the laboratory, under controlled conditions, and outside. The results obtained allow for an improved understanding of their development.

PALABRAS CLAVE

Arquitectura bioclimática, Arduino, muro EcoCooler, muro Trombe, ahorro energético,

KEYWORDS

Bioclimatic architecture, Arduino, EcoCooler wall, Trombe wall, Energy saving,

Con este trabajo finaliza una carrera que empezó a través del conocimiento y respeto a la naturaleza motivado por mis padres; a ellos, gracias. A Bianca, Zule, Irene, Cris, Rober y Pepe F., por haberme ayudado; a todos ellos gracias. Y, sobre todo, en este camino, agradezco a Ivan por mostrarme nuevos retos y motivarme a realizar este trabajo; por estar ahí, siempre.

Una sociedad se define no solo por lo que crea, sino por lo que se niega a destruir.
John C. Sawhill

ÍNDICE

1. Introducción	6
2. El bienestar ambiental	8
2.1. Introducción.....	8
2.2. Condiciones de ambiente higrotérmico	8
2.3. Diagramas de bienestar higrotérmico	9
2.3.1. Diagrama de bienestar de Olgay	9
2.3.3. Diagrama de bienestar de Givoni.....	10
2.4 Diagramas de isoplefas o Climograma	11
3. Sistemas de ventilación pasiva	12
3.1. Introducción.....	12
3.2. Estrategias bioclimáticas en climas cálidos	13
3.2.1. Actuaciones contra el sobrecalentamiento.....	13
3.2.2. Actuaciones contra la sensación de calor, sin enfriamiento.....	13
3.2.3. Actuaciones directas de enfriamiento.....	13
3.3. La ventilación como estrategia combinada	14
3.4. Caso en estudio: el muro Trombe	15
3.4.1. Principio de funcionamiento.....	15
3.4.2. Diseño desarrollado	16
3.5. Caso en estudio: el muro EcoCooler	20
3.5.1. Principio de funcionamiento.....	20
3.5.2. Diseño desarrollado	21
4. Recopilación de datos	23
4.1. Medidas de parámetros climáticos.....	23
4.2. Medidas de muro Trombe	24
4.2.1. Sistemas para la adquisición de datos	24
4.2.1. Configuración de medidas en laboratorio	25
4.2.3. Configuración de medidas in situ	26
4.3. Medidas de muro EcoCooler	27
4.3.1. Configuración de la adquisición de datos	27
4.3.2. Configuraciones de medida con diseño único	28
4.3.3. Medidas con diseño múltiple.....	28
5. Análisis de resultados	29
5.1. Análisis de parámetros climáticos.....	29
5.1.1. Diagrama higrométrico de Olgay	29
5.1.2. Diagrama higrométrico de Givoni.....	30
5.2. Análisis de muro Trombe	31
5.2.1. Medidas en laboratorio.	31
5.2.2. Medidas in situ	37
5.3. Análisis de muro EcoCooler	39
5.3.1. Medidas en diseño único	39
5.3.2. Medidas en diseño múltiple	42
6. Conclusiones	45

Bibliografía	46
Lista de figuras	47
Lista de tablas	48
ANEXO A. Fichas técnicas de instrumentación utilizada	49
A.1. Termómetro digital 110 Testo.....	49
A.2. Sensores térmicos digitales DS18B20.....	49
A.4. Anemómetros digitales Testo 410-2.....	50
A.4. Obergozo SF 0147 Ventilador de pie, 50 W, negro.	50
A.5. Arduino.....	51
A.6. Foco Philips BR125 IR 250W E27 230-250V	51
A.7. Ventilador Brushless DC Fan Wan.....	51
ANEXO B. Fichas de análisis de medidas en Muro Trombe	52
B.1 Configuración 1 bombilla a 7 cm.....	52
B.2 Configuración 1 bombilla a 15 cm.....	52
B.3 Configuración 1 bombilla a 30 cm.....	53
B.4 Configuración 1 bombilla a 45 cm.....	53
B.5 Configuración 1 bombilla a 60 cm.....	54
B.6 Configuración 2 bombillas a 7 cm.....	54
B.7 Configuración 2 bombillas a 15 cm	55
B.8 Configuración 2 bombillas a 30 cm	55
B.9 Configuración 2 bombillas a 45 cm	56
B.10 Configuración 2 bombillas a 60 cm	56
ANEXO C. Fichas de análisis de medidas en Muro EcoCooler	57
C.1 Configuración diseño único.....	57
C.1.1. Ventilador pequeño a 25 cm.	57
C.1.2. Ventilador pequeño a 45 cm	58
C.1.3. Ventilador grande a 90 cm:.....	60
C.2 Configuración diseño múltiple	61
C.2.1. Ventilador grande a 100 cm:.....	61
C.2.5. Ventilador grande a 50 cm:.....	63
ANEXO D. Conversión de lux a W/m².....	64
ANEXO E. Ajuste de curvas de datos con Matlab	65

1. Introducción

Desde hace décadas se argumenta que el nivel de vida actual no es sostenible. El crecimiento de la población va en aumento y se consume de un modo desmesurado e incontrolado los recursos naturales.

Existe preocupación por el agotamiento de los combustibles fósiles. Cuando se habla de crisis energética, con frecuencia se hacen cálculos sobre el potencial de las energías renovables, pero a menudo se pasa por alto que no todas las fuentes energéticas son intercambiables de forma directa y en algunos casos requieren no solo importantes cambios tecnológicos, sino costosas infraestructuras y cambios sociales.

Todo esto ligado al cambio climático, otro de nuestros desafíos. Viene marcado desde la producción de alimentos, el aumento del nivel del mar hasta cambios meteorológicos. De 1880 a 2012 la temperatura media mundial aumento 0,85 ° C. debido a la concentración actual y a las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que el final de este siglo la temperatura media mundial continúe creciendo por encima del nivel preindustrial [1].

Numerosos informes nos contextualizan en una situación en que se requiere cambios rápidos de gran alcance y sin precedentes en todos los aspectos de la sociedad, tal y como establece el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático [1] (IPCC) todo esto viene sujeto a una sociedad más sostenible.

Los sectores residenciales y de servicios comprenden buena parte de la demanda energética en las sociedades modernas. Por ello, hoy en día, se espera que los edificios logren un uso eficiente de la energía y sean respetuosos con el medio ambiente, utilizando energía renovable (parcial o completamente) en lugar de energía fósil para el **acondicionamiento higrotérmico**.

El estudio de dispositivos de aprovechamiento de energía renovable se enmarca en un esquema constituido por la **arquitectura bioclimática** y, dentro de ésta, se distingue la arquitectura pasiva, ecológica y eficiente.

La construcción bioclimática se realiza de modo que los materiales se adaptan al medio para conseguir el confort interior deseado. En países fríos se ha desarrollado sistemas de calefacción como el muro Trombe y existen estándares como el Passivhaus, GreenBuilding, etc. A finales de la década de 1980, se marcaron pautas para la definición de una vivienda Passivhaus que aseguraba el confort en invierno implementando nuevos conceptos como la ventilación de doble flujo con recuperación de calor. Con el tiempo, la definición de Passivhaus se completa para climas más cálidos como los del sur de Europa e incluso climas tropicales. En los países con climas cálidos, donde se busca el confort a través de la refrigeración, está menos estudiado ya que supone tener mayor conocimiento de la dinámica del aire, ventilación y su calentamiento/enfriamiento. Existen propuestas de sistemas de enfriamiento como son el EcoCooler, poco estudiado y que en este trabajo analizaremos.

Particularmente, el aprovechamiento directo de la energía solar es una estrategia para el desarrollo sostenible, cada vez está más fomentada por regulaciones internacionales. Las **técnicas solares pasivas** pueden llegar a reducir anualmente la demanda de energía en los edificios hasta un 25%. [2]Varios dispositivos arquitectónicos, como chimeneas solares, techos solares, muros Trombe, entre otros, se utilizan en construcción.

Este trabajo se centra en el estudio de sistemas pasivos de la arquitectura bioclimática que favorecen el acondicionamiento ambiental de edificios construidos en climas cálidos; en concreto, el muro Trombe y el muro EcoCooler.

En concreto, se aborda el análisis sobre el comportamiento de estas técnicas de acondicionamiento higrotérmico frente a ensayos, en las que se aprovecha la energía solar para conseguir un confort en el interior de una vivienda, en este caso el muro Trombe. Es un trabajo en el que se analiza cuantitativamente el resultado llevando a cabo con una serie de ensayos. Se investiga los resultados obtenidos y se realiza una breve introducción numérica al funcionamiento de estos sistemas impulsados cada vez con mayor interés para la sustitución de los sistemas de refrigeración y calefacción actuales.

- El **muro Trombe** es uno de los sistemas que más está avanzando dentro de los sistemas pasivos para abordar la problemática de la crisis ambiental y energética. En los últimos 15 años se han publicado artículos sobre el funcionamiento de éste [3]. Este sistema puede llegar a aportar un nivel de confort interior aportando ventajas por su eficiencia, diseño sencillo y reducidos costes de ejecución, siendo respetuoso con el medio ambiente. La utilización del muro Trombe puede llegar a reducir el consumo hasta un 30% [3].
- El **muro EcoCooler**: es otro sistema de climatización pasiva enfocado a enfriar espacios de una vivienda. Es sencillo de fabricar y su funcionamiento está basado en el efecto Joule-Thompson. Mediante el estrangulamiento del aire que pasa a través de la fachada, su objetivo es rebajar la temperatura del aire que pasa dentro de la habitación produciendo de este modo una sensación de confort por ventilación.

En concreto, a continuación, se hace una breve introducción de los temas tratados para cada capítulo.

- **Capítulo 1:** se hace una breve introducción al bienestar ambiental, que sirve para contextualizar el trabajo desarrollado. Se habla sobre las condiciones que deben dar lugar al confort higrotérmico apoyándose en los diagramas de Olgyay y Givoni, donde se explican las condiciones para el desarrollo de viviendas eficientes de cara al aprovechamiento ambiental.
- **Capítulo 2:** estrategias de climatización pasiva llevadas a cabo en climas cálidos y fríos. Se explica las condiciones que deben dar lugar al bienestar higrotérmico. Además, se hace una introducción a los casos en estudio, el muro Trombe y el muro EcoCooler.
- **Capítulo 3:** recopilación de datos. Analiza los sistemas utilizados para la adquisición de los datos para tipo de sistema de ventilación pasiva y las configuraciones que se ha ido realizando para cada caso en estudio.
- **Capítulo 4:** análisis de los resultados. Se muestra un ejemplo de un tipo de configuración que se ha realizado para los sistemas y analizado posteriormente. Incluye pruebas realizadas en el laboratorio como en el exterior, expuesto el sistema a condiciones ambientales exteriores.

Objetivo principal del trabajo:

- Determinar cuantitativamente la función de los sistemas de estudio llevados a cabo, analizando la evolución de la temperatura y viento con las distintas configuraciones dadas. Pudiendo llegar a una conclusión para cada tipo de ensayo realizado.

Objetivos secundarios transversales:

- Habilidad y manejo en la toma de datos para los ensayos realizados.
- Mejorar en la utilización de programas como Photoshop, Power Point, Word, Excel para modificar fotos, realizar tablas, gráficos, etc.
- Ampliar conocimientos en el mundo de la arquitectura bioclimática y sistemas de climatización pasiva, así como de los materiales utilizados para este tipo de construcciones.

2. El bienestar ambiental

2.1. Introducción

La sensación de bienestar o de incomfortabilidad que se aprecia en un espacio no es la consecuencia de estímulos aislados (higrotérmicos, acústicos, lumínicos y olfativos) sino de la combinación compleja de todos ellos y de su acción simultánea. El cerebro, que es finalmente el órgano que convierte los estímulos en sensaciones reconocibles, integra todas las sensaciones dando una respuesta resultante de la combinación más o menos detectable de cada una de ellas. Además, existen otras circunstancias que también influyen sobre nuestra percepción como es el estado de salud, el cansancio, así como otras consideraciones psicológicas o sociológicas.

De entre los estímulos ambientales, los vinculados a los higrotérmicos, lumínicos y acústicos son energéticos, de carácter sensible y deben tratarse en la definición de las condiciones de diseño interior de espacios habitables.

Arquitectónicamente, e independientemente de las relaciones que se produzcan entre ellos, será necesario determinar los parámetros que permitan conseguir la sensación plena de bienestar, y concretarlos en condiciones específicas de diseño:

- Condiciones de ambiente luminoso.
- Condiciones de ambiente acústico.
- Condiciones de ambiente higrotérmico.
- Condiciones vinculadas a la calidad del aire.

Este TFG se centra en el estudio de sistemas pasivos que permitan obtener las condiciones ambientales adecuadas en el interior de edificios, para lograr el bienestar higrotérmico. Por ello, vamos a ahondar algo más en dicho concepto.

2.2. Condiciones de ambiente higrotérmico

El hombre obtiene su energía de las calorías que le proporcionan los alimentos. Una vez consumidos se transforman en otras formas de energía o se acumulan en otros elementos más simples, como grasas o hidratos de carbono. Dado que somos animales de sangre caliente, este calor sirve para mantener la temperatura corporal interna próxima a los 37 °C. Al estar, en la mayoría de los casos, el cuerpo humano a mayor temperatura que su entorno, constantemente se estará produciendo una pérdida de calor hacia el entorno físico. El bienestar higrotérmico se establece cuando el cuerpo pierde calor a la velocidad adecuada; una mayor velocidad implica sensación de frío y una menor velocidad, sensación de calor. A esa velocidad se equilibran todos los intercambios energéticos que se originan en el hombre. El ritmo al que pierde calor el organismo se denomina velocidad o actividad del metabolismo.

Dada la complejidad de los parámetros que intervienen en el confort y el evidente margen que existe a la hora de su definición, ya que se trata de un hecho estadístico, las condiciones interiores de confort, en función de parámetros ambientales, se tratan con diagramas en los que se señalan zonas de bienestar de mayor a menor amplitud. De este modo, podemos llegar a deducir según en qué zona nos encontramos, las características de los parámetros necesarios para ese estado de confort en concreto.

Estos diagramas integran en un mismo gráfico dos o más variables, en relación a las cuales se establecen unas zonas de confort, definidas por unos límites de temperatura, de humedad, de viento o de radiación solar.

A continuación, vamos a estudiar con más detalle dos de los principales diagramas higrotérmicos basados en la idea de una arquitectura bioclimática, cuyo objetivo es la realización de edificaciones adaptadas a las condiciones climáticas del medio y que proporcionen al usuario ambientes agradables haciendo uso de la propia edificación y elementos constructivos con un mínimo consumo de energía, creando entre la materia y la energía del lugar una arquitectura más propia de cada región.

2.3. Diagramas de bienestar higrotérmico

2.3.1. Diagrama de bienestar de Olgay

Uno de los diagramas de bienestar más destacado es el realizado por los hermanos Olgay [4]. Está representado en un gráfico bidimensional cuyo eje horizontal es la humedad relativa, y eje vertical la temperatura de bulbo seco¹. En él se diferencian una zona de condiciones de bienestar higrotérmico, rodeada de otras zonas que requieren de ciertas acciones para alcanzar el confort (radiación, ventilación, humidificación, etc., según el caso) [5].

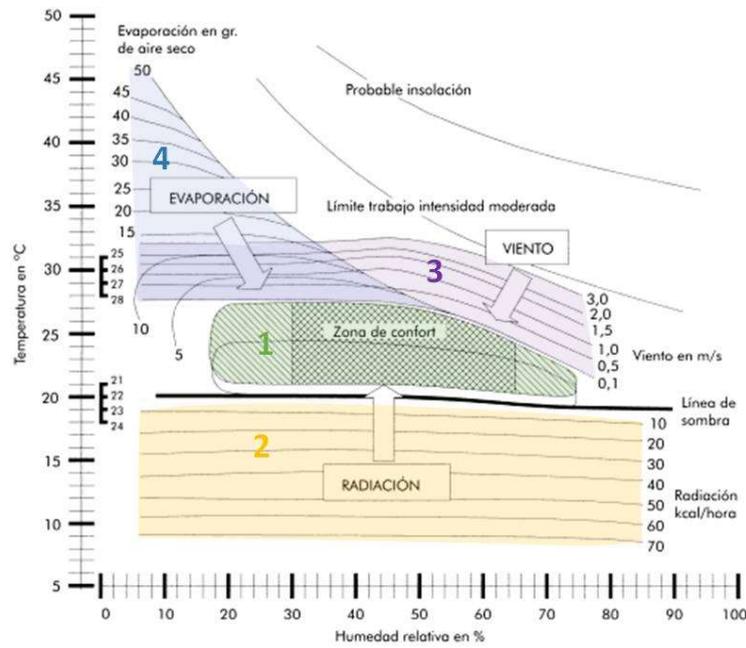


Figura 1. Diagrama de bienestar de Olgay.

- Zona 1: **zona de confort**, delimitada por dos humedades relativas, una próxima al 20% y la otra al 80%; y por dos temperaturas, una máxima y una mínima: para HR < 50 %, estas temperaturas se obtienen a partir de la suma y resta de 2,78 grados Celsius a la media máxima mensual de la zona bajo estudio; para HR > 50 %, estas temperaturas corresponden a dos líneas de temperatura efectiva constante.
- Zona 2: **zona que precisa radiación**. Si el punto se encuentra bajo la temperatura se alcanza la zona de confort aumentando la radiación según indique el diagrama. Es decir, si nuestro punto se encuentra con una humedad del 30% a una temperatura de 15° C, conseguiremos llegar al estado de bienestar si aumentamos la radiación solar para calentarse.
- Zona 3: **zona que precisa ventilación**. Si el punto se encuentra sobre la línea de temperatura máxima se puede llegar a la zona de confort aumentando la ventilación o la velocidad del aire.
- Zona 4: **zona que precisa humedad**. Si el punto se encuentra por encima de la línea de temperatura máxima y en la zona seca se puede alcanzar la zona de confort aumento la evaporación de agua hasta un límite fijado. Aumentar la evapotranspiración ayuda a soportar mejor los meses de calor, un aporte de vegetación juega un papel importante en estas situaciones.

Esta carta bioclimática puede variar según en qué punto geográfico se encuentre, explicando las distintas condiciones bioclimáticas necesarias para llegar a un confort.

El diagrama en cuestión está elaborado para un arropamiento que equivale a un clo, unidad de aislamiento térmico de un determinado indumento. Por cada clo que varíe se deberá de sumar o restar al valor medio mensual 7,3° C. Para entrar en más detalle en las aplicaciones de este diagrama se crean dos áreas, la de verano y la de invierno.

¹ La *temperatura de bulbo seco* es la que se obtiene con un termómetro convencional cuyo bulbo se encuentra seco. Se diferencia de la *temperatura de bulbo húmedo*, que se obtiene midiendo con el bulbo envuelto en un paño empapado. Son temperaturas se utilizan en la valoración del bienestar térmico.

2.3.3. Diagrama de bienestar de Givoni

Un segundo diagrama de bienestar es elaborado por B. Givoni, representado en base a un diagrama psicrométrico [6]. Introduce como variable el efecto de la propia edificación sobre el ambiente interno. El edificio se interpone entre las condiciones exteriores y las interiores, el objetivo principal es la de determinar unos materiales y estructura constructiva que dé respuesta a unas determinadas condiciones exteriores que permitan crear un ambiente comprendido dentro de la zona de bienestar térmico.

En él, se distinguen una serie de zonas características: zona de bienestar e, igualmente, rodeada por diferentes estrategias bioclimáticas que vienen enumeradas y que permiten alcanzar la zona de confort.

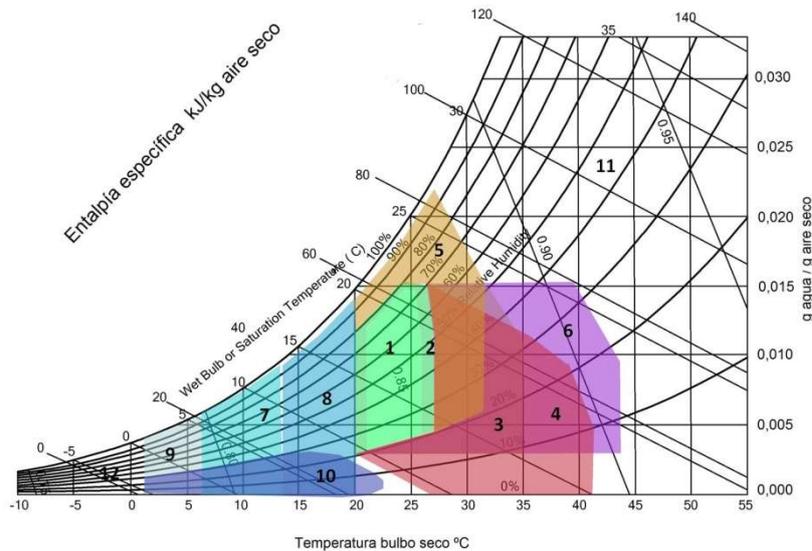


Figura 2. Diagrama de bienestar de Givoni.

- Zona 1: **zona de confort**, situada entre dos temperaturas límites de 21 y 26 °C, y humedades relativas límites entre 20 y 75 %. Además, se delimita por pequeñas líneas de humedad específica y temperatura efectiva constantes.
- Zona 2: **zona de confort ampliada**, que presenta un margen de bienestar aceptable limitada por temperaturas entre 20 y 27 °C, y humedades relativas entre 20 y 85 %.
- Zona 3: **zona** donde interviene la masa térmica. Viene delimitada por la humedad relativa específica constante.
- Zona 4: **zona controlada con enfriamiento evaporativo**.
- Zona 5: zona que puede controlarse **con enfriamiento natural** permanente.
- Zona 6: zona más caliente, que únicamente puede controlarse por la ventilación natural nocturna. Para que esto sea eficaz debe aplicarse simultáneamente con una gran inercia térmica.
- Zona 7: **zona ligeramente fría**, que puede controlarse con ganancia de calor por la presencia de un ocupante, equipo e iluminación.
- Zona 8: **zona un poco más fría** que la anterior, pero que se puede controlar todavía con sistemas solares pasivos combinando materiales con inercia térmica.
- Zona 9: **zona más fría**, dónde hay que servirse de los sistemas solares activos.
- Zona 10: **zona más seca**, donde hay que aplicar métodos de humidificación pero que no implica llegar a la zona de confort.
- Zona 11: **zona de mayor calor**, donde se pueden aplicar tanto sistemas pasivos como sistemas de refrigeración convencionales.
- Zona 12: **zona de condiciones climáticas más extremas**, en las que se hace uso de los sistemas de calefacción convencionales porque los sistemas bioclimáticos no son suficientes.

Como se ha indicado, este diagrama contempla tanto soluciones bioclimáticas como convencionales. Aun así, puede resultar útil para comparar las actuaciones que deben realizarse y establecer los límites que un tipo de soluciones pueden ofrecer.

2.4 Diagramas de isopletas o Climograma

Si se pretende ser más exacto a la hora de estimar las actuaciones se pueden dibujar las distintas horas del día de los meses en este diagrama y de este modo poder estimar un instrumento de diseño. El diagrama de isopletas es una forma de interpretar los diagramas de Olgyay y Givoni. Este diagrama se denomina climograma o diagrama de isopletas.

El diagrama de isopletas une puntos de mismas condiciones higrotérmicas para poder dar forma y sintetizar los principales aspectos que se observan en los diagramas de bienestar de Olgyay, aunque también puede aplicarse a partir del diagrama de Givoni. Es una forma de tener una visión conjunta de las acciones necesarias a aplicar para conseguir el bienestar higrotérmico en todos los meses, cada día y hora del año. Así, en el eje vertical se representan las horas del día y en el horizontal cada uno de los días del año.

Para su elaboración, se parte de uno de los diagramas de bienestar donde, para una zona geográfica concreta, se dibujan los puntos obtenidos por la medición de los parámetros climáticos necesarios según el diagrama (ver Figura 3, izquierda). En función de dónde se sitúan estos puntos, se establece un asigna un color en el climograma de la fecha y hora correspondiente (ver Figura 3, derecha).

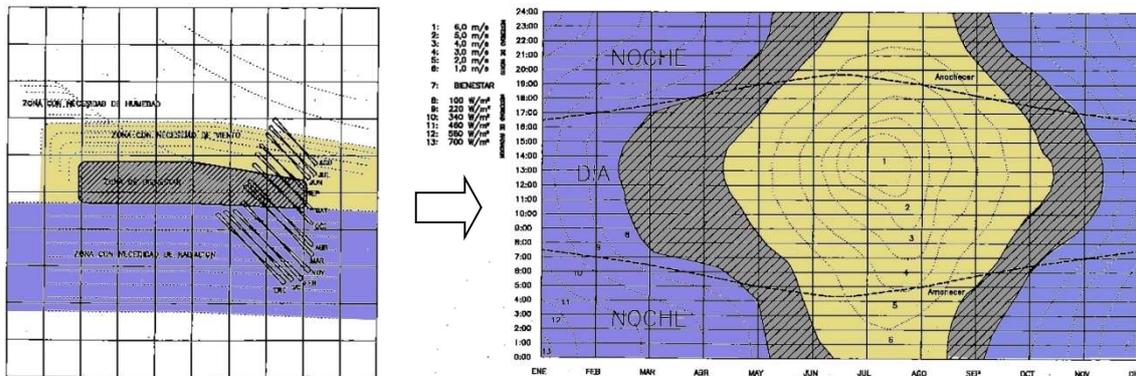


Figura 3. Izquierda, ejemplo de diagrama de Olgyay con los puntos climáticos de todos los días del año para una zona de clima mediterráneo. Derecha, climograma correspondiente.

El objetivo principal de este diagrama de isopletas es el de saber a qué hora y en qué mes se debe aplicar aportes de calor y cuando se necesita ventilación. Para el ejemplo anterior, por colores, se distinguen distintas zonas que corresponden a actuaciones a realizar para lograr el bienestar:

- Zona gris: zona de bienestar, con un 20 % de insatisfechos.
- Zona amarilla: necesidad de tener que aplicar ventilación, según el valor indicado en las distintas curvas de esta zona.
- Zona azul: zonas en las que hay que aportar radiación, bien mediante cargas internas por la presencia de personas, electrodomésticos, iluminación, etc., o bien métodos pasivos que aporten mayor cantidad de radiación.

Con ello, tal como se verá en la Figura 3. Izquierda, ejemplo de diagrama de Olgyay con los puntos climáticos de todos los días del año para una zona de clima mediterráneo. Derecha, climograma correspondiente., el climograma permitirá establecer el porcentaje de días al año que se puede utilizar un sistema de ventilación pasiva como los estudiados en este trabajo. Así, se puede realizar una estimación del ahorro producido con estos sistemas, respecto a otros sistemas de ventilación activos.

3. Sistemas de ventilación pasiva

3.1. Introducción

En la naturaleza no existen fuentes de refrigeración para enfriar como alternativa al Sol.

En cualquier parte del mundo y en cualquier época del año, siempre es posible generar calor gratuito aprovechando la radiación solar o, también, la combustión de biomasa. Sin embargo, en verano el entorno no nos aporta mecanismos de enfriamiento tan sencillos como la radiación solar (el hielo, aunque sí que ha sido utilizado por el Hombre como fuente de frío natural, no ha sido en el contexto de la climatización).

Además, en climas cálidos, aparece el fenómeno conocido como **sobrecalentamiento**: fenómeno de transformación, en un espacio cerrado, de la energía radiante de origen solar en energía térmica. Este fenómeno provoca que, durante el verano, los espacios cerrados puedan alcanzar en su interior temperaturas superiores a las del ambiente exterior, ya de por sí elevadas. Existen otros fenómenos, asociados a climas cálidos en condiciones de verano, que disminuyen la sensación de bienestar como la sobre humidificación, pero no serán tratadas en este trabajo.

Entonces, dado que es difícil encontrar una aportación de energía frigorífica, se opta a estrategias que consisten en la eliminación de exceso de calor interior o sobrecalentamiento. Estas estrategias bioclimáticas en condiciones de verano se pueden agrupar en:

- Actuaciones contra el sobrecalentamiento.
- Actuaciones contra la sensación de calor, sin enfriamiento.
- Actuaciones directas de enfriamiento.

A continuación, vamos a explicar las estrategias básicas de actuación contra el sobrecalentamiento en climas cálidos en condiciones de verano.



Figura 4. Arquitectura bioclimática.

3.2. Estrategias bioclimáticas en climas cálidos

3.2.1. Actuaciones contra el sobrecalentamiento

Todas estas actuaciones tienen un carácter arquitectónico, basadas en el diseño y configuración del edificio y sus elementos. Las podemos clasificar en:

- **Estrategias preventivas de reducción del sobrecalentamiento.** Su objetivo es reducir al máximo su efecto evitando la elevación de la temperatura interior. Básicamente, estas actuaciones se basan en proteger al edificio de la radiación solar. Algunos ejemplos son orientar y sombrear correctamente las ventanas, seleccionar vidrios adecuados, recubrimientos vegetales en techos, color claro de las paredes, etc.
- **Estrategias de eliminación del sobrecalentamiento (eliminación).** Su objetivo es sustituir el aire interior sobrecalentado por aire exterior menos caliente. Se realiza a través de la ventilación. Aunque la temperatura exterior sea elevada y por encima de la de bienestar, siempre será inferior a la del ambiente interior si éste se ha mantenido cerrado.

3.2.2. Actuaciones contra la sensación de calor, sin enfriamiento

La forma más natural que existe para corregir nuestra sensación térmica sin modificar la temperatura es adaptar nuestra vestimenta a las condiciones del verano, es decir, ponernos ropa muy ligera que deje mayor cantidad de superficie de piel expuesta al aire para que se pueda disipar bien el calor que genera nuestro cuerpo. No obstante, existen actuaciones que, aun no siendo tan directas, deben ser contempladas en un diseño bioclimático de un edificio:

- **Reducción de la humedad relativa.** Para esto nos servimos de la evapotranspiración. Hay distintos métodos como son pasar aire a través de materiales porosos o de materiales higroscópicos).
- **Incremento de la velocidad del aire.** Cada vez que elevamos la velocidad del aire en 0.2 m/s reducimos la sensación de calor en, aproximadamente, 1 °C. No obstante, hay un límite de incomodidad funcional para la velocidad del aire en 1.1 m/s para condiciones de verano pero que, en situaciones muy calurosas, se admiten, durante ciertos periodos, velocidades de hasta 2 m/s, y 3 m/s en espacios exteriores. Dado que el aire sobrecalentado tiende a estratificarse en la parte alta de una estancia, la ventilación debe realizarse de modo que el aire recorra la estancia en diagonal (bien de arriba abajo y viceversa).
- **Reducción de la radiación solar directa.** Mediante techos que eviten la radiación directa a la vivienda.
- **Incorporación de superficies frías.** Supone también métodos sofisticados (baldosas, cerámicas con agua en su interior, conducciones de agua empotrados en la pared, etc.)

3.2.3. Actuaciones directas de enfriamiento

Aunque son técnicas limitadas, aplicadas juntamente con las técnicas anteriores pueden dar resultados óptimos. Algunos ejemplos son:

- **Enfriamiento evaporativo:** producido por la proximidad de parques y jardines, o bien por la inducción de aire por masa o láminas de agua.
- **Enfriamiento radiante:** producido por elementos fríos como techos y paredes, el ambiente de los patios interiores, o cubiertas húmedas.
- **Enfriamiento conductivo:** producido por superficies frías próximas a la vivienda, mediante el arrastre de aire por conductos enterrados, o el efecto de las construcciones enterradas.
- **Enfriamiento convectivo:** como el producido por la ventilación nocturna.

3.3. La ventilación como estrategia combinada

Como se ha visto, la **ventilación** (corriente de aire que se establece al renovar o remover el aire de un lugar, es decir, ventilarlo [7]). Aparece como estrategia de múltiples aplicaciones en condiciones de verano, motivo por el que ha sido objeto de utilización y empleo a lo largo de todos los tiempos, y que en la actualidad se utiliza como la gran estrategia bioclimática en los edificios de alta eficiencia.

Así, las altas temperaturas han obligado a los habitantes a agudizar su ingenio para poder sobrellevar mejor el día a día en estas zonas. Esto dio paso al aprovechamiento de un recurso para poder mitigar el efecto del sofocante calor de ciertas regiones. Varios sistemas han sido utilizados tanto mecánicos como naturales como son el caso de las torres recolectoras de aire en Irán [8], fachadas ventiladas, etc.

En concreto, la ventilación cubre las necesidades provocadas en estos ambientes cálidos por su uso y ocupación, mediante dos posibles estrategias:

- **La sustitución del aire:** renovar el aire molesto del sobrecalentamiento o viciado. Generalmente se piensa que los únicos contaminantes interiores son el CO₂ generado por la respiración, los olores desagradables y el humo de cigarro, pero en realidad existen muchas fuentes generadoras de contaminantes en los espacios interiores. Además, se debe conocer la calidad del aire exterior que se pretende usar para la ventilación, ya que éste puede también estar contaminado.
- **El movimiento del aire:** recircular el aire sin necesidad de sustituirlo, permitiendo reducir la sensación de calor en un ambiente sobrecalentado favoreciendo la evapotranspiración. Con ello, mejoran las condiciones higrotérmicas de bienestar.

En ambos casos, se consigue disminuir la temperatura por el movimiento del aire y por lo tanto la sensación de sobrecalentamiento disminuye.

La ventilación más correcta es aquella que utiliza ambas técnicas, manteniendo el movimiento del aire bajo los límites de incomodidad funcional. Tal como se verá más abajo, un ejemplo de sistema bioclimático que emplea ambas estrategias es el muro Trombe. Por otro lado, recientemente han proliferado estudios de un sistema bioclimático que, en base al mecanismo de enfriamiento de Joule-Thomson, permite enfriar un flujo de aire de forma pasiva, denominado muro EcoCooler [9]. Ambos muros son objetivo de estudio en este trabajo.

La **ventilación natural** es aquella que se obtiene mediante técnicas naturales, sin necesidad de emplear ningún dispositivo mecánico. Para mover el aire de forma natural se emplean, solo o combinados, los mecanismos (únicamente) de:

- Diferencia de temperatura (o de densidad) del aire.
- Velocidad (o presión) del viento.

No obstante, la ventilación natural lleva habitualmente acarreados ciertos problemas, como:

- Descontrol, pues no se puede cuantificar el aire renovado.
- Ruido, ya que es necesario abrir el edificio al exterior.
- Introducción de polvo, polen y olores al no disponer generalmente de ningún dispositivo de filtración, cuya pérdida de carga no podría salvar la ventilación natural.
- Frío o calor excesivos cuando el edificio se encuentra situado en climas extremos.

3.4. Caso en estudio: el muro Trombe

3.4.1. Principio de funcionamiento

Uno de los sistemas pasivos que lleva estudiándose desde los últimos 15 años es el muro Trombe, que sirve tanto para calentar como para evitar el sobrecalentamiento. No obstante, mayoritariamente, este sistema se ha estudiado en lugares fríos, donde la elección de materiales con alta retención térmica facilita el almacenamiento de energía para su uso en calefacción.

Este sistema consta de tres elementos básicos: un cristal exterior, orientado a sur, que recibe la radiación solar; un muro interior que, en función de la utilización (calentar o ventilar) posee unas características térmicas u otras; y una cámara de aire intermedia por la que, al calentarse, que se produce el flujo ascendente de aire. Adicionalmente, se deben realizar unos orificios en la parte inferior y superior del cristal y del muro, en función del uso que vaya a tener el sistema. La Figura 5, muestra un esquema de las distintas alternativas de utilización del muro Trombe.

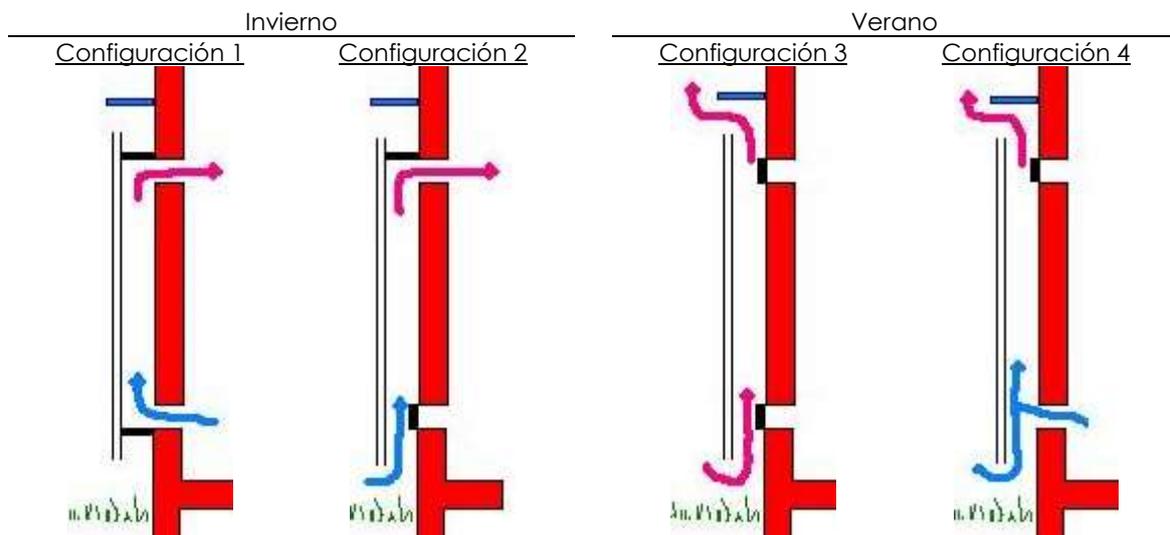


Figura 5. Distintas configuraciones del muro Trombe.

De estos esquemas diferenciamos los siguientes funcionamientos:

- **Configuración 1:** calefacción sin renovación de aire. Durante el día, orientado correctamente, aprovecha la radiación solar para calentar el propio aire de la vivienda y reintroducirlo más caliente. Durante la noche, funciona como un sistema indirecto ya que la radiación solar absorbida y acumulada por el muro en la cara exterior la transfiere a la cara interior por conducción, con un desfase de tiempo. Por ello, el muro está construido con materiales que le permiten absorber el calor como masa térmica, como el hormigón, la piedra o el adobe.
- **Configuración 2:** calefacción con renovación de aire. De forma similar a la configuración 1, se calienta el aire de la vivienda, pero introduciéndolo desde el exterior.
- **Configuración 3:** fachada ventilada. Durante el día, la radiación que incide en fachada produce el flujo del mismo aire exterior a su través, reduciendo ligeramente su temperatura. En este caso, el muro se construye con materiales que eviten el calentamiento excesivo y la acumulación de calor indeseadas, como los aislantes.
- **Configuración 4:** ventilación para evitar sobrecalentamiento. La disposición de los huecos permite que se origine una corriente de aire desde el interior de la vivienda, pasando por la cámara, fluyendo al exterior produciendo convección natural durante el día. Además, puede complementarse con la configuración 2, para que el aire frío de la noche fluya al interior.

En este trabajo estamos interesados en el estudio de sistemas que, en climas cálidos, ayuden a mantener una temperatura de confort dentro de la vivienda a través de la ventilación pasiva. Así, la configuración 4 del muro Trombe que, por otra parte, es la menos estudiada en la literatura, es uno de los sistemas a analizar.

3.4.2. Diseño desarrollado

Para el estudio experimental del muro Trombe se ha diseñado y construido el modelo de la



Figura 6 orientado a la obtención de los fenómenos que se desarrollan en el funcionamiento de un módulo didáctico de un muro Trombe. El módulo permite la medición y registro de la temperatura y el viento en distintos puntos de su interior y además de la temperatura ambiente en el exterior.

Está dividida en dos partes, la primera, que es el muro, realiza la función de fachada y por la que se realiza el proceso de ventilación. La segunda parte viene acoplada al muro y es la parte trasera donde se realiza el intercambio de viento.



Figura 6. Aspecto final del muro Trombe construido.

El sistema diseñado presenta dos partes principales:

- **Caja:** cuatro paneles sándwich de 4 cm de espesor formando un cajón de 97,5 X 60 X 83,3 cm de espesor. Sirve para emular el comportamiento de un habitáculo o "vivienda". Es un material industrial para realizar cerramientos en la construcción, se utiliza como aislante térmico, acústico e impermeabilizante [10].
- **Muro:** sistema termodinámico bajo estudio compuesto de las siguientes partes:

- **Marco** de madera DM de 4 cm de espesor con las mismas dimensiones que la caja, con una acanaladura de 5 mm en su parte interior para la disposición del cristal.
- **Panel trasero** de poliestireno extruido de 4 cm de espesor del mismo ancho que el espacio interior del marco, pero de alto 10 cm menor, dejando una apertura en la parte inferior. Es una espuma rígida resultante de la extrusión del poliestireno en presencia de un gas espumante, usada principalmente como aislante térmico [10].
- **Cristal frontal** de 51 cm x 76 cm de 5 mm de espesor ocupando el área del marco salvo una franja superior de 10 cm de alto. Está incrustado en el marco por su acanaladura y sellado con silicona para una correcta sujeción.
- **Cámara de aire** entre el panel trasero y el cristal frontal de 10 cm de espesor, en la que se produce la convección en los experimentos.

Todos los materiales utilizados son de baja inercia térmica, tales como el panel sándwich, el poliuretano y la madera para evitar efectos térmicos desfasados en el tiempo.

A continuación, se muestra la construcción del muro Trombe paso a paso, indicando aspectos importantes en su desarrollo:

1°. **Construcción del marco:** se partió de un listón de DM de 94,5 x 56 x 15,5 cm de espesor, en cuyo lado más ancho se practicó una acanaladura de 0,5 cm a 1 cm del borde. Posteriormente, se cortó el listón en para obtener los cuatro lados del marco. Para evitar descuadres y movimientos, los lados se unieron entre ellos con 2 tornillos de 8 cm.



Figura 7. Pasos de construcción del muro Trombe (1).

2°. **Colocación del cristal delantero:** una vez montado el marco, se dejó un lado libre para la colocación del cristal. Para una correcta sujeción, así como para evitar pérdidas de calor y aire indeseadas, se selló la acanaladura mediante silicona.

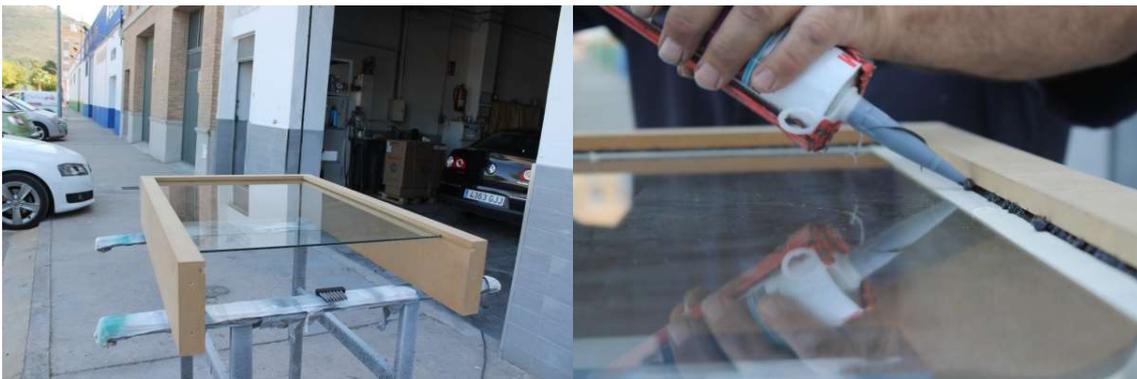


Figura 8. Pasos de construcción del muro Trombe (2).

3°. **Colocación del panel trasero:** una vez seca la silicona, se procedió a colocar el panel de poliestireno por la parte posterior del muro igualmente sujeto con silicona.



Figura 9. Pasos de construcción del muro Trombe (3).

4°. **Construcción de la caja:** en un panel sándwich de 97,5 x 60 x 4 cm de espesor se marcaron y cortaron las cotas de las cuatro superficies que conforman la caja. Posteriormente, se unieron mediante escuadras metálicas remachadas a los paneles. Es muy importante que toda la caja esté totalmente sellada para evitar que condiciones externas intervengan en las medidas. Los primeros ensayos se realizan in situ, en el mismo laboratorio donde se intenta dar las condiciones óptimas para el ensayo, más adelante, las siguientes medidas se realizan en el exterior para simular de este modo las condiciones climáticas exteriores.



Figura 10. Pasos de construcción del muro Trombe (4).

5°. **Caja de panel sandwich y muro Trombe:** constan como dos partes realizadas por separado, pero con el objetivo de unir las para los siguientes ensayos. Ambas partes deben cuadrar perfectamente para evitar escapes o posibles entradas de condiciones exteriores que puedan afectar al resultado final.



Figura 11. Pasos de construcción del muro Trombe (5).

3.5. Caso en estudio: el muro EcoCooler

3.5.1. Principio de funcionamiento

El acondicionamiento energético de las viviendas trata de alcanzar en su interior el confort térmico al que está acostumbrado el ser humano. Este confort depende de variables físicas tales como la temperatura, la humedad relativa, el movimiento y la calidad del aire interior y las preferencias de los ocupantes en las viviendas. Y sin hacer más hincapié sobre este tema, haremos referencia a un sistema que se basa en la refrigeración de la vivienda.

Este trabajo, además del muro Trombe, también se centra en un climatizador ecológico y sin electricidad. Es un sistema sencillo que se ha desarrollado en países donde se alcanzan elevadas temperaturas y que consiste en botellas sobre un tablero. La base de la botella queda expuesta al exterior de la vivienda y recoge el aire que será expulsado al interior de la casa.

El efecto que produce este funcionamiento podría explicarse por el efecto Joule-Thompson que dice entre cosas que cuando el aire se expande, se enfría. Primero, se comprime el aire al hacerlo pasar por el extremo estrecho de la botella y posteriormente se introduce a la vivienda que es cuando se produce una disminución de la temperatura al producirse la expansión.

La teoría de Joule-Thompson se explica por la relación que hay entre la temperatura y la velocidad de las moléculas. Cuando un gas se expande sus moléculas deben vencer las fuerzas de atracción entre ellas; la energía necesaria para esto proviene de la energía cinética de las moléculas lo que se traduce en una disminución de la velocidad. La consecuencia general de esto es que un gas real se enfría cuando se expande. De este modo funciona el sistema EcoCooler, el aire introducido en el interior de la botella se comprime aumentando la velocidad del viento, que posteriormente experimenta una disminución de la velocidad al expandirse y en consecuencia el enfriamiento.

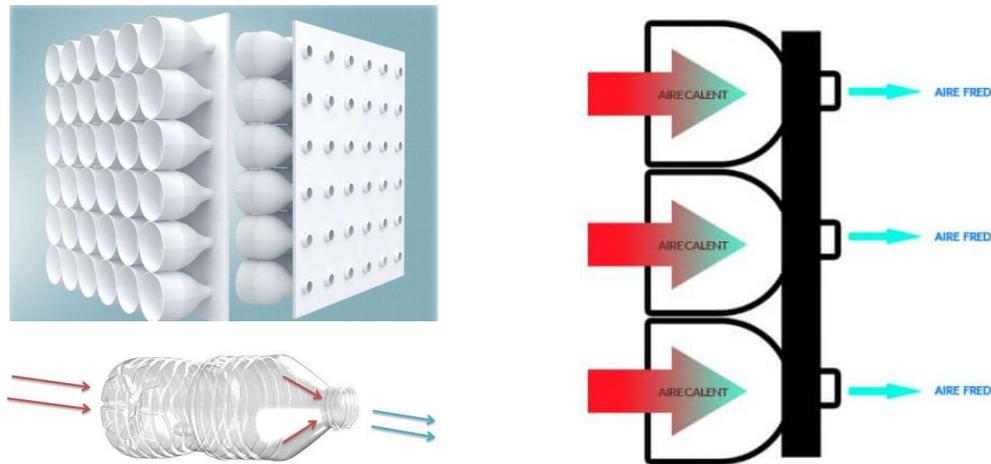


Figura 12. Sistema EcoCooler y efecto producido por la compresión del aire.

La elección de este tipo de climatizador pasivo viene motivada por su circulación en internet y del que se habla su gran efectividad. Aquí hemos querido comprobar dicha funcionalidad poniendo el sistema en práctica.

3.5.2. Diseño desarrollado

Para el estudio experimental del muro EcoCooler se ha diseñado y construido el modelo de la Figura 11. Un panel con una serie de orificios donde se han ido colocando botellas cortadas por la mitad. Por un lado, del tablero tenemos una parte llana que dará dentro de la vivienda y por el otro lado queda la parte donde están ubicadas las botellas que recogen el viento del exterior. El tipo de fachada con este sistema debe estar siempre encarado al sentido donde mayor aire se produzca. A continuación, vienen los detalles y medidas.

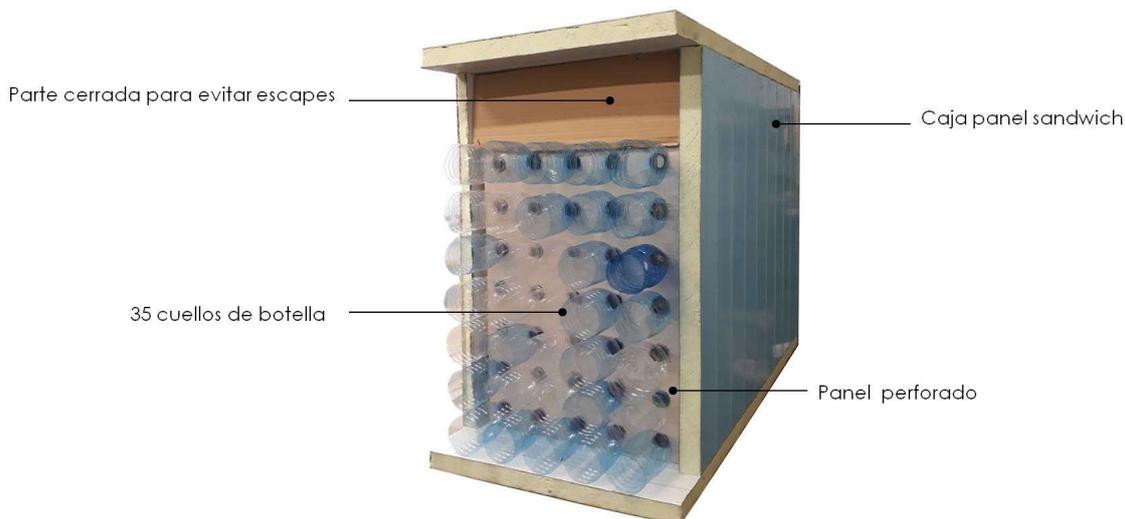


Figura 13. Aspecto final del muro EcoCooler construido (diseño múltiple).

Para las medidas experimentales, se realizaron dos diseños, con uno y diversos orificios para el paso del aire:

- **Diseño único:** para las pruebas iniciales, se utilizó un panel de madera con un único orificio y un cuello de botella incrustado.
- **Diseño múltiple:** una vez testeado el diseño único, para un mayor efecto del fenómeno bajo estudio, se decidió estudiar un panel con distintos orificios y cuellos de botella en cada uno de ellos. Se llegaron a realizar pruebas con distintos sistemas de ventilación que más adelante se entrará en más detalle.

Ambos diseños presentan los siguientes componentes:

- **Panel:** se trata de una lámina de madera de 2 cm de espesor, una con un único orificio y otra con 35 agujeros, todos ellos de 2,5/3 (aprox.) cm de diámetro.
- **Cuellos de botella:** se trata de cortes de botella de plástico reutilizadas de, aproximadamente, 8,5 cm de diámetro.
- **Tubo de flujo entrante:** tubo de PVC de 11 cm de diámetro y 0,3 mm de espesor, que se ajusta al cuello de botella para conseguir un flujo laminar incidente en las mediciones.
- **Tubo de flujo saliente:** tubo de PVC de 31,5 cm de diámetro y 1,8 mm de espesor, situada en la parte posterior del muro para evitar la influencia de flujos de aire proveniente de otras direcciones que no sean del cuello de botella.

A continuación, se muestra la construcción del muro EcoCooler paso a paso, indicando aspectos importantes en su desarrollo:

1°. **Construcción del diseño único:** una vez realizado el orificio en el panel, se colocó un cuello de botella rodeado de una cinta de 1 cm de material esponjoso para la correcta colocación. Posteriormente, se pegaron ambos cilindros, entrante y saliente, y se ajustaron con escuadras metálicas atornilladas.

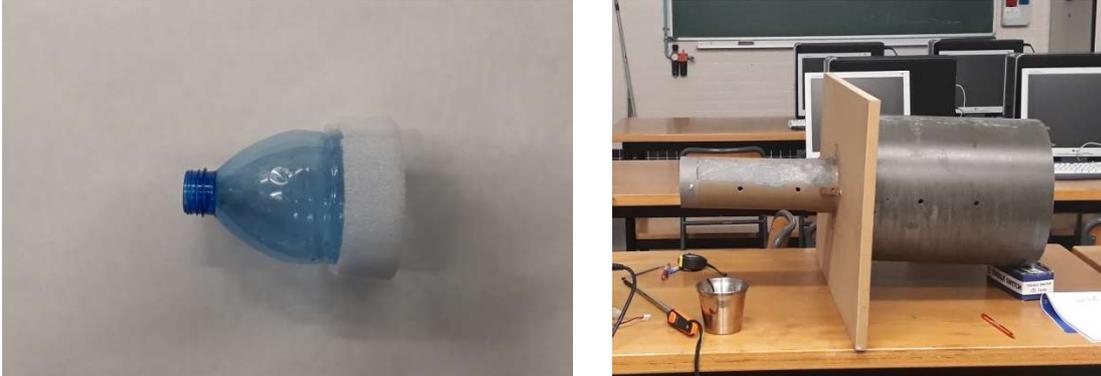


Figura 14. Pasos de construcción del muro EcoCooler (1).

2°. **Construcción del diseño múltiple:** se inició realizando 35 orificios a un tablón de 2 cm de espesor distanciados 10 cm entre ellos, para asegurar el máximo aprovechamiento en la disposición de los cuellos de botella. Una vez dispuestas cada una de las botellas, se pegaron con cola.



Figura 15. Pasos de construcción del muro EcoCooler (2).

3°. **Acoplamiento** del diseño múltiple en la caja de panel sándwich construida anteriormente.



Figura 16. Pasos de construcción del muro EcoCooler (3).

4. Recopilación de datos

4.1. Medidas de parámetros climáticos

Los parámetros climáticos de la zona bajo estudio fueron obtenidos de la web <http://www.meteomurcia.com/>. Este portal dispone de un histórico de datos que pueden descargar en formato de texto tabulado, tal como muestra la siguiente imagen:

Tabla de datos para Abril 25, 2019									
Hora	Temperatura	Punto de rocío	Presión	Viento	Velocidad viento	Racha viento	Humedad	Intensidad lluvia(por hora)	Hubes
00:00	15.2 °C	10.6 °C	1010.0 hPa	ESE	8.0 km/h	9.7 km/h	74%	0.0 mm	CLR
00:05	15.2 °C	10.6 °C	1010.0 hPa	NW	6.9 km/h	3.7 km/h	74%	0.0 mm	CLR
00:10	15.2 °C	10.8 °C	1010.0 hPa	NW	3.2 km/h	5.6 km/h	75%	0.0 mm	CLR
00:15	15.1 °C	10.7 °C	1010.0 hPa	NW	3.2 km/h	13.0 km/h	75%	0.0 mm	CLR
00:20	15.0 °C	10.8 °C	1010.1 hPa	NW	6.9 km/h	9.3 km/h	76%	0.0 mm	CLR
00:25	14.9 °C	10.9 °C	1010.1 hPa	NW	6.9 km/h	7.4 km/h	77%	0.0 mm	CLR
00:30	14.9 °C	10.9 °C	1010.1 hPa	NW	3.9 km/h	3.7 km/h	77%	0.0 mm	CLR
00:35	14.9 °C	10.9 °C	1010.3 hPa	NW	3.9 km/h	5.6 km/h	77%	0.0 mm	CLR
00:40	14.8 °C	11.0 °C	1010.3 hPa	NE	3.2 km/h	5.6 km/h	78%	0.0 mm	CLR
00:45	14.8 °C	11.0 °C	1010.3 hPa	NE	3.2 km/h	4.7 km/h	78%	0.0 mm	CLR

Figura 17. Ejemplo de listado de datos meteorológicos posibles.

De entre toda la información climática disponible, se ha extraído la temperatura y la humedad relativa, que son las necesarias para la elaboración de los diagramas de bienestar en la región estudiada. En concreto, son necesarias la temperatura y humedad relativa. Las siguientes figuras muestran el histórico descargado de ambos parámetros climáticos:

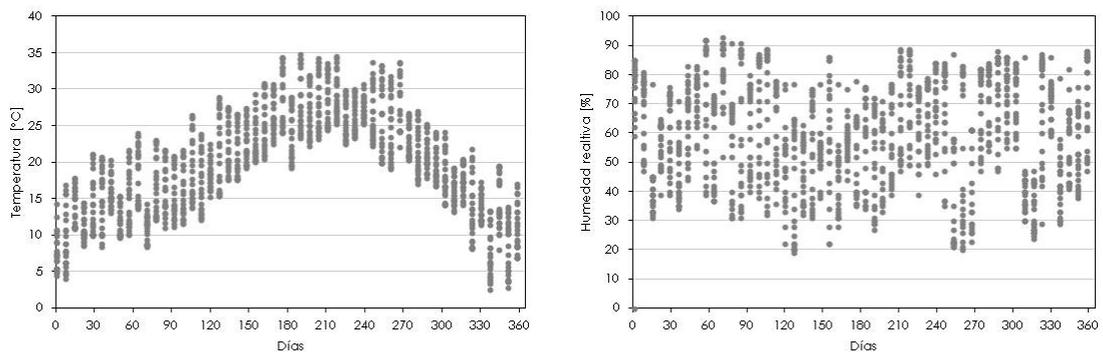


Figura 18. Temperatura y humedad relativa de la zona bajo estudio.

Adicionalmente de la página web de www.gemet.com se ha obtenido la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal y sobre una superficie vertical orientada a sur. Estos valores nos servirán para contrastarlos con los obtenidos en el laboratorio mediante bombillas.

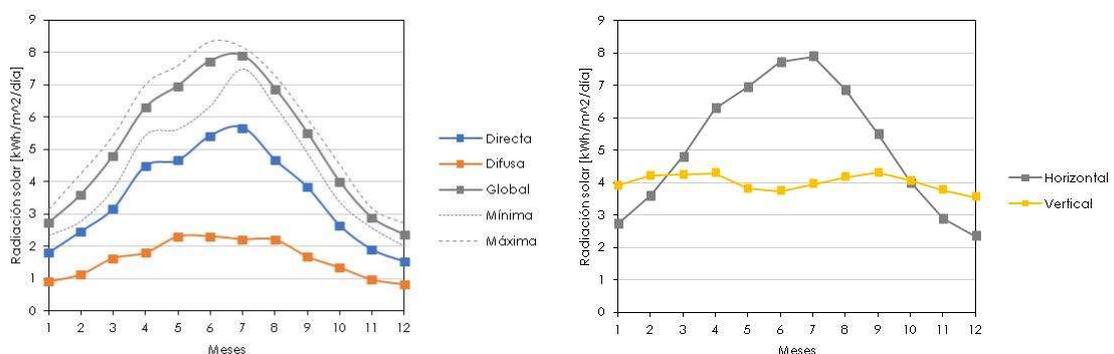


Figura 19. Izquierda, radiaciones incidentes sobre la superficie horizontal. Derecha, comparación de la radiación solar global en superficie horizontal y vertical.

4.2. Medidas de muro Trombe

4.2.1. Sistemas para la adquisición de datos

Los sistemas de medición utilizados se fueron mejorando conforme el número de ensayos. Para los primeros ensayos se utilizaron sensores de temperatura que indican el comportamiento del sistema. Más adelante, se utilizaron sensores y anemómetros con mayor precisión.

1º) Se obtuvieron los datos mediante dos instrumentos manuales: la temperatura con termómetros digitales Testo Sensor 110, y la velocidad del aire con anemómetros de Molinete testo 410. Con ello, se obtuvo una idea general del comportamiento del muro, pero, dado que el registro de datos era rudimentario, se decidió utilizar una configuración más automatizada.



Figura 20. Configuración inicial o de test para el control de las medidas con el muro Trombe.

2º) Se utilizó un sistema de adquisición basado en Arduino, y desarrollado en el TFG titulado *Diseño e implementación de un sistema automático de medida para el análisis termodinámico de edificios* [11], que integraba todas las medidas de 7 puntos del muro, y la velocidad del aire se registró con un anemómetro testo 405i Smart Probe de mejor precisión. Con ello, en todos los experimentos, se pudieron registrar todos los datos en intervalos de tiempo de 2 segundos para un correcto análisis posterior.



Figura 21. Configuración final para el control de las medidas con el muro Trombe.

En el Anexo A se muestran las fichas técnicas de los instrumentos utilizados en este TFG.

4.2.1. Configuración de medidas en laboratorio

Para testear el muro Trombe en condiciones controladas de insolación, se construyó un dispositivo con el que controlar una radiación artificial incidente. Tal dispositivo se muestra en la Figura 22 y consiste en una caja de las mismas dimensiones que el muro, forrada internamente con material reflectante (papel de aluminio) y con dos focos Incandescente de 230-250 V BR125 Philips. Con ello, variando la distancia del dispositivo al muro Trombe así como conectando una o los dos focos, se controlaba la radiación incidente.



Figura 22. Dispositivo para control de insolación de muro Trombe en condiciones de laboratorio.

Para cuantificar la insolación que está recibiendo el muro en cada disposición experimental, se realizaron una serie de medidas auxiliares. Estos experimentos consistieron dividir el muro en tres partes iguales y colocar una serie de fotorresistencias, controlados con el mismo Arduino, en un panel aislante e ir midiendo durante unos segundos cada parte del muro.



Figura 23. Dispositivo para la calibración del dispositivo de insolación.

Con este dispositivo de calibración, se obtuvieron las gráficas de irradiación sobre el muro Trombe que se verán en la Sección 5 y en los Anexos.

4.2.3. Configuración de medidas in situ

El objetivo de la medición en el exterior era validar el comportamiento del muro Trombe obtenido en laboratorio, es decir, conseguir una corriente de ventilación dentro de la caja y que sea expulsada al exterior a través de la cámara, mediante la radiación solar que incide directamente al muro. Así, una vez testeado con distintas insolaciones controladas de laboratorio, se decidió estudiar el comportamiento del sistema en condiciones reales de insolación solar. Para ello, se ubicó el dispositivo en el exterior del edificio D de la EPSG, de modo que incidiera la mayor radiación posible. Se monitorizó tanto la radiación solar mediante los fotorresistores como las temperaturas exteriores e interiores del muro, así como el flujo de aire resultante. La Figura 24 muestra el sistema de muro Trombe ubicado en la terraza de la EPSG y su orientación.



Figura 24. A la izquierda, ubicación del muro Trombe en el edificio D de la EPSG donde se realizaron los ensayos de EcoCooler en el exterior. A la derecha, imagen de su orientación a

Los datos se recogieron en distintos puntos del sistema. En primer lugar, se midió en distintas alturas de la cámara de aire del propio muro Trombe, donde se observó que al medir en la apertura superior había influencia de los flujos de aire externos. En segundo lugar, se midió en el interior de la caja de panel sándwich. Las medidas se realizaron con la parte trasera abierta y cerrada, para comprobar la diferencia en el comportamiento del sistema.



Figura 25. Posición de los puntos de medida del muro Trombe.

Cabe destacar que los días en los que se estuvo midiendo en el exterior, siempre existía cierta influencia de viento del exterior, por lo que en ocasiones algunos valores se pueden ver afectados por tales circunstancias. Con todo, los resultados mostraron un comportamiento similar al esperado en laboratorio, por lo que se dieron por válidas.

4.3. Medidas de muro EcoCooler

4.3.1. Configuración de la adquisición de datos

Al igual que en el caso del muro Trombe, las técnicas de toma de datos han evolucionado desde un montaje inicial para el comportamiento cualitativo del muro hasta un montaje más automatizado que permite cuantificar de forma más precisa dicho comportamiento.

1º) Los primeros ensayos se realizaron con termómetros digitales manuales con resultados poco concluyentes. Por ello, posteriormente, se decidió implementar una configuración más precisa y controlada de medición.



Figura 26. Configuración inicial o de test para el estudio del muro EcoCooler.

2º) Se utilizó el mismo sistema de adquisición basado en Arduino empleado en el muro Trombe, y el anemómetro de mayor precisión. Este sistema se empleó tanto para el diseño único como para el diseño múltiple del muro EcoCooler.



Figura 27. Sistemas de medición final para el estudio del muro EcoCooler.

En el diseño único, se dispusieron varios puntos de medida a lo largo del sistema, introduciendo el anemómetro en los mismos. En el diseño múltiple, los sistemas de medición fueron colocados en los puntos más representativos. En el exterior, se colocaron en el centro de cada uno de los cuellos de botella. En el interior, se colocaron en distintos puntos desde la salida de aire de las botellas, hasta el extremo exterior de la caja.

4.3.2. Configuraciones de medida con diseño único

El flujo incidente en el diseño único del muro Trombe se realizó con dos ventiladores distintos:

1º) Ventilador pequeño. Para testear el muro EcoCooler en condiciones controladas de incidencia de viento, se empleó un ventilador de los típicamente utilizados para la refrigeración de dispositivos electrónicos, cuyas dimensiones eran similares a las del tubo de flujo incidente. El ventilador se conectó a una fuente de alimentación que permitía controlar el voltaje suministrado y, con ello, la velocidad del flujo de aire incidente. Tal como se muestra en la Figura 28 izquierda, el ventilador se ubicó en el extremo del tubo de flujo entrante.

2º) Ventilador grande. La Figura 28 derecha muestran el mismo sistema, pero con un ventilador más grande que opera a distintas potencias, aunque en los ensayos se utilizó siempre el mismo (potencia media) pero variando la distancia del ventilador al sistema.

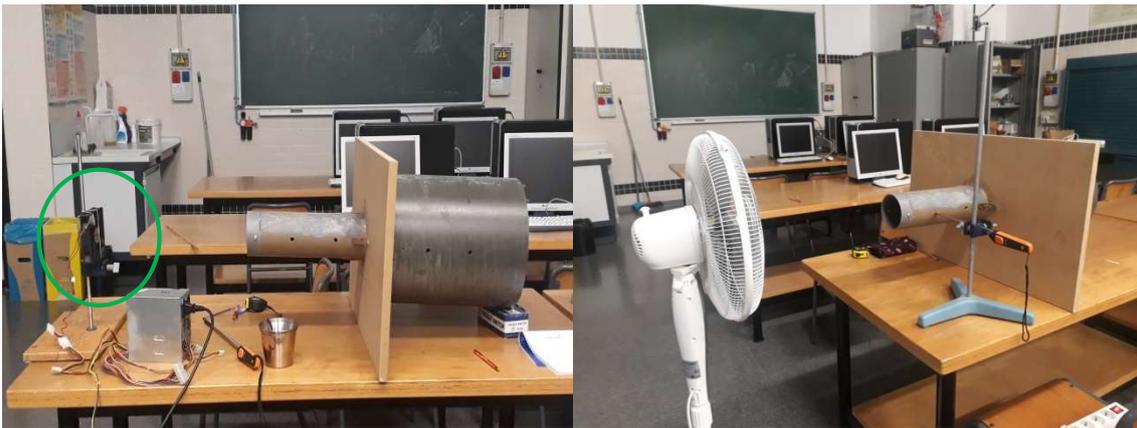


Figura 28. Sistema para el control del flujo de aire incidente en el muro EcoCooler en diseño único. A la izquierda, ventilador pequeño. A la derecha, ventilador grande.

4.3.3. Medidas con diseño múltiple

El siguiente ensayo de diseño múltiple se realizó con la tabla de botellas acoplada a la caja de muro Trombe. Una vez colocado se procuró tener todos los huecos bien tapados. Con todo bien posicionado, se colocó el ventilador de pie a media altura, de manera que el aire incidente llegara lo más centrada posible. Se fue midiendo el flujo de aire incidente colocando el anemómetro durante unos segundos delante de cada una de las botellas, y anotando el dato de temperatura y el viento. A pesar de que el ventilador estaba a media altura para poder incidir de la forma más homogénea en todo el tablero, en cada uno de los orificios se daba un tipo de velocidad diferente. Además, la temperatura podría presentar ligeras variaciones debido a la presencia de la persona que sujetaba el anemómetro. A pesar de estas variaciones, tal como se verá más adelante, los resultados obtenidos son bastante coherentes.



Figura 29. Control de flujo de aire en diseño múltiple del muro EcoCooler.

5. Análisis de resultados

5.1. Análisis de parámetros climáticos

En el siguiente apartado se hace un análisis de los datos mensuales recogidos en la Sección 3, que se han sobrepuesto en las gráficas de Olgay y Givoni.

5.1.1. Diagrama higrométrico de Olgay

Los datos climáticos mensuales clasificados por colores en la Figura 35, se han sobrepuesto en el diagrama de Olgay, pudiendo así relacionar cada mes con su correspondiente actuación bioclimática y alcanzar la zona de confort.

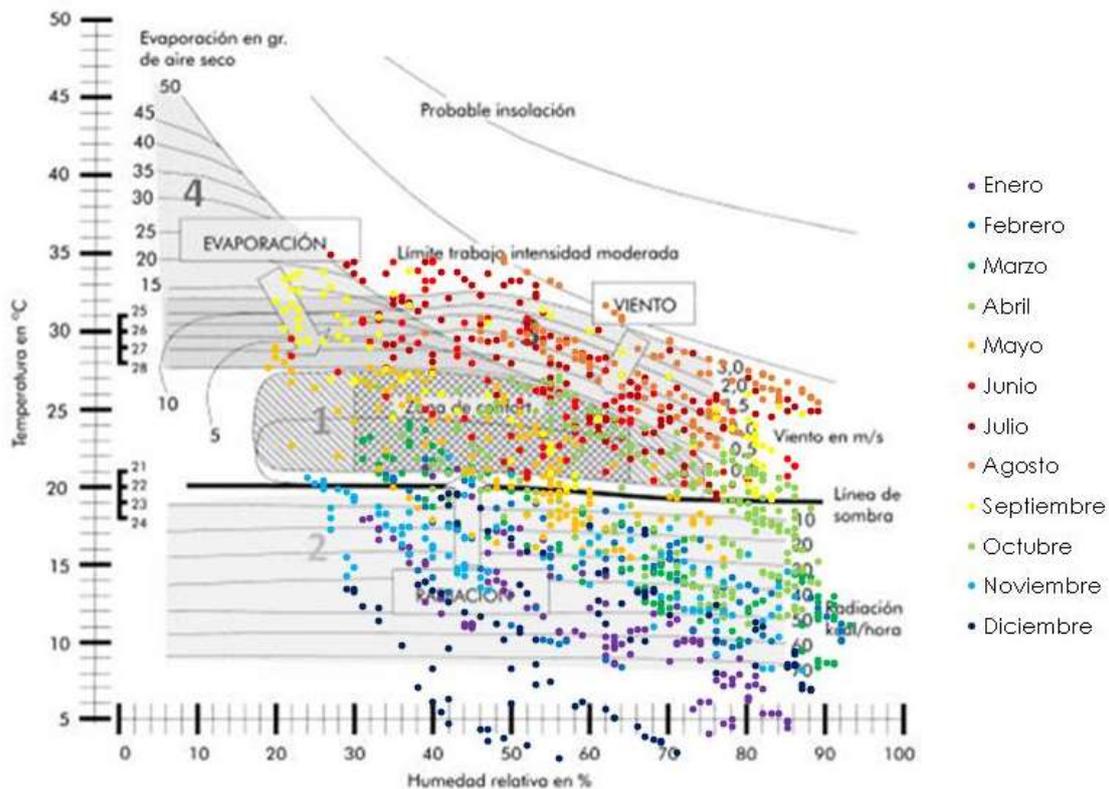


Figura 30. Distribución de los datos mensuales en la gráfica de Olgay.

A la Figura 30 se le han añadido agrupaciones de colores que pertenecen a los datos correspondientes al clima de Murcia. En la región de Murcia predomina el clima mediterráneo. No obstante, la costa y hacia el sur se da el clima tropical, siendo una de las regiones de España más secas. Se trata de un clima seco, menos de 300 mm y caluroso. Las precipitaciones son muy irregulares. La amplitud térmica diaria es moderada, pero la anual es muy pequeña.

Las agrupaciones se distinguen desde los más caluroso a los más fríos. Colores más intensos representan los meses de mayor temperatura y se ubican en mayor concentración en la zona 5 que requiere la incorporación de viento (colores más intensos, rojo y naranja). Los meses más frescos de colores más cálidos, se distribuyen en la zona 2 que precisa de radiación. Algunos datos correspondientes al mes de septiembre, junio y julio se encuentran en la zona 4, zona que precisa de humedad. Además, ningún punto prácticamente se encuentra en la zona de posible insolación. Estas zonas, tal vez, correspondan a países con temperatura más extremas.

5.1.2. Diagrama higrométrico de Givoni

El diagrama de Givoni está constituido por humedad relativa en el eje vertical y temperatura en el eje horizontal. Igualmente, como en el gráfico anterior se han colocado las medias mensuales de temperatura de todo un año sobre la gráfica.

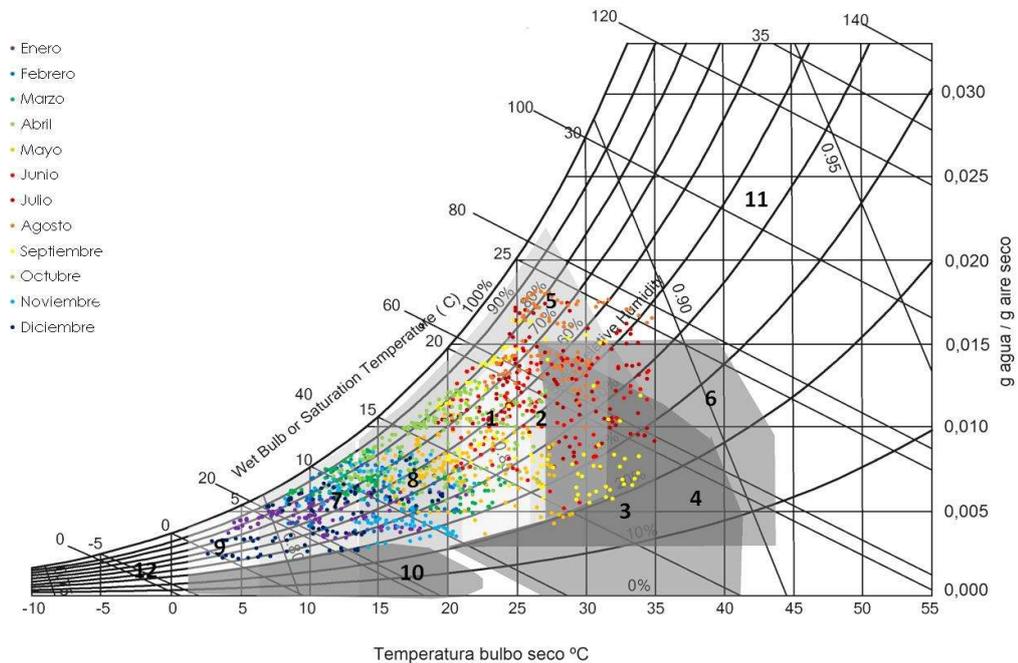


Figura 31. Distribución de los datos mensuales en la gráfica de Givoni.

Al igual que en la gráfica anterior, aquí de nuevo se han vuelto a reubicar los meses en las distintas zonas de la gráfica, esta vez, de Givoni. De nuevo observamos que predominan los colores más intensos (rojo, amarillo, naranja) debido a la zona a la que corresponden los datos (Murcia).

Los meses de junio y julio se distribuyen en mayor concentración en la zona 5 y 6. Si analizamos qué tipo de actuación corresponde a cada zona, nos encontramos en que se puede controlar con enfriamiento natural permanente (zona 5) y donde se puede controlar con ventilación natural nocturna (zona 6), pudiendo aplicar simultáneamente distintas actuaciones. Además, aunque en menor medida, se encuentran datos distribuidos en la zona 9 y 7, zonas más frías donde es necesario servirse de actuaciones solares o simplemente se puede controlar por la presencia de un cuerpo, equipo o iluminación. La zona 11 es una zona de mayor calor, donde se pueden aplicar tanto sistemas pasivos como sistemas de refrigeración convencionales. La zona 10, zona más seca, donde hay que aplicar métodos de humidificación pero que no implica llegar a la zona de confort. En ambas zonas pocos son los datos distribuidos ya que se tratan algo más extremas.

5.2. Análisis de muro Trombe

5.2.1. Medidas en laboratorio.

- **Radiación incidente:**

El siguiente caso es un ejemplo de una toma de datos a 30 cm de distancia con una bombilla. Como se ha comentado, los datos se registraron en 9 puntos de la superficie frontal del Muro Trombe.



Figura 32. Iluminancia y radiación solar equivalente sobre el Muro Trombe realizados a 30 cm de distancia con incidencia de una bombilla.

Se observa que la radiación no es homogénea sobre la superficie del muro, lo cual es de esperar dado que proviene de un punto (la bombilla). Por ello, para cada configuración medida, se tomó un promedio de los 9 valores de iluminación y radiación registrados.

Con esta configuración experimental, se realizaron las medidas del funcionamiento del muro Trombe que se indican en la Tabla 1. Todas ellas fueron realizadas desde las condiciones ambientales, sin iluminación con temperatura ambiente, hasta alcanzar el equilibrio térmico del muro, y la posterior vuelta a las condiciones iniciales.

Nº de focos	Distancia insolación [cm]	Iluminancia media [Lux]	Radiación media [W/m ²]	Radiación máx. [W/m ²]	Tiempo medida [min]	Configuración abierta	Configuración cerrada
1	7	2123	149	704	55		
	15	2119	148	716	60		
	30	1119	78	200	90		
	45	958	67	111	140		
	60	857	60	119	50		
2	7	4544	318	-	-		
	15	3907	274	1178	95		
	30	2618	183	435	120		
	45	2091	146	119	80		
	60	1707	119	-	-		

Tabla 1. Mediciones realizadas con el muro Trombe en condiciones de laboratorio.

La Tabla 1 representa todos los datos recogidos en cada configuración. Además, de un pequeño esquema del funcionamiento del sistema. Los tiempos de medida varían, ya que en algunos ensayos la temperatura se estabilizaba antes y otras más tarde. A mayor proximidad, mayor es el dato de iluminancia y radiación. Los ensayos realizados con dos bombillas a 7 cm se decidieron descartarlo por bien del sistema, a tanta proximidad, la posibilidad que el material se fundiera por el calor aumentaba. El ensayo a 60 cm falló debido a que no se llegó a medir lo suficiente para llegar a la estabilización de la temperatura.

Las siguientes figuras muestran las iluminancias recibidas por el muro Trombe en función de la distancia al foco, para cada una de las configuraciones experimentales. La línea continua representa la media de los valores de las 9 fotorresistencias obtenidas para cada configuración, y la línea discontinua representa el valor máximo de cada una de ellas.

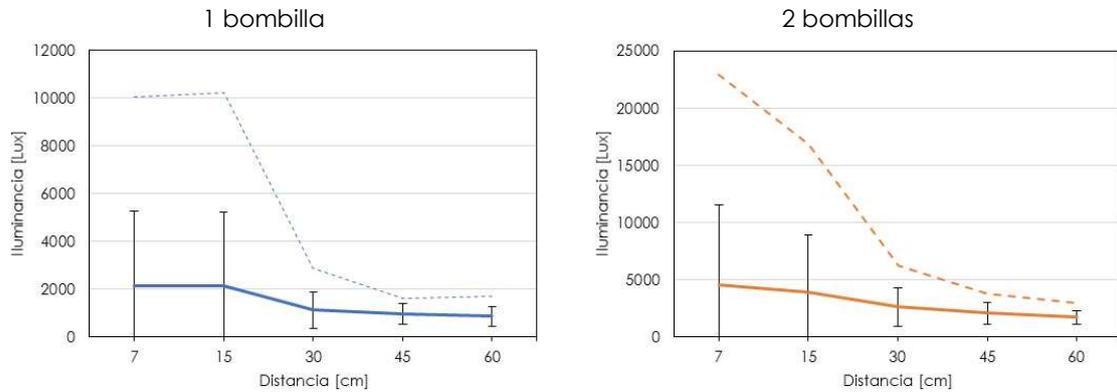


Figura 33. Gráficas de iluminancia en función de la distancia para las dos configuraciones.

Comparando con la iluminancia típica de un día soleado (entre 30.000 y 100.000 lux) vemos que, para todas las configuraciones, se está algo por debajo. Aun así, tal como se verá más adelante, estas configuraciones dieron aumentos notables de la temperatura y velocidad del aire en el interior del muro. Por ello, no se decidió realizar ensayos con menores distancias o mayor número de bombillas. Además, se comprobó que, para distancias de 7 cm con 2 bombillas, el panel de aislamiento empezaba a mostrar signos de quemadura.

De estas gráficas de iluminancia se obtienen las siguientes gráficas de radiación solar equivalente, que nos permiten comparar la radiación simulada con las bombillas respecto a las registradas en Murcia (Figura 19). Los resultados son los siguientes:

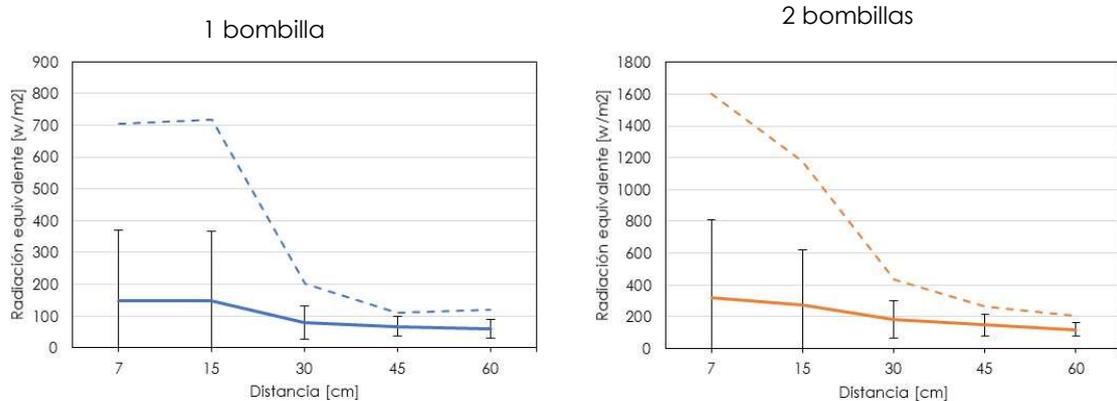


Figura 34. Gráficas de radiación solar equivalente en función de la distancia para las dos configuraciones de medida.

De la Figura 19 se vio que, para Murcia, hay una irradiación total diaria sobre una superficie vertical de unos 4000 W/m²·h. Dado que esta irradiación se obtiene durante las horas de Sol, se puede aproximar que las irradiancias o radiaciones solares horarias en medio día son de entre 800 y 1000 W/m². Comparando con las gráficas anteriores, vemos que se han obtenido radiaciones algo inferiores pero que, como se ha comentado, han dado lugar a un buen funcionamiento del muro Trombe.

A continuación, mostramos el efecto de esta insolación en el muro Trombe sobre la temperatura y velocidad del aire en su interior.

▪ **Incremento de temperatura:**

Para el estudio del comportamiento del Muro Trombe en las distintas condiciones de iluminación, se han comparado los incrementos de temperatura obtenidos a la salida del flujo de aire en la parte superior del muro.

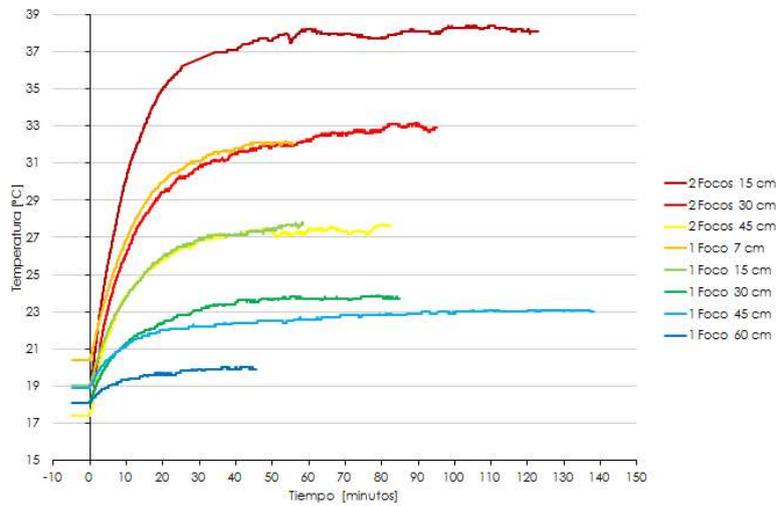


Figura 35. Temperaturas en el muro Trombe.

Como se puede observar, la subida de la temperatura es bastante abrupta, alcanzando un equilibrio entre 20 y 60 minutos, según la configuración de medida.

No obstante, como cada configuración parte de unas condiciones ambientales ligeramente distintas (entre 17 y 21 °C), para el análisis se han normalizado los datos respecto de la temperatura inicial antes de cada medida. Con ello, se observa que los incrementos de temperatura total están entre 2 y 19 °C, según la configuración de medida. Para comprobar que dichos incrementos de temperatura responden a un mismo patrón, se han ajustado las medidas a la siguiente expresión:

$$\Delta T(t) = a \cdot (1 - b \cdot e^{-c \cdot t}) \quad (1)$$

Donde a , b y c son coeficientes que se obtienen al introducir cada conjunto de datos en el ajuste. Esta expresión ha sido elegida dado que corresponde al modelo matemático esperado del calentamiento de un fluido sometido a una fuente de radiación externa, con influencia de la convección [12]. La obtención de los parámetros del ajuste se ha realizado en Matlab, según el procedimiento que se explica en el Anexo E. Con los parámetros obtenidos se han representado las curvas de ajuste encima de los datos, obteniendo la siguiente figura:

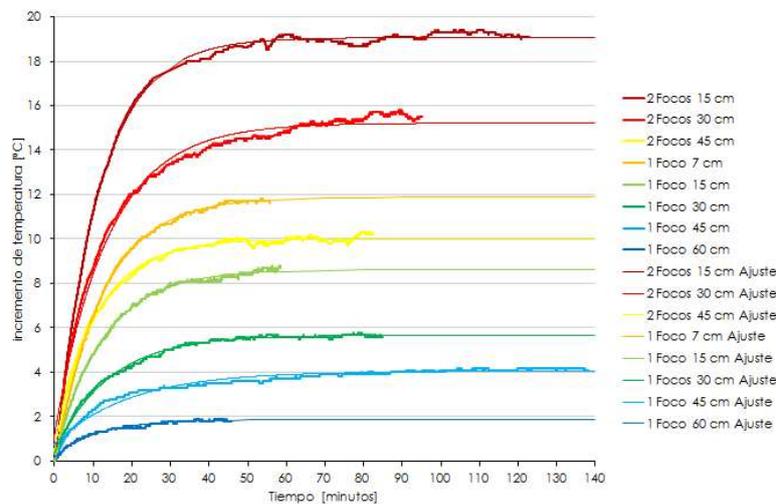


Figura 36. Incremento de temperaturas medidos en el muro Trombe con ajuste matemático.

La siguiente tabla muestra los valores de los parámetros de ajuste de cada una de las configuraciones medidas:

Configuración		Radiación media [W/m ²]	Parámetros del ajuste				Incremento temperatura [°C]
Nº de focos	Distancia [m]		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	
1	7	2123	11,88	1,01	0,0014	0,9995	11,88
	15	2119	8,61	0,98	0,0013	0,9982	8,61
	30	1119	5,67	0,92	0,0012	0,9948	5,67
	45	958	4,04	0,80	0,0009	0,9549	4,04
	60	857	1,85	0,90	0,0015	0,9794	1,86
2	7	4544	-	-	-	-	-
	15	3907	19,03	1,01	0,0015	0,9978	19,06
	30	2618	15,21	0,92	0,0012	0,9897	15,21
	45	2091	9,97	0,94	0,0016	0,9947	9,98

Tabla 2. Parámetros de ajuste de los datos de incremento de temperatura.

De esta tabla podemos inferir las siguientes conclusiones:

- El modelo matemático propuesto se ajusta bastante bien a los resultados en todas las series de datos analizados, dado que el coeficiente de correlación es $R^2 > 0.95$ en todos los casos.
- El parámetro de ajuste *a* corresponde de forma muy aproximada al incremento de temperatura final que se observa en el comportamiento la Figura 36.
- El parámetro de ajuste *b* se mantiene prácticamente constante, en torno a 0.94 en todas las medidas. Por ello, puede corresponder a una combinación de factores constantes tales como la densidad del aire, la resistencia térmica del muro, etc.
- El parámetro de ajuste *c* presenta cierta variación entre las medidas, incrementando/disminuyendo ligeramente con la radiación.

Con todo, se puede concluir que con el muro Trombe se logra un incremento de la temperatura en la cámara de aire bastante susceptible a la radiación incidente. En este sentido, la siguiente gráfica muestra el incremento de temperatura en función de la radiación incidente equivalente obtenida con los paneles de fotorresistencias:

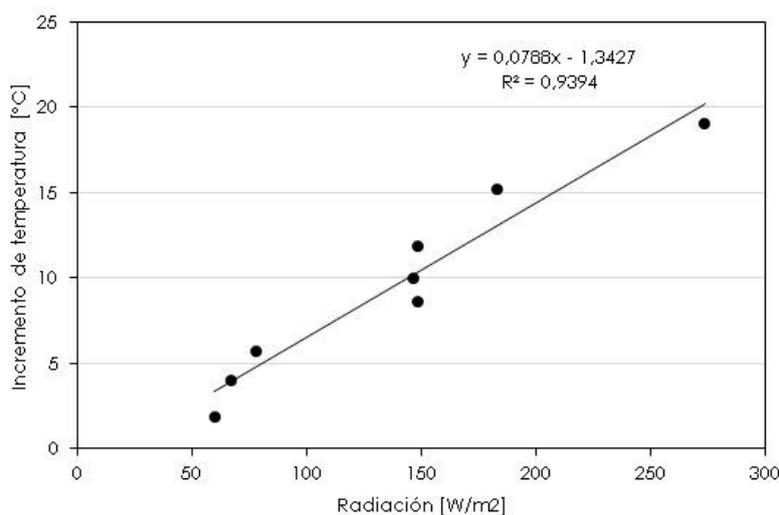


Figura 37. Relación entre incremento de temperatura del aire y radiación incidente.

Se observa una relación bastante lineal entre la radiación incidente y el incremento temperatura, con un coeficiente de correlación de 0,94 en la recta de ajuste.

▪ **Incremento de la velocidad del flujo de aire saliente:**

En el mismo punto donde se ha registrado la temperatura del flujo de aire saliente, se ha medido su velocidad. La Figura 38 muestra el comportamiento de las temperaturas registradas. Además, para establecer valores finales de equilibrio en la velocidad del flujo de aire saliente, se ha realizado un ajuste con la misma expresión que la velocidad, obteniendo las siguientes curvas de ajuste:

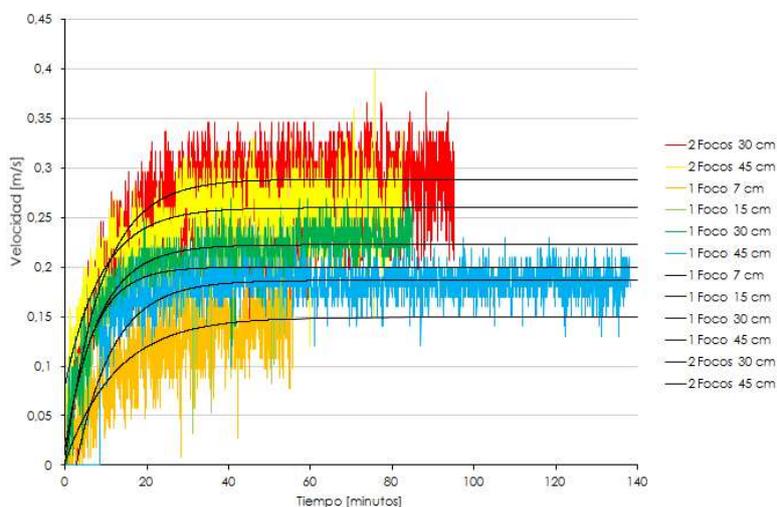


Figura 38. Velocidades del viento obtenidas en el muro Trombe con ajuste matemático.

Se observa que los datos de velocidad del aire presentan una variabilidad mayor que los de temperatura. No obstante, la tendencia de crecimiento es similar, por lo que se decidió testear la misma expresión de ajuste que la utilizada en el incremento de temperatura (Ecuación 1). La siguiente tabla muestra los resultados del ajuste y velocidades finales del aire en el muro Trombe obtenidas en cada configuración:

Configuración		Radiación media [W/m ²]	Parámetros del ajuste				Incremento velocidad [m/s]
Nº de focos	Distancia [cm]		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²	
1	7	148,59	0,1496	0,9790	0,0013	0,6539	0,15
	15	148,30	0,2003	0,9224	0,0025	0,8088	0,20
	30	78,33	0,2227	0,9190	0,0020	0,8590	0,22
	45	67,07	0,1867	1,3527	0,0019	0,8263	0,19
	60	59,97	0,0275	2,1560	0,0728	0,0091	-
2	7	318,11	-	-	-	-	-
	15	273,50	0,2970	1,0508	0,0002	0,7337	0,24
	30	183,29	0,2888	0,9919	0,0019	0,7313	0,29
	45	146,35	0,2601	0,6887	0,0018	0,6221	0,26
	60	148,59	0,2788	1,0379	0,0040	0,9478	0,23

Tabla 3. Parámetros de ajuste de los datos de incremento de velocidad.

Al igual que observamos en la Tabla 2, se observa que el parámetro *a* representa el incremento de la velocidad del flujo de aire saliente cuando se alcanza el equilibrio. Los parámetros *b* y *c*, aunque presentan una mayor variación entre ellos que en el caso del ajuste de incremento de temperatura, tampoco se observa una tendencia clara de su variabilidad. Con todo, el ajuste es algo peor que en el caso de las temperaturas, pero sirve de base para establecer una correlación entre la radiación incidente y el incremento de velocidad obtenido en el muro Trombe.

La siguiente gráfica muestra el aumento de la velocidad viento en función de la radiación incidente equivalente obtenida en las distintas configuraciones:

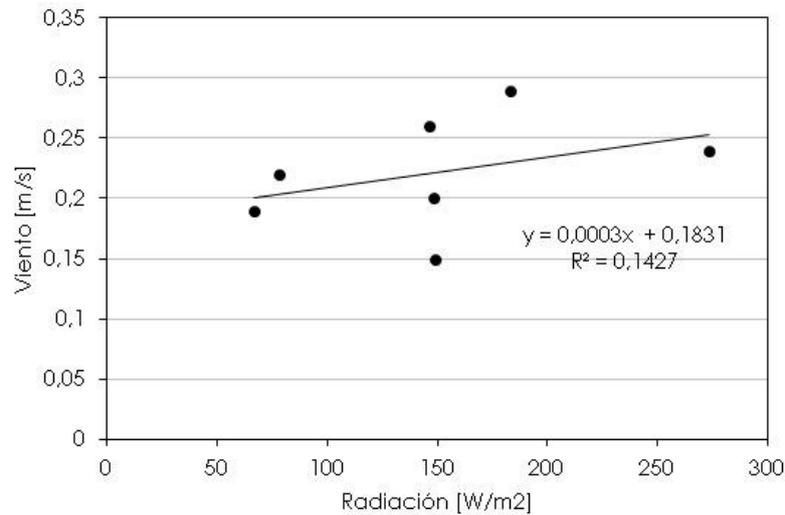


Figura 39. Relación entre velocidad del aire y radiación incidente.

Se observa que la correlación que existe entre el viento y la radiación es más baja que la de temperatura pues el coeficiente de correlación es bastante más bajo (0,15). Esto se debe a que los datos de la velocidad del aire presentan mayor variabilidad que los de temperatura. No obstante, en general, la inclinación de la recta es positiva, con lo que se puede concluir que hay un incremento del viento con la radiación pero que es bastante variable.

Con todo, con el muro Trombe estudiado en condiciones de laboratorio, se consigue un flujo de 0.3 m/s. Tal como se vio en el diagrama de Olgyay (Figura 1), con estas velocidades del aire, se puede reducir hasta 2 °C la temperatura de confort, es decir, conseguir confort higrotérmico estando 2° C encima de la temperatura de bienestar (28 °C). No obstante, las temperaturas y velocidades registradas se han obtenido con radiación artificial con la configuración descrita, obteniendo radiaciones algo por debajo de las que podemos obtener en días soleados. Por tanto, se puede esperar un mejor funcionamiento del muro Trombe en condiciones de insolación reales.

A continuación, se muestran unos ensayos preliminares de este sistema registrando datos en condiciones "in situ".

5.2.2. Medidas in situ

▪ Mediciones en el interior muro:

En las medidas en el exterior, inicialmente se realizan mediciones en el interior del propio muro Trombe. Estas se realizaron con el anemómetro a dos alturas distintas:

1º) En la apertura superior, al igual que en las mediciones de laboratorio, pero con mayor influencia de los flujos de aire externos.

2º) A media altura de la cámara de aire, más resguardados del flujo externo, con ayuda de un soporte lateral.

En ambos casos, se dejó una apertura en la parte trasera de la caja. La Figura 40 indica estas dos posiciones de medida.



Figura 40. Posiciones de medida.

En la Figura 41 se muestran las temperaturas y velocidades obtenidas en la parte superior del muro. Los valores de temperatura aumentan debido a la radiación incidente, pero de una forma no demasiado homogénea. Por otro lado, el viento se comporta de forma similar en el transcurso de la medida, con valores desde 0.1 hasta 1 m/s. En este caso, los datos recogidos de viento corresponden al viento producido en el exterior y no al comportamiento del sistema en sí.

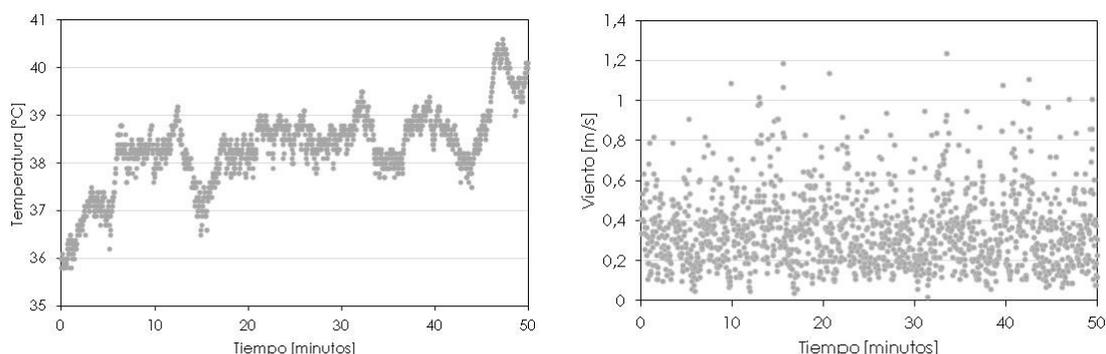


Figura 41. Valores medidos en la parte superior del muro en condiciones reales.

En la Figura 42 se muestran las temperaturas y velocidades obtenidas a media altura de la cámara de aire. La temperatura aumenta de forma similar a como vimos en laboratorio, alcanzando un incremento hasta 30 °C, mayor del obtenido en laboratorio. Además, se registra un incremento de la velocidad del aire de entre 0.3 y 0.4 m/s. Con todo, se observa que el muro Trombe en condiciones reales está comportándose según lo esperado.

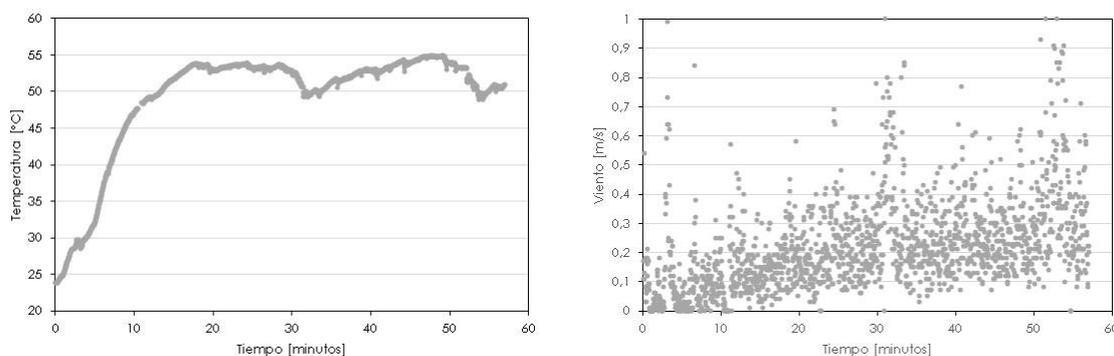


Figura 42. Valores medidos en la parte intermedia del muro en condiciones reales.

▪ **Mediciones en el interior de la caja:**

Posteriormente, para comprender mejor el comportamiento del muro Trombe, se realizaron mediciones en el interior de la caja de panel sandwich, en dos configuraciones distintas:

- 1º) Con la apertura trasera cerrada.
- 2º) Con la apertura trasera abierta.

En la Figura 43 se muestra el sistema de medida y la apertura trasera indicada.



Figura 43. Posiciones de medida.

En la Figura 45 se muestran los valores obtenidos con la apertura trasera cerrada. Se observa un incremento lento de la temperatura interior y un flujo de aire prácticamente nulo (los valores de velocidad iniciales corresponden a la preparación del dispositivo antes de iniciar la medida). Con ello se deduce que es necesario establecer una entrada de aire exterior para que el comportamiento de muro Trombe sea efectivo. De modo contrario, el propio muro puede dar lugar a condiciones indeseadas de sobrecalentamiento.

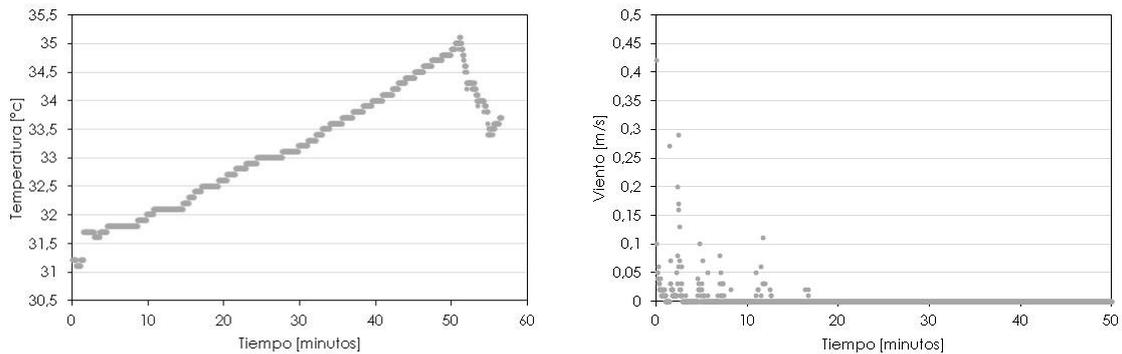


Figura 44. Valores medidos en el interior de la caja del muro Trombe con la trasera cerrada.

En la Figura 45 se muestran los valores obtenidos con la apertura trasera abierta. Los datos muestran variaciones de la temperatura, pero estas se encuentran alrededor de las temperaturas externas, sin sobrecalentamiento. La velocidad del aire aumenta hasta 0.2 m/s. Este valor es algo inferior al esperado por el incremento de 30 °C en el muro (Figura 42) pero ofrece un primer resultado para validar el comportamiento del muro Trombe funcionando en condiciones de insolación reales.

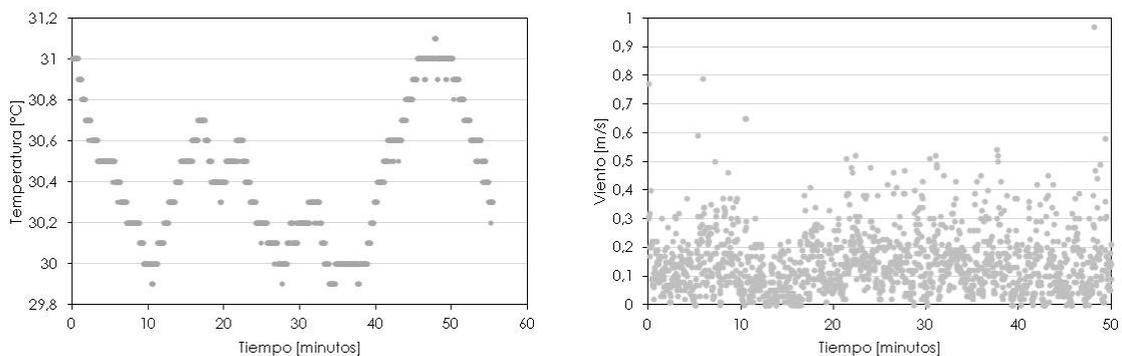


Figura 45. Valores medidos en el interior de la caja del muro Trombe con la trasera abierta.

5.3. Análisis de muro EcoCooler

5.3.1. Medidas en diseño único

El diseño único se midió en 5 puntos a lo largo de todo el sistema. Para ello, se realizaron una serie de orificios en el sistema que permitan introducir el anemómetro para el registro de la temperatura y la velocidad del flujo de aire. El primer y segundo punto se encuentra en la primera mitad del sistema, en el tubo de menor diámetro. El tercer punto, se encuentra justo a la salida de la parte más reducida de la botella, situada en el tablero que separa un tubo del otro a través de un orificio; de este modo, se puede medir con exactitud la velocidad que existe a la salida del cuello de la botella. Los dos últimos puntos de medida se encuentran a unos diez cm del tercer punto y por último, el cuarto punto, se encuentra a 20 cm del tercer punto. La siguiente imagen muestra la localización de estos puntos de medida:

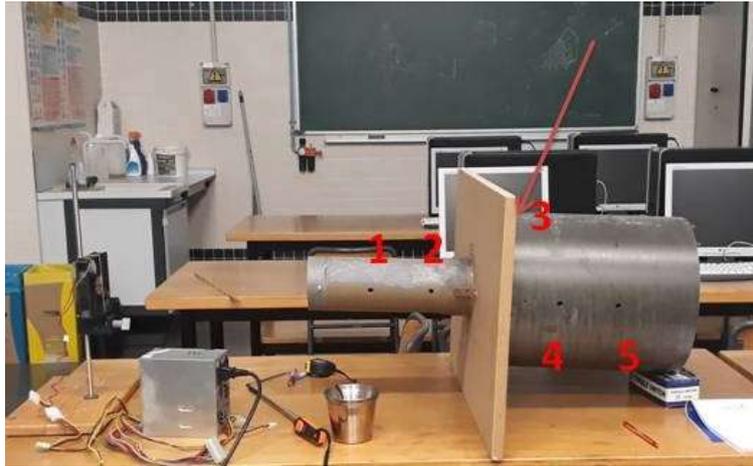


Figura 46. Sistema de diseño único con los puntos representados.

En primer lugar, se realizaron los ensayos con un ventilador pequeño, típico ventilador utilizado para la refrigeración de dispositivos electrónicos (modelo Brushless DC Fan Wan) y, posteriormente, con un ventilador grande de pie de uso doméstico (modelo Obergozo SF 0147 Ventilador de pie, 50 W).

▪ Condiciones del aire incidente en diseño único:

En el estudio del muro EcoCooler de diseño único, se midió a dos distancias con el ventilador pequeño y a dos con el ventilador grande. Con ello, se obtuvieron distintas velocidades y temperaturas de los flujos entrantes. En la tabla se muestra la media y desviación de los datos recogidos en el punto 1 durante 1 minuto.

Tipo de ventilador	Distancia [cm]	Velocidad del flujo [m/s]	Temperatura del flujo [°C]
Pequeño	45	$0,064 \pm 0,026$	$18,00 \pm 0,00$
	25	$0,073 \pm 0,025$	$17,94 \pm 0,05$
Grande	90	$0,172 \pm 0,032$	$18,30 \pm 0,00$
	40	$0,245 \pm 0,032$	$18,36 \pm 0,05$

Tabla 4. Condiciones del flujo incidente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño único en condiciones de laboratorio.

Con el ventilador pequeño, el viento no variaba excesivamente con la distancia y la velocidad era bastante baja. Con el ventilador grande, la velocidad del aire incidente es mayor, observándose una mayor velocidad a 40 cm de distancia que a 90 cm por la cercanía. Las temperaturas del flujo incidente en todas las configuraciones eran bastante similares, alrededor de 18 °C.

▪ **Variación de la velocidad del aire saliente en diseño único:**

A continuación, se muestran los gráficos a partir de los datos registrados en un ensayo de 25 cm de distancia con el ventilador pequeño en el diseño único. Este es un ejemplo del funcionamiento del sistema, desde la introducción del aire (punto 1) hasta la salida (punto 5). Las gráficas correspondientes a cada configuración medida se encuentran en el Anexo C.

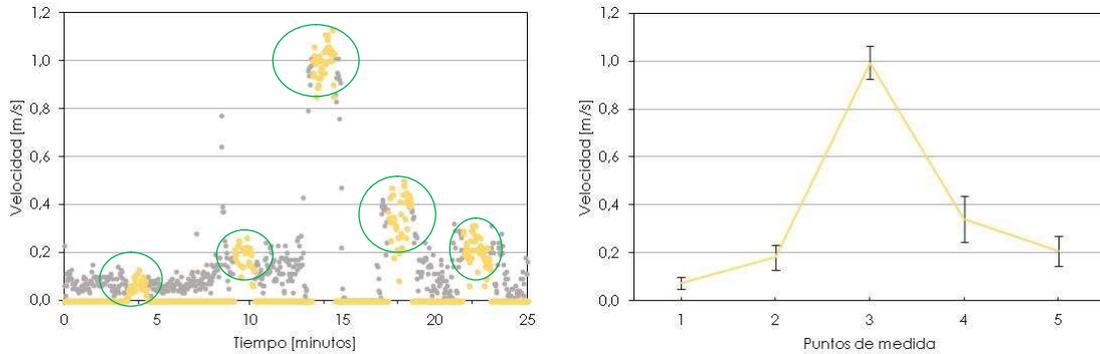


Figura 47. Datos de los 5 puntos a lo largo de todo el sistema del diseño único, en un ensayo realizado a 25 cm de distancia.

En la gráfica de la izquierda distinguimos los puntos de color de los grises, siendo los datos amarillos los que representan los instantes de medida en cada uno de los puntos del sistema, y los datos grises puntos de todo el registro al mover el anemómetro de un punto a otro. En la gráfica de la derecha se muestra la media y desviación de los datos de cada uno de estos puntos de medida.

En la tabla se muestran los valores obtenidos en los diferentes puntos de medida. Al final de la tabla, se muestra la diferencia que existe entre el primer punto (incidente) y el último (salida).

	P1	P2	P3	P4	P5	Diferencia P5-P1 [m/s]
Pequeño 25 cm	0,07	0,18	0,99	0,34	0,21	0,14
Pequeño 45 cm	0,06	0,03	0,71	0,57	0,25	0,19
Grande 90 cm	0,17	0,31	2,62	1,53	0,51	0,34
Grande 40 cm	0,24	0,37	2,18	1,05	0,40	0,24

Tabla 5. Resumen de los datos de velocidad tomados en cada punto con su respectiva diferencia entre el punto inicial y el punto final.

Los valores de velocidad más elevados coinciden en el punto 3, que corresponden a la parte estrecha de la botella (cuello estrecho de la botella). Más adelante, el aire se expande disminuyendo su velocidad.

Todas las diferencias entre los valores entrante y saliente son positivas con lo que en todas las configuraciones hay un aumento del flujo a lo largo del diseño único del muro EcoCooler. Estos incrementos son de, aproximadamente, el doble del flujo de aire incidente, es decir, que se duplica la velocidad del viento incidente.

Teniendo en cuenta el diagrama de Olgay (Figura 1), este incremento se traduce en que, con un sistema tipo diseño único de muro EcoCooler, se puede obtener hasta 1 °C de reducción en la temperatura para alcanzar la zona de bienestar. No obstante, este sistema es un prototipo, que deberá ser contrastado con los resultados obtenidos con el diseño múltiple, tal como se verá más adelante.

▪ **Variación de la temperatura del aire saliente en diseño único:**

A continuación, se muestra un análisis similar al que hemos realizado con la velocidad del aire en el diseño único del muro EcoCooler, pero con la temperatura. La siguiente figura es un ejemplo de los datos obtenidos en diseño único a 25 cm de distancia con ventilador pequeño. Las correspondientes a las demás configuraciones puede verse en el Anexo C.

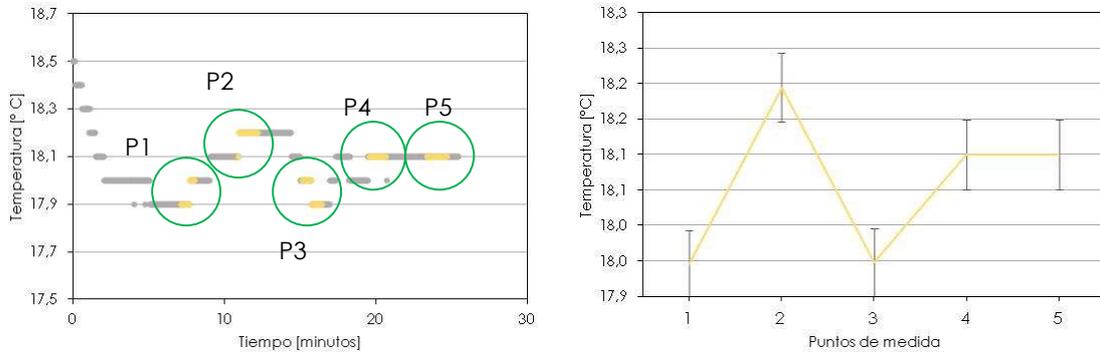


Figura 48. Datos de los 5 puntos del sistema de un ensayo realizado a 25 cm de separación con ventilador pequeño.

En la gráfica de la izquierda, cada círculo representa los puntos por los que ha ido pasando el viento en el interior del sistema. En la gráfica de la derecha, se muestran las medias y desviaciones de los datos registrados en cada uno de los puntos. A priori, vemos que no existe una gran variabilidad en la temperatura del flujo del aire.

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los valores recogidos en cada punto para cada configuración y, al final, una columna con la diferencia entre el primer dato (flujo incidente) y el último (flujo saliente):

	P1	P2	P3	P4	P5	Diferencia P5-P1 [°C]
Pequeño 25 cm	17,94	18,19	17,95	18,10	18,10	0,16
Pequeño 45 cm	18,00	18,10	18,00	18,00	18,10	0,10
Grande 90 cm	18,30	18,20	18,21	18,30	18,34	0,04
Grande 40 cm	18,36	18,40	18,40	18,40	18,42	0,06

Tabla 6. Resumen de los valores de temperatura tomados en cada punto del sistema, y diferencia entre la temperatura del primer punto de medida con respecto a la salida.

Los datos recogidos apenas muestran mucha diferencia entre la temperatura inicial y final. Tanto en el ensayo con el ventilador grande como con el ventilador pequeño, la diferencia que se aprecia entre la temperatura de entrada y de salida, es mínima, insuficiente para poder afirmar que hay un cambio notable de temperatura con el sistema de diseño único del muro EcoCooler. Con todo, se observa un ligero aumento en la temperatura, que puede deberse, como se ha comentado en anteriores ensayos, a la presencia de la persona que ha estado midiendo dado que estos cambios son mínimos.

Este comportamiento puede deberse que la entrada de aire y el cambio de velocidad no es suficiente para provocar una bajada de temperatura en su interior a través del efecto Joule-Thomson. Pueden influir muchos detalles, como son el diámetro de los tubos de PVC, la longitud de estos, o la incidencia del viento. Aun habiendo probado a distintas distancias el comportamiento de la temperatura seguía siendo el mismo: apenas se aprecia cambio alguno.

5.3.2. Medidas en diseño múltiple

Las medidas realizadas en el dispositivo de diseño múltiple del muro EcoCooler son similares a las del diseño único, pero a mayor escala. Para ello tenemos el tablero con los 35 cuellos de botella, sobre los cuales se les aplicó el flujo de aire proveniente de un ventilador de pie. Unido al muro se encuentra la caja de panel sándwich, en cuyo interior y exterior se colocó el sistema de medida. Así la velocidad del aire entrante se midió en cada uno de los cuellos de botella exteriores, y el flujo de aire saliente se midió en el interior de la caja, en 3 puntos a distintas distancias desde la salida del aire por las botellas hasta el extremo de la caja, tal como muestra la siguiente figura.



Figura 49. Puntos de medida del diseño múltiple del muro EcoCooler.

▪ Condiciones del flujo de aire incidente en diseño múltiple:

En el exterior del sistema, se mantuvo el anemómetro durante unos segundos delante de cada uno de los orificios del muro, y se registró la temperatura y velocidad. Las siguientes figuras muestran un ejemplo de datos incidencia recogidos, realizada con el ventilador de pie a 70 cm de distancia respecto al muro EcoCooler. Las figuras correspondientes a las demás configuraciones se encuentran en el Anexo C.

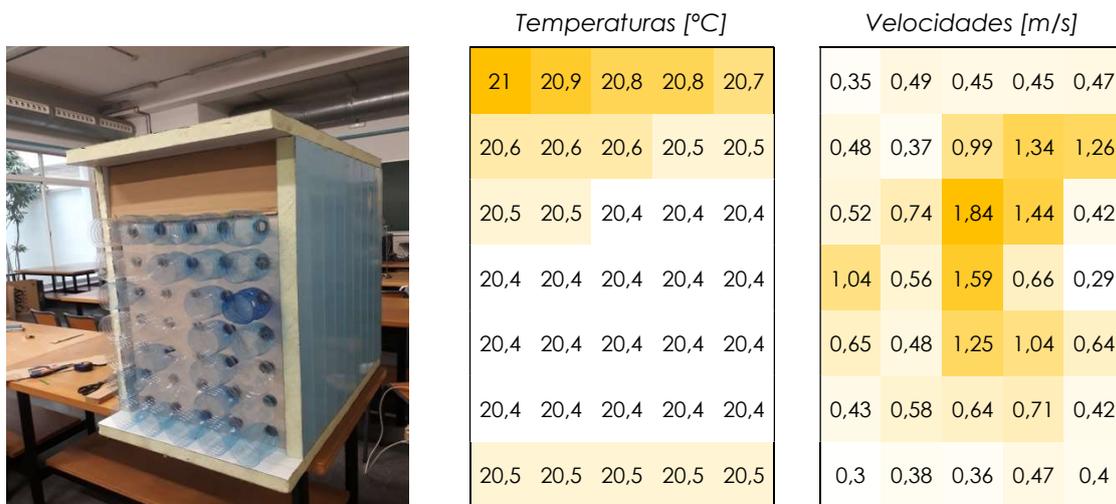


Figura 50. La primera imagen corresponde al tipo de sistema montado para el diseño múltiple del EcoCooler. Las siguientes muestran la distribución de temperaturas y viento en el panel.

La siguiente tabla muestra la media y desviación de las temperaturas y velocidades incidentes obtenidas en cada una de las configuraciones experimentales.

Tipo de ventilador	Distancia [cm]	Velocidad del flujo [m/s]	Temperatura del flujo [°C]
De pie	70	0,59 ± 0,09	20,13 ± 0,09
	50	0,34 ± 0,39	20,99 ± 0,17
	100	0,59 ± 0,10	20,08 ± 1,61

Tabla 7. Flujo incidente en las medidas realizadas con el diseño múltiple del muro EcoCooler.

Las temperaturas no varían mucho de unos ensayos a otros. La velocidad presenta una mayor incidencia en el ensayo de 100 cm, a pesar de la distancia, que puede ser debido a una incidencia más regular del flujo de aire.

▪ **Variación de la velocidad del aire saliente en diseño múltiple:**

Una vez tomados los datos incidentes en exterior de la caja, se recogieron los datos del interior. Las siguientes gráficas son un ejemplo del ensayo realizado a 70 cm de separación. Los datos reflejan el comportamiento del viento a la salida de los cuellos de botellas pasando por el interior de la caja de panel sandwich.

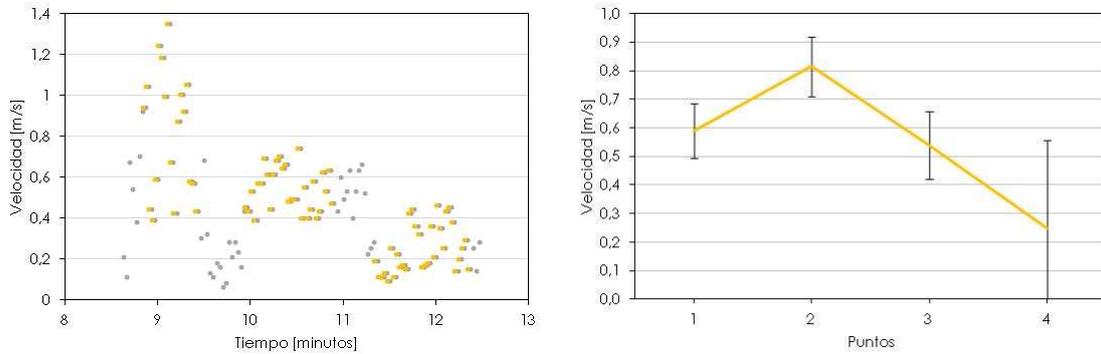


Figura 51. Ejemplo de un ensayo realizado a 70 cm de separación con ventilador grande.

A la izquierda observamos los datos registrados en el interior de la caja. En color amarillo son los instantes en los que se midió en cada uno de los tres puntos interiores (puntos 2, 3 y 4), y el color gris las demás medidas realizadas al desplazar el anemómetro de un punto a otro. A la derecha, la media y desviación de los datos exteriores (puntos 1) y los interiores. Aunque los datos no son tan claros como en el caso del diseño único, sí se observa que el segundo punto es el que presenta mayor velocidad como era de esperar, ya que corresponde a la parte más estrecha de todo el sistema.

La siguiente tabla refleja los valores del flujo de aire a lo largo del diseño múltiple para cada una de las configuraciones, así como la diferencia entre el flujo incidente y el saliente por la caja.

Distancia [cm]	P1	P2	P3	P4	Diferencia P4-P1 [m/s]
100	0,59	0,75	0,08	0,07	-0,52
70	0,59	0,81	0,53	0,25	-0,33
50	0,34	0,58	0,50	0,16	-0,18

Tabla 8. Condiciones del flujo saliente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño múltiple en condiciones de laboratorio.

En este caso vemos que, en todas las configuraciones, la velocidad del viento empieza a ser menor a partir del punto 2, disminuyendo progresivamente. No obstante, la distancia del punto 1 al panel perforado (punto 2) es menor que la de este al punto 3, con lo que la disminución del flujo de salida es algo más gradual que el aumento de velocidad del flujo de entrada. Además, puede influenciar el hecho de que la caja presenta un lado entero al descubierto (lado trasero), desde el que se han manejado los anemómetros, con lo que este puede difundirse mucho más que en el caso del diseño único.

Por tanto, podemos afirmar que con el diseño múltiple del muro EcoCooler se pueden obtener flujos de aire mayores a los incidentes en distancias próximas al mismo. Además, en un caso real de ventilación de una vivienda, donde las únicas aperturas al exterior son puertas y ventanas de dimensiones mucho menores que los muros, puede que este flujo sea mayor sin las pérdidas que aparecen en el diseño construido.

▪ **Variación de la temperatura del aire saliente en diseño múltiple:**

Los datos de temperatura fueron tomados en los mismos puntos donde se obtuvieron las velocidades del aire del diseño múltiple. La siguiente figura muestra un ejemplo de los resultados obtenidos con un flujo incidente realizado por un ventilador a una distancia de 70 cm de separación.

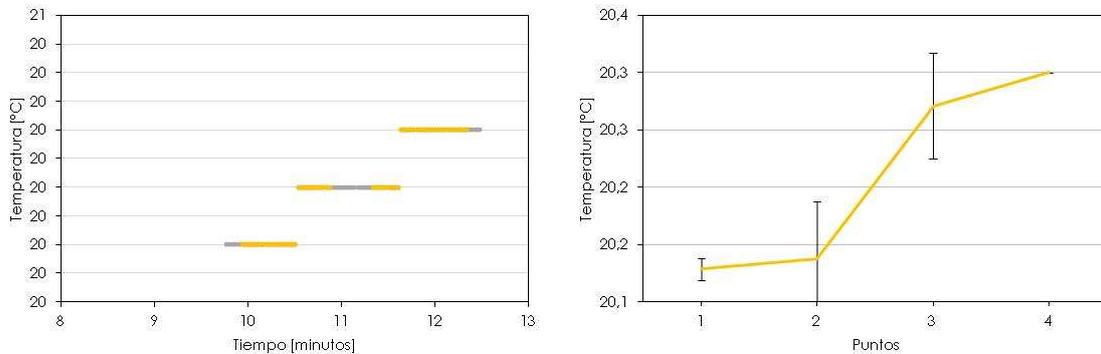


Figura 52. Ejemplo de un ensayo realizado a 70 cm de separación con ventilador grande.

Los datos reflejan un ligero aumento de la temperatura a la salida de la caja, pero es tan mínima que esto puede ser consecuencia a la presencia de la misma persona que está midiendo.

Distancia [cm]	P1	P2	P3	P4	Diferencia P4-P1 [°C]
10	20,8	20,60	20,58	20,52	-0,21
70	20,12	20,30	20,13	20,27	0,15
50	20,98	21,24	21,35	21,30	0,32

Tabla 9. Condiciones del flujo saliente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño único en condiciones de laboratorio.

Los datos de la Tabla 9 muestran a qué distancias se ha visto incrementado o bien disminuido la temperatura. A una distancia de 100 cm ha disminuido, pero apenas 0,2 grados Celsius. En los casos donde aparece que hay un ligero aumento de temperatura puede ser debido a que haya influido la persona al medir. Los datos son relevantes, pero no lo suficiente para poder afirmar que podría apreciar cierta variación en el sistema.

6. Conclusiones

Se han estudiado dos propuestas de climatización pasiva para edificios y viviendas con el objeto de caracterizar sus posibilidades en el contexto de la transición energética hacia un sistema energético sostenible. Para ello, se han determinado las condiciones de bienestar higrotérmico y las medidas para su consecución (básicamente, ventilación) dentro del ámbito de la arquitectura bioclimática aplicada a climas cálidos.

Se han construido dos prototipos de sistemas de climatización pasiva: el muro Trombe y el muro EcoCooler; realizando medidas tanto en laboratorio como en el exterior, utilizando distintos sistemas para el control de la radiación solar y flujo exterior incidente, y la toma de datos.

Del análisis de las **condiciones climáticas** exteriores:

- Los diagramas psicrométricos permiten prever las actuaciones a tomar en distintas condiciones ambientales para obtener una mejora en las condiciones de bienestar higrotérmico.
- En general, mediante sistemas de ventilación pasiva, se puede mejorar la sensación de bienestar en la mayor parte de los meses de verano con ventilaciones por debajo de los 3 m/s.

Del análisis de los resultados se concluye que el prototipo del **muro Trombe**:

- En condiciones de laboratorio, se ha conseguido simular artificialmente una fuente de radiación, que ha permitido incrementar la temperatura del aire hasta en unos 20°C y producir corrientes de aire de hasta 0.3 m/s.
- En condiciones de operación en exterior, la radiación solar ha permitido incrementar la temperatura hasta 30 °C y producir corrientes entre 0.2 y 0.4 m/s, mejorando 2 °C la sensación de confort. Así, se demuestra sus posibilidades de uso como sistema de ventilación pasivo.
- Los datos de temperatura y velocidad experimentan cierta variabilidad, pero se ha encontrado una tendencia de crecimiento similar, que permite prever el comportamiento del muro en condiciones de radiación más extremas.

Del análisis de los resultados los prototipos del **muro EcoCooler** se concluye:

- El sistema prácticamente no produce reducciones apreciables de la temperatura del aire.
- El diseño único mantiene una temperatura constante a lo largo de todo el sistema.
- En las proximidades a la salida de los cuellos de botella es donde existe un aumento del flujo de aire que puede ayudar a mejorar la sensación de bienestar higrotérmico.

De los estudios realizados en este trabajo, se aportan una serie de mejoras y líneas futuras para nuevos experimentos en estos prototipos de climatización pasiva:

- Tener un mayor control tanto del muro como de la caja de panel sandwich en cuanto a entrada y salida de aire.
- Aumentar el número de sensores distribuidos por todo el sistema y mejorar la automatización de medidas. Este es un punto crítico y que ha evolucionado a lo largo de este trabajo.
- Testear distintos diseños de muro Trombe para estudiar la influencia de distintos parámetros como el espesor de la cámara de aire, el tamaño de la entrada y salida de aire, la altura del muro, el material del panel, etc.
- Experimentar en el exterior con el sistema EcoCooler para determinar, en condiciones ambientales reales, como sería su comportamiento cerrando parcialmente la parte trasera de la caja.
- Experimentar con los sistemas ubicados en huecos de viviendas como ventanas, en vez de con la caja para aproximarse mejor a su comportamiento "in situ".

Bibliografía

- [1] "Interfubernamental Panel on Climate Change," 17 2019. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/>.
- [2] UNEF, "El tiempo de la energía solar fotovoltaica. Informe anual 2016".
- [3] J. M. Bohórquez, Muro de Trombe, Bogotá D.C.: Universidad de los Andes, 2006.
- [4] V. Olgyay, *Arquitectura y clima. Manual y diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.*, Gustavo Gili S.A., 1998.
- [5] F. Fernández García, "Clima y Confortabilidad humana. Aspectos metodológicos.," *Serie Geográfica*, 1994, pp. 109-125.
- [6] J. Neila, *Arquitectura Bioclimática*, Madrid: Munilla-Lería, 2004.
- [7] T. S. Boutet, "Controlling air movement," McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1987.
- [8] F. García, "Torres de viento en Irán, aire acondicionado natural," Octubre 2017. [Online]. Available: <https://viajairan.com/torres-de-viento-en-iran/>.
- [9] "PlasticsMag," 18 Junio 2018. [Online].
- [10] AIPU, "Asociación de la Industria del Poliuretano Caso de éxito: construcción de una Lofhome con paneles sándwich de poliuretano," 20 Abril 2017. [Online]. Available: <https://aislaconpoliuretano.com/>.
- [11] M. d. C. Daza, "Diseño e implementación de un sistema automático de medida para el análisis termodinámico de edificios," TFM, 2018.
- [12] G. Cabrera and C. Marín, "Modelo estable de un absorbedor solar con lecho de rocas para secado por calentamiento de aire," *El Hombre y la Máquina*, vol. 32, 2009.
- [13] P. J. Hernández, "Diagrama bioclimático de Olgyay," 2014.
- [14] F. F. García, "Clima y Confortabilidad humana. Aspectos metodológicos.," *Serie Geográfica*, 1994.
- [15] G. Gan, "A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings," *Energy and Buildings*, vol. 27, no. 1, 1998.
- [16] I. Capellán-Pérez, M. Mediavilla, C. de Castro, Ó. Carpintero and L. J. Miguel, "Agotamiento de los combustibles fósiles y escenarios socio-económicos: un enfoque integrado," *Energy*, 2014.
- [17] J. Neila, "Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible: buenas prácticas edificatorias," *Textos sobre Sostenibilidad*, no. 89, 2000.

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de bienestar de Olgay.....	9
Figura 2. Diagrama de bienestar de Givoni.....	10
Figura 3. Izquierda, ejemplo de diagrama de Olgay con los puntos climáticos de todos los días del año para una zona de clima mediterráneo. Derecha, climograma correspondiente.....	11
Figura 4. Arquitectura bioclimática.....	12
Figura 5. Distintas configuraciones del muro Trombe.....	15
Figura 6. Aspecto final del muro Trombe construido.....	16
Figura 7. Pasos de construcción del muro Trombe (1).	18
Figura 8. Pasos de construcción del muro Trombe (2).	18
Figura 9. Pasos de construcción del muro Trombe (3).	18
Figura 10. Pasos de construcción del muro Trombe (4).	19
Figura 11. Pasos de construcción del muro Trombe (5).	19
Figura 12. Sistema EcoCooler y efecto producido por la compresión del aire.....	20
Figura 13. Aspecto final del muro EcoCooler construido (diseño múltiple).	21
Figura 14. Pasos de construcción del muro EcoCooler (1).	22
Figura 15. Pasos de construcción del muro EcoCooler (2).	22
Figura 16. Pasos de construcción del muro EcoCooler (3).	22
Figura 17. Ejemplo de listado de datos meteorológicos posibles.	23
Figura 18. Temperatura y humedad relativa de la zona bajo estudio.	23
Figura 19. Izquierda, radiaciones incidentes sobre la superficie horizontal. Derecha, comparación de la radiación solar global en superficie horizontal y vertical.	23
Figura 20. Configuración inicial o de test para el control de las medidas con el muro Trombe.....	24
Figura 21. Configuración final para el control de las medidas con el muro Trombe.....	24
Figura 22. Dispositivo para control de insolación de muro Trombe en condiciones de laboratorio.	25
Figura 23. Dispositivo para la calibración del dispositivo de insolación.	25
Figura 24. A la izquierda, ubicación del muro Trombe en el edificio D de la EPSG donde se realizaron los ensayos de EcoCooler en el exterior. A la derecha, imagen de su orientación a ...	26
Figura 25. Posición de los puntos de medida del muro Trombe.	26
Figura 26. Configuración inicial o de test para el estudio del muro EcoCooler.....	27
Figura 27. Sistemas de medición final para el estudio del muro EcoCooler.....	27
Figura 28. Sistema para el control del flujo de aire incidente en el muro EcoCooler en diseño único. A la izquierda, ventilador pequeño. A la derecha, ventilador grande.....	28
Figura 29. Control de flujo de aire en diseño múltiple del muro EcoCooler.	28
Figura 30. Distribución de los datos mensuales en la gráfica de Olgay.....	29
Figura 31. Distribución de los datos mensuales en la gráfica de Givoni.	30
Figura 32. Iluminancia y radiación solar equivalente sobre el Muro Trombe realizados a 30 cm de distancia con incidencia de una bombilla.	31
Figura 33. Gráficas de iluminancia en función de la distancia para las dos configuraciones.....	32
Figura 34. Gráficas de radiación solar equivalente en función de la distancia para las dos configuraciones de medida.	32
Figura 35. Temperaturas en el muro Trombe.	33

Figura 36. Incremento de temperaturas medidos en el muro Trombe con ajuste matemático.....	33
Figura 37. Relación entre incremento de temperatura del aire y radiación incidente.	34
Figura 38. Velocidades del viento obtenidas en el muro Trombe con ajuste matemático.....	35
Figura 39. Relación entre velocidad del aire y radiación incidente.	36
Figura 40. Posiciones de medida.	37
Figura 41. Valores medidos en la parte superior del muro en condiciones reales.....	37
Figura 42. Valores medidos en la parte intermedia del muro en condiciones reales.	37
Figura 43. Posiciones de medida.	38
Figura 44. Valores medidos en el interior de la caja del muro Trombe con la trasera cerrada.	38
Figura 45. Valores medidos en el interior de la caja del muro Trombe con la trasera abierta.....	38
Figura 46. Sistema de diseño único con los puntos representados.	39
Figura 47. Datos de los 5 puntos a lo largo de todo el sistema del diseño único, en un ensayo realizado a 25 cm de distancia.	40
Figura 48. Datos de los 5 puntos del sistema de un ensayo realizado a 25 cm de separación con ventilador pequeño.	41
Figura 49. Puntos de medida del diseño múltiple del muro EcoCooler.	42
Figura 50. La primera imagen corresponde al tipo de sistema montado para el diseño múltiple del EcoCooler. Las siguientes muestran la distribución de temperaturas y viento en el panel.	42
Figura 51. Ejemplo de un ensayo realizado a 70 cm de separación con ventilador grande.	43
Figura 52. Ejemplo de un ensayo realizado a 70 cm de separación con ventilador grande.	44
Figura 53. Eficacia luminosa de una radiación de cuerpo negro.	64

Lista de tablas

Tabla 1. Mediciones realizadas con el muro Trombe en condiciones de laboratorio.	31
Tabla 2. Parámetros de ajuste de los datos de incremento de temperatura.	34
Tabla 3. Parámetros de ajuste de los datos de incremento de velocidad.	35
Tabla 4. Condiciones del flujo incidente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño único en condiciones de laboratorio.	39
Tabla 5. Resumen de los datos de velocidad tomados en cada punto con su respectiva diferencia entre el punto inicial y el punto final.....	40
Tabla 6. Resumen de los valores de temperatura tomados en cada punto del sistema, y diferencia entre la temperatura del primer punto de medida con respecto a la salida.....	41
Tabla 7. Flujo incidente en las medidas realizadas con el diseño múltiple del muro EcoCooler. ...	42
Tabla 8. Condiciones del flujo saliente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño múltiple en condiciones de laboratorio.	43
Tabla 9. Condiciones del flujo saliente de las medidas realizadas con el muro EcoCooler en diseño único en condiciones de laboratorio.	44