UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**“SISTEMA CONSTRUCTIVO:
PANEL PARA FACHADA VENTILADA CON MINI ALJIBE, PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO
PASIVO ESTACIONAL”**

TESIS DOCTORAL

DAVID PALOMAR AGUILAR
ARQUITECTO

2017

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

**“SISTEMA CONSTRUCTIVO:
PANEL PARA FACHADA VENTILADA CON MINI ALJIBE, PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO
PASIVO ESTACIONAL”**

TESIS DOCTORAL
(RD: 1393/2007)

Autor:
DAVID PALOMAR AGUILAR
ARQUITECTO

Directoras:
Dra. Consolación Ana Acha Román
Dra. Soledad García Morales

2017

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid,
el díadede 20.....

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el díade.....de
2017 , en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Agradecimientos:

A quienes me dieron la oportunidad de estudiar, trabajar...Y seguir estudiando.

Esta tesis no habría sido posible sin una serie de medios, lugares de trabajo, maquinas, instrumentos, y sobre todo personas. A los que me ayudaron y me siguen ayudando "a seguir nadando" en ese camino que jamás termina. Gracias por vuestra fe y sobre todo por vuestra paciencia. No sé si podré compensaros algún día. Espero que un planeta más habitable sea un buen comienzo.

Resumen:

La envolvente de la edificación es el principal elemento responsable del acondicionamiento térmico. La mejora de sus prestaciones reduce el consumo de los sistemas de climatización con repercusiones económicas y medioambientales.

El horizonte normativo que apunta hacia edificios de "energía casi nula" obliga a replantear tanto las estrategias de diseño como elementos constructivos empleados anteriormente y buscar soluciones que permitan alcanzar el confort con consumos energéticos prácticamente nulos.

Según el clima y el uso del edificio, la demanda de refrigeración puede igualar o superar a la de calefacción. Una de las estrategias tradicionales de refrigeración en climas cálidos y secos ha sido el enfriamiento evaporativo. Actualmente este principio sigue utilizándose, aunque la mayoría de sistemas para la generación de frío se basan en la compresión mecánica de gases nocivos para la atmósfera, con un mayor gasto eléctrico que los sistemas evaporativos.

Como conclusión del análisis medioambiental se señala el problema de la "*huella hídrica evaporativa*" que producen tanto las superficies urbanizadas como la gestión del agua y son co-responsables del cambio climático. Asimismo se explican los beneficios que tendría el uso generalizado de los sistemas evaporativos para el balance energético de la atmósfera y el calentamiento global.

En el capítulo del estado del arte se han estudiado los sistemas de envolvente que incorporan enfriamiento evaporativo tanto tradicionales como actuales, así como el tipo de ensayos realizados sobre los mismos, proponiendo la clasificación: "*fluyentes*" o "*con acumulación*" según retengan o no el agua. También se han analizado las ventajas e inconvenientes de cada sistema, concluyendo en un conjunto de características que debería de incluir un sistema ideal de fachada con enfriamiento evaporativo.

Tras el análisis de la tecnología existente se pone de manifiesto que la mayoría no han sido testados en exteriores en condiciones reales, con la interacción de factores tan relevantes como la radiación solar y que no existe ningún sistema que incluya todas las características deseables.

La Tesis investiga una solución constructiva de fachada ventilada que colabore en la refrigeración estacional del edificio y su entorno basado en el enfriamiento evaporativo, empleando fundamentalmente mortero de cal hidráulica. El panel propuesto se caracteriza por unos depósitos interconectados de paredes porosas en los que se produce la evaporación, protegidos de la radiación solar por unos canales verticales denominados alveolos a modo de fachada ventilada cuya hoja exterior, también de mortero de cal, presenta propiedades radiantes ideales como son una alta emisividad en el espectro infrarrojo y un albedo que refleja un gran porcentaje de la radiación solar. Estas soluciones, unidas a mecanismos basados en la adaptación de la naturaleza a climas cálidos, se combinaron en un panel que patenté en 2015. A pesar de ser un sistema pasivo, la patente presenta una gran complejidad con diferentes mecanismos que interactúan entre sí como la variación estacional de la tonalidad, la atenuación de la contaminación atmosférica, la vegetación del panel o la creación de patrones ópticos que repelen insectos, cuya demostración no era abarcable en una sola tesis doctoral. La necesidad de acotar la investigación me obligó a centrarme en el enfriamiento evaporativo, por ser el elemento fundamental del sistema de refrigeración. La tesis concluye con la fabricación de prototipos de mortero de cal, que son una simplificación de la geometría de la patente, sobre los que se demuestra la validez de las hipótesis planteadas.

El panel propuesto se ha validado mediante experimentos tanto en probetas simples como en prototipos a escala real, llevados a cabo en condiciones controladas así como en exteriores en sucesivas hipótesis de funcionamiento.

Se han registrado las temperaturas alcanzadas por las superficies de los prototipos, el aire en el interior y exterior de los alveolos, el agua de los depósitos, así como la tasa de descenso de su nivel por evaporación entre otros valores.

El flujo energético se ha calculado tanto por la potencia frigorífica del cambio de fase del agua como por la variación de entalpía del aire en los alveolos. Para conocer el funcionamiento del panel con todas las variables que implican las condiciones reales exteriores, se ha calculado la variación de densidad del aire y el empuje en el interior de los alveolos por medio de las relaciones psicrométricas del aire, permitiendo determinar con precisión la dirección del flujo de aire en función del tiempo. Finalmente se ha calculado la eficiencia evaporativa según los estándares formulados por otros autores.

Los resultados obtenidos señalan que la hoja exterior de mortero de cal reduce enormemente la influencia de la radiación solar. El mortero de cal hidráulica armado es un material viable para la elaboración de los depósitos de los paneles evaporativos por su permeabilidad al vapor y resistencia al agua. La potencia refrigerante ha alcanzado los 479 W/m² en condiciones exteriores estivales, reduciendo la temperatura de su cara interior hasta en 14 °C respecto a la del entorno.

La autonomía de los depósitos es de 3 días, pero el efecto refrigerante se prolonga 3 días más gracias a la inercia térmica y el agua embebida en la estructura porosa.

Los prototipos han demostrado una gran eficiencia de saturación tanto en condiciones reales estivales como en entornos controlados con una gran humedad relativa.

Abstract:

The building enclosure is the main element in thermal conditioning. Improving its performance reduces energy consumption of air conditioning systems with subsequent benefits to economy and environment.

The regulatory framework aimed to "nearly zero-energy buildings" forces to reconsider both current design strategies and construction details, searching for new solutions to achieve thermal comfort and almost zero consumption.

Depending on the climate and usage of the building, the cooling demand may reach and even overcome heating consumption. Evaporative cooling has been a traditional cooling system in hot dry climates for ages. This principle is still in use nowadays, although most systems for cold generation are based on the mechanical compression of harmful gases exhausted directly into the atmosphere and also boast higher power consumption than evaporative systems.

As a conclusion to the environmental analysis, the issues of the *"evaporative water footprint"* in urban areas and water management are both highlighted as co-responsible for climate change, reporting the potential benefits of the widespread use of evaporative cooling in the atmosphere's energy balance and in the fight against global warming.

Current and traditional systems of evaporative cooling enclosures and their testing are discussed in the state of the art chapter, suggesting the following classification: "flowing" or "accumulation" systems, according to water retention.

A set of features an ideal evaporative cooling façade should comprise has been proposed after considering the advantages and disadvantages of both systems.

A comprehensive analysis of the technologies available today has yielded the conclusion that most of them were not tested in real outdoor conditions, exposed to the effects of such relevant factors as solar radiation, and that there is no system available today comprising all desirable characteristics.

This thesis examines a ventilated façade constructive solution that collaborates in the seasonal refrigeration of the building and its environment, based on evaporative cooling using

essentially lime mortar. The proposed panel is comprised of small connected cisterns with pore walls where evaporation takes place. Those tanks are shaded by vertical ducts, called alveolus, working as ventilated façade whose external layer of lime mortar features ideal radiant properties, as high infrared emissivity and albedo, reflecting most of the solar radiation received.

These solutions, along with other mechanisms based on the adaptation of nature to hot climates, were combined into a panel patented in 2015. Whilst being a passive system, the patent boasts great complexity due to the interaction of diverse mechanisms, such as seasonal brightness variation, atmospheric depuration, panel vegetation or generation of optic patterns to repel insects pests, whose demonstration couldn't be grasped into one single thesis. The need to narrow the field of investigation forced to focus the thesis on evaporative cooling, as it was the main refrigeration system. This thesis concludes with the testing of lime mortar prototypes with a simplified patent geometry in order to validate the proposed hypotheses.

The proposed panel has been validated testing simple probes and real scale prototypes in both controlled and real outdoor conditions on different operating modes.

The temperatures reached in the prototype surface, alveolus and outdoor air and water cisterns were recorded, as well as the decrease ratio of evaporated water level, among other values.

The energy flow was calculated both with the cooling output of the water change-phase and the enthalpy variation on inner alveolus air. In the interest of determining the performance of the panel with all variables of outdoor real conditions, dense variation and thrust on inner alveolus air have been calculated by means of air psychrometrics relations, allowing to precisely establishing flow direction according to the time and weather conditions. Finally, evaporative performance has been calculated as stated by other authors' standards.

The obtained results underscore that a lime mortar external layer highly reduces the influence of solar radiation. Reinforced lime mortar is a viable material to manufacture an evaporative panel cistern, as it is permeable and water resistant. The cooling power reached 479 W/m^2 in summer outdoor conditions, reducing up to 14°C the total temperature between the internal layer and the outside.

The range of cisterns is 3 days, but the cooling effect extends 3 more days due to thermal inertia and the water soaked in pore cistern walls.

Prototypes have demonstrated high saturation efficiency in summer outdoor real conditions and in high relative humidity controlled environments.

ÍNDICE RESUMIDO:

- 1. JUSTIFICACIÓN**
- 2. ESTADO DEL ARTE**
- 3. OBJETIVOS**
- 4. HIPÓTESIS**
- 5. EXPERIMENTOS**
- 6. CONCLUSIONES**
- 7. FUTURAS INVESTIGACIONES**
- 8. ANEXOS**
- 9. BIBLIOGRAFÍA**

ÍNDICE COMPLETO:

JUSTIFICACIÓN

Justificación Normativa
Justificación económica
Justificación medioambiental
Conclusiones

ESTADO DEL ARTE

Transferencia de calor
Cámara ventilada
La cal
Dióxido de titanio
Fundamentos teóricos de la evaporación
Capilaridad
Psicrometría
Transferencia de masa
Sistemas de enfriamiento evaporativo
Presencia y riesgos de la *Legionella* en los sistemas evaporativos
Precedentes históricos del enfriamiento evaporativo
Enfriamiento evaporativo en la actualidad
Enfriamiento evaporativo en fachadas
Conclusiones parciales

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

Panel patentado: (ES 2588856 A1)

EXPERIMENTOS

Caracterización del mortero de cal empleado en los ensayos

EXPERIMENTOS CON PROBETAS

Experimento de la altura y velocidad de ascensión capilar alcanzadas por el agua en una probeta de mortero de cal de gran altura sometida a distintas condiciones de radiación y temperatura.

Experimento de germinación de semillas sobre probeta humectada de mortero de cal.

Experimento de la influencia de la geometría y tonalidad en la Temperatura superficial de probetas planas de mortero de cal bajo condiciones reales exteriores.

EXPERIMENTOS CON PROTOTIPOS

Demostración de la generación de una estela turbulenta con desplazamiento lateral sobre hoyuelo asimétrico con resalte.

Experimentos sobre prototipos de panel para fachada ventilada con mini aljibe, para enfriamiento evaporativo pasivo estacional.

Cálculo del intercambio conductivo en los prototipos de mortero de cal

Cálculo del intercambio convectivo en los prototipos de mortero de cal

Cálculo del intercambio radiante en los prototipos de mortero de cal

Comparativa de los mecanismos de transmisión de calor en los prototipos en modo evaporativo, según su orientación

Cálculo del calor sensible en los prototipos de mortero de cal

CONCLUSIONES

FUTURAS INVESTIGACIONES

ANEXOS

Sensores

Simbología empleada.

Tablas de datos

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO

JUSTIFICACIÓN

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

JUSTIFICACIÓN NORMATIVA:

Normativa de Edificios de energía casi nula

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA:

Ahorro energético

Fondos europeos para el desarrollo

JUSTIFICACIÓN MEDIOAMBIENTAL:

Termodinámica de la atmósfera

Efecto de los gases refrigerantes en la atmósfera

Influencia del agua en el clima

Influencia de la vegetación en la temperatura

Influencia de la urbanización en la temperatura

Consecuencias del aumento de las temperaturas

Huella hídrica:

- Influencia de los núcleos urbanos en las precipitaciones
- Tiempo de residencia
- La importancia del ciclo corto del agua

Madrid como ejemplo de clima antropizado:

Datos climáticos

- Medición de la Evaporación en Madrid
- Precipitaciones

Estanques de tormenta

Estimación de la huella hídrica y el potencial evaporativo de la ciudad de Madrid

CONCLUSIONES

JUSTIFICACIÓN

JUSTIFICACIÓN NORMATIVA:

Normativa de Edificios de energía casi nula:

La directiva: 2010/31UE, entró en vigor mediante la Orden FOM/1635/2013 del 10 de septiembre. Supone un salto cuantitativo en las exigencias de eficiencia energética al establecer la obligatoriedad de un **“consumo casi nulo”** a partir de 2018 para los edificios públicos de nueva construcción y para 2020 para el resto.

El texto define: *«Edificio de consumo de energía casi nulo»: Edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto, que se determinará de conformidad con el anexo I. La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno».*

Para satisfacer esta ambiciosa medida los edificios deberán de ser concebidos desde sus inicios bajo criterios de eficiencia energética; lo que supone un cambio respecto a los diseños generalistas anteriores.

JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA:

Ahorro energético:

El enfriamiento evaporativo es el medio más económico de enfriar un edificio (SCHMIDT 2006). Los estudios que han tratado de establecer una rentabilidad a las medidas medioambientales han sido numerosos; tanto por ONG defensoras del medio ambiente como Greenpeace o WWF, como por consultoras y bancos: (Banco de desarrollo alemán KfW 2011) o el Informe McKinsey (McKINSEY & COMPANY 2007), que sitúa la mejora de la eficiencia energética en la edificación como una de las medias más rentables. El enfoque macroeconómico es tan amplio como complejo. Debe contemplar el balance entre inversión inicial y ahorro a largo plazo; pero al mismo tiempo la recaudación vía impuestos derivada de nuevos puestos de trabajo, la reducción en la importación de combustibles fósiles como gas y petróleo de la que Europa es deficitaria y las consecuencias económicas derivadas de fenómenos climáticos como sequías, inundaciones, plagas, temperaturas extremas etc. (GUTIERREZ et al 2012).

Fondos europeos para el desarrollo:

Con el objetivo de cumplir el *“horizonte 2020”* la Unión europea estima una inversión de 100 billones € al año, dedicando cerca de 6.000 millones en energías sostenibles y 3.000 en acciones climáticas y medioambientales. (UE 2014).

Mediante distintos programas de financiación: Project Development Assistance (PDA), Fondo Europeo de Eficiencia Energética Europea (EEEF), Fondo JESSICA-F.I.D.A.E., Private Financing for Energy Efficiency instrument, (PF4EE), European Structural & Investment Funds (ESIF), Fondo europeo de desarrollo regional (FEDER), se apoya la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en los países miembros a las que podría acceder un proyecto de eficiencia energética.

JUSTIFICACIÓN MEDIOAMBIENTAL:

Termodinámica de la atmósfera:

La intensidad de la radiación que incide en la atmósfera se conoce como *constante solar*: 1.395W/m^2 aunque sufre variaciones de $\pm 3,5\%$ por la órbita elíptica de la tierra y $\pm 2\%$ por las variaciones de la energía emitida del sol. (KOENIGSBERGER et al. 1997).

El Forzamiento radiativo (FR) mide la variación de la irradiancia media a nivel de la tropopausa. (ganancia solar menos pérdida terrestre) Se estima que la alteración antropogénica acumulada

es de $+2,6 \pm 0,3 \text{ W/m}^2$, de los cuales 1,7 corresponden al CO_2 , 0,48 al CH_4 y 0,32 a los CFC. (MARTÍNEZ 2010).

Efecto de los gases refrigerantes en la atmósfera:

Los sistemas de refrigeración por compresión mecánica funcionan mediante gases que contaminan la atmósfera (SANTAMORIS et al. 1996).

Los gases refrigerantes más utilizados previamente al reglamento (CE) 2037/2000 eran los clorofluorocarburos (CFC) y hidroclorofluorocarbonos (HCFC), considerados sustancias agotadoras de la capa de ozono (SAO). El daño creado por estos gases se inicia cuando los rayos UV rompen las moléculas de estos compuestos, liberando radicales libres de cloro, flúor y bromo que pueden persistir en la troposfera destruyendo moléculas de ozono durante un siglo (PNUMA 2010). Se estima que una molécula de cloro puede destruir 100.000 moléculas de O_3 (BAIRD 1995). El protocolo de Montreal ha sido un éxito de colaboración internacional para la limitación y prohibición de las SAO como corroboran los informes de los satélites equipados con OMI (Ozone Monitoring Instrument). Aun así. El agujero en la capa de ozono tardará décadas en desaparecer.

El cumplimiento de los acuerdos internacionales ha producido una transformación de la industria. En sustitución de los CFC y HCFC, se emplean perfluorocarbonos (PFC) y hidrofluorocarbonos (HFC) que por su menor reactividad o persistencia en la atmósfera son menos dañinos para la capa de ozono, pero son gases de efecto invernadero (GEI) tanto o más potentes que los que sustituyen. Un ejemplo sería el R22: (Clorodifluorometano) un gas refrigerante que aun podemos encontrar en equipos de AC. Pertenece al grupo de los HCFCs (Hidroclorofluorocarbonos). Según (CE) nº 1005/2009: Sólo se permitía hasta 2015 para recarga de equipos existentes. Algunos de estos gases pueden ser sustituido sin necesidad de realizar modificaciones en los aparatos. Así el R22 puede ser sustituido por el R-410A (un HFC) pero su índice de efecto invernadero es 1725 veces mayor que el CO_2 .

El índice de efecto invernadero recibe las siglas PCA (Potencial de calentamiento atmosférico) o GWP del inglés (*Global Warming Potential*).

La siguiente tabla sirve de ejemplo para comparar algunos de los gases empleados en equipos de refrigeración:

Gas	GWP	Tóxico ^(†)	Inflamable	Puede sustituir
R717 (amoníaco NH_3)	0	Si	bajo	R22, R134a
R744 (CO_2)	1	No	No	(*) R134a, R404A, R22
R134a (Tetrafluoroetano CH_2FCF_3)	1,83	No	No	R22, R12 (diclorodifluorometano)
R290 (propano C_3H_8)	3	No	Si	R22, R502
R170 (Etano C_2H_6)	3	No	Si	(*) R23, R508B
Metano (CH_4)	21	No	Si	
Óxido nitroso (N_2O)	310	No	Si	
HFCs (hidrofluorocarburos)	140-11.700	No	bajo	
PFCs (Perfluorocarbono)	6.500-9.200	No	No	
SF_6 (Hexafluoruro de azufre)	23.900			

(†) Simplificación que dependería de la concentración.

(*)No adecuado para sistemas de fluorocarburo existentes.

Datos: "British refrigerant Association. Guide to Flammable Refrigerants. Nº 1. (2012)". "Natural refrigerants overview brochure <www.linde-gas.com/refrigerants>" y "Guía de edificación ambientalmente sostenible en edificios comerciales en la comunidad autónoma del país vasco. (2009)". Según esta última, GWP debería ser < 5.

El Protocolo de Kyoto limita los GEI que contribuyen al calentamiento de la atmósfera y en consecuencia a la alteración de precipitaciones, desertización, merma de la producción agrícola, desplazamiento o extinción de especies (JUMP 2016),(VICENTE-SERRANO 2010) y aumento del nivel del mar por deshielo.

Influencia del agua en el clima:

Balance de energía global sobre la Tierra por cada 100 unidades de radiación solar entrante. Redibujado según datos (IRIBARNE et al. 1981),(KAHAN 2004).

El agua tiene una relevancia fundamental en la regulación térmica del planeta. La reducción de la evaporación a escala global es la causa más importante del cambio climático según algunos expertos (KRAVCÍK et al.2007) y está relacionada con la urbanización, la gestión del agua y la reducción de la vegetación (SCHMIDT 2006) . Alrededor de un cuarto de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se transforma en calor latente en aquellas zonas que disponen de agua, vegetación o suelos húmedos, (IRIBARNE et al. 1981),(KAHAN 2004),(HERRERO et al.2009). Mientras que en zonas áridas o pavimentadas, se transforma en calor sensible en una proporción mucho mayor.

El aire húmedo tiene menor densidad que el seco. A medida que asciende recibe menos calor por convección y radiación infrarroja de la superficie terrestre y cede energía, no por contacto con el aire frío de las capas superiores, puesto que la difusividad es muy pequeña, sino por radiar energía al espacio que está a 2,7K (MARTÍNEZ 2001) y producirse un enfriamiento adiabático por expansión debido a la disminución de presión.

El contenido de humedad en la atmósfera decrece exponencialmente con la altura. El 50% del vapor de agua se encuentra en los primeros 1.500 m sobre el nivel del mar. El 90% por debajo de 5.600 m. Si bien el vapor de agua contribuye al efecto invernadero, hay que señalar que las nubes están formadas por pequeñas gotas de agua o cristales de hielo, puesto que el vapor de agua es invisible como el oxígeno del aire. Las nubes cubren aproximadamente el 50% de la superficie terrestre, sombreándola en la cara iluminada. Esta reducción de radiación solar disminuye la evaporación y la formación de mas nubes. El agua atmosférica, pese representar

solo el 0,3% de la masa total, es el factor determinante de la dinámica atmosférica por los grandes flujos energéticos que acompañan los cambios de fase. La energía absorbida del sol tiende a distribuirse por convección, siendo algo mayor la circulación atmosférica que la oceánica.

Las precipitaciones son mayores en zonas vegetadas, donde la evapotranspiración contribuye con hasta el 50% del contenido de agua en el aire. (MARTÍNEZ 2010).

Influencia de la vegetación en la temperatura:

La temperatura superficial del suelo está influenciada por la presencia de agua y la cantidad de biomasa existente. En periodos soleados la evapotranspiración se produce desde el suelo. En zonas que cuenten con una cubierta vegetal, se añade la que se produce a través de los estomas de las hojas. El albedo de las mismas y la convección, devuelven parte de la radiación hacia la atmósfera. La cubierta vegetal retiene cierta cantidad de agua de lluvia, incrementando la superficie de contacto con el aire y aumentando la evaporación, con el consiguiente flujo de energía latente. (HARGREAVES 2003). El modelo de Parton (PARTON et al.1981): permite estimar la T^a máxima que alcanza el suelo en función de la temperatura del aire y la biomasa presente.

La influencia de la cubierta vegetal sobre la energía latente del agua de lluvia viene definida por la siguiente expresión:

$$\frac{dw}{dt} = P - E - D \text{ (HERRERO et al. 2009).}$$

Esquema del balance de agua en la cubierta vegetal.

Donde:

w : es el volumen de agua almacenado por unidad de superficie en el dosel vegetal,

P : es el flujo de precipitación incidente

E : es el flujo de evaporación de agua interceptada

D : es el flujo de agua que drena a través de la cubierta.

Además del agua que la lluvia o el rocío se pueda depositar en su superficie, la actividad metabólica de la vegetación es capaz de evaporar gran cantidad de agua a través de sus hojas que la misma planta se encarga de captar a través de su sistema radicular. Un árbol es capaz de evaporar 500kg de agua al año por cada m² superficie exterior, lo que equivale a 40W/m² de superficie vegetal. (NEILA et al. 1997).

Influencia de la urbanización en la temperatura:

El premio nobel de química, Paul Crutzen acuñó en 2000 el término "Antropoceno" para expresar el alcance de la influencia del hombre sobre el clima terrestre.

En la medida en la que se impermeabiliza el suelo mediante una urbanización sin criterios de sostenibilidad se reduce la retención, y evaporación del agua, el terreno no se ve infiltrado en las sucesivas capas y no se recargan los acuíferos, redundando todo ello en una menor evaporación, reducción de las futuras precipitaciones y aumento de la temperatura.

En un volumen mucho menor, los equipos de aire acondicionado por compresión mecánica condensan vapor de agua. Este agua suele ser vertida a la red de alcantarillado, impidiendo su evaporación y sumándose a la alteración energética de origen urbano.

Consecuencias del aumento de las temperaturas:

Un aumento de la T^a de la tierra generaría mayor evaporación, pero disminuiría la capacidad de las masas de agua de disolver gases como el O_2 , con consecuencias mortales para la fauna, especialmente el plancton. La emisión de los gases de su putrefacción aumentarían el efecto invernadero. Asimismo se liberaría CO_2 en mayor proporción (el 99% del total se encuentra en los océanos) (MARTÍNEZ 2010).

A nivel urbano:

La temperatura máxima potencial de una ciudad es directamente proporcional a su población y puede estimarse mediante la expresión: $(^{\circ}C) = 2,01 \times \log \text{población} - 4,06$ (OKE, 1973). Lo que puede llevar a que la isla de calor urbana alcance valores máximos de entre 4 y 10 $^{\circ}C$ superiores a los de su entorno (OKE, 2006).

Aplicado a una población de 5 millones de habitantes como la ciudad de Madrid, la isla de calor urbana máxima estaría en torno a los 9 $^{\circ}C$.

El subsuelo también se sobrecalienta, aportando una inercia térmica trans-estacional que reduce los costes de calefacción en invierno, pero incrementándolos en verano.

Las temperaturas elevadas dificultan el sueño, mermando la productividad de la población activa y aun más grave, repercuten de manera significativa en las tasas de mortalidad entre la población de mayor edad (HU, BECKER, McMICHAEL y TONG 2007).

Huella hídrica:

Según la definición realizada por la UNESCO se trata de: *"El volumen total de agua dulce que se utiliza para producir bienes y servicios de un individuo, de una comunidad o de una empresa"*. (HOEKSTRA 2003).

Entendiendo la ciudad como una comunidad con todas las actividades que en ella se desarrollan, este capítulo quiere llamar la atención sobre la huella hídrica ligada al déficit evaporativo que producen las superficies pavimentadas respecto al mismo territorio en estado virgen. Este factor podría definirse como *huella hídrica evaporativa*.

Influencia de los núcleos urbanos en las precipitaciones:

Existen una serie de efectos climáticos claramente contrapuestos en los que las ciudades alteran la hidrología de un territorio: Un primer grupo favorece el aumento de las precipitaciones: la contaminación (SO_2 y NO) y el relieve de los edificios desvían los vientos, forzando su ascensión y aumentando las precipitaciones en torno 5-10% (KOENIGSBERGER et al. 1997).

El relieve de los edificios disminuye la velocidad del viento en el interior de la ciudad, limitando la renovación del aire (SHARIFI, LEHMANN 2014).

La isla de calor urbana y el relieve de los edificios produce corrientes ascendentes. Estas elevan los vientos húmedos que circulan sobre la ciudad. La disminución de presión produce su expansión y enfriamiento, aumentando la condensación. La presencia de partículas contaminantes incrementa la precipitación al actuar como núcleos de condensación.

Los aerosoles presentes en la atmósfera, ya sean de origen natural o artificial tienen un gran efecto en las precipitaciones (ALADRO 2013). El plomo de la gasolina (prohibido en España desde 2001 debido a su toxicidad a través de la Directiva 98/70/CE) ha estado generando una de las partículas responsables de la formación de núcleos de condensación (LÓPEZ et al. 1993). Entre los factores que reducen las precipitaciones están: El aumento de las temperaturas con especial incidencia en zonas semi-áridas (MORENO et al. 2005), y la reducción de la evaporación local: Aunque volumen de agua evaporada en los océanos sea la mayor a escala planetaria, **es la evaporación del terreno la que aporta entre el 50 al 65% de las precipitaciones sobre ese mismo territorio** (KRAVCIK 2007) y se conoce como el **ciclo corto del agua**.

La condensación de las nubes representa la mayor pérdida de energía del planeta hacia el espacio. (SCHMIDT 2006).

Ciclo hidrológico con balance de agua promedio global por cada 100 unidades de precipitación terrestre. (CHOW 1994), (KAHAN 2004), (KRAVCIK 2007).

Tiempo de residencia:

Es el tiempo promedio que una molécula o aerosol permanece en un medio en equilibrio.

Se calcula a partir de la velocidad de entrada y salida del medio.

Los periodos más largos corresponden a las aguas almacenadas en el subsuelo profundo, su periodo de residencia puede alcanzar los 10.000 años, por ello se conocen como aguas fósiles. aunque abundantes, su capacidad de renovación es escasa.

Los océanos tienen un tiempo de residencia superior a 3.000 años, los ríos de 15 a 20 días. y la atmósfera de tan solo 8 a 10 días. (L'VOVITCH 1967), (NOCE 1969), (CAMPOS 1998).

La importancia del ciclo corto del agua:

En un territorio virgen el suelo presenta una capacidad de absorber y transpirar el agua de las capas superiores. La presencia de vegetación multiplica exponencialmente la superficie en la que las gotas de lluvia pueden quedar retenidas en contacto con la atmósfera (HERRERO et al. 2009). En la medida en la que este agua se emplea en la agricultura, cierto porcentaje puede regresar al ciclo corto (KRAVCIK 2007).

Con la impermeabilización del suelo y la canalización de las aguas a través de colectores, esta capacidad se reduce enormemente. Las medidas correctoras pasan por pavimentos porosos que permitan la retención y evaporación. (GÖBEL et al. 2008).

En la medida en que se impide la evaporación mediante la deforestación, urbanización y encauzado de la escorrentía superficial, se extreman las temperaturas y alteran los patrones de precipitación. Las lluvias disminuyen en las planicies y aumentan en las montañas, donde la erosión es mayor. También se espacian en el tiempo aumentando la gravedad de las inundaciones. (KRAVCIK 2007).

Se estima en 20 billones de m³ agua de lluvia que acaba en el alcantarillado de los municipios Europeos (KRAVCIK 2008) Esta escorrentía arrastra y concentra la suciedad y una vez canalizada, apenas tiene oportunidad de evaporarse.

El calentamiento global y la isla de calor urbana tienen el misma causa: la reducción de vegetación y evaporación (SCHMIDT 2006).

La repercusión energética ligada a la alteración del ciclo del agua resulta sumamente compleja de calcular con precisión, pero podría estimarse, siempre para una localidad concreta, considerando dos factores: Por un lado la reducción de la evaporación en la superficie urbanizada vinculada a unas superficies mayoritariamente impermeables. Y a nivel regional, las consecuencias de la canalización del agua.

El tamaño y la tipología constructiva también influyen. La construcción tradicional emplea superficies porosas como tejas y ladrillos cerámicos con mayor proporción, lo que permite la absorción y evaporación de cierto porcentaje de lluvia. (SANTOS 2014) Realiza ensayos sobre distintos acabados comunes en los edificios y propone los materiales porosos como vía para mejorar el microclima urbano.

Madrid como ejemplo de clima antropizado:

La climatología constituye uno de los fenómenos físicos más complejos de analizar, si bien, responde a patrones muy homogéneos bajo periodos de tiempo suficientemente amplios. Por tanto es razonable asegurar que cuando la antropización de un lugar es la única variable, las alteraciones de los valores climáticos medios en un periodo suficientemente amplio son atribuibles a ese factor.

Fig. Mapa de isotermas reales registradas en Madrid 11-7-1985 (LOPEZ et al. 1993).

El efecto "Isla de calor" que encontramos en muchas ciudades ha sido ampliamente estudiado (LOPEZ et al. 1993). (PACHECO-TORGAL et al. 2015). y es irrefutable por su facilidad de monitorización y la inmediatez causa-efecto. Sin embargo es más complicado establecer la misma relación con la carestía de agua a la que se enfrenta la capital. Dejando al margen el aumento de la población, se estudia el déficit de precipitaciones en la cuenca que abastece Madrid.

Datos climáticos:

Medición de la Evaporación en Madrid:

La evaporación registra el descenso del nivel de agua en (mm) en un depósito de referencia, por lo tanto no significa un aumento en la humedad ambiental sino la combinación de temperatura, humedad atmosférica y radiación solar para favorecer la evaporación.

Tomando una muestra de los últimos 26 años, podemos apreciar la divergencia entre las tendencias de evaporación media anual y de la humedad relativa.

Evaporación media anual (Madrid) 1988-2014. Elaboración propia a partir de datos AEMET de la estación Madrid-Retiro.

Humedad relativa media anual (Madrid) 1988-2014. Elaboración propia a partir de datos AEMET de la estación Madrid-Retiro.

Precipitaciones:

El calentamiento global produce un aumento del nivel y temperatura de los océanos que implica una mayor evaporación. Sin embargo esto no ha supuesto una mayor precipitación: Los recursos hídricos a nivel nacional se han reducido cerca del 4% en los últimos 10 años. (CHT 2014). El aporte de agua a los embalses tiene gran interés para conocer las precipitaciones y su evolución a nivel regional. Si consultamos las aportaciones medias naturales de los ríos a los embalses en la Comunidad de Madrid donde la presión urbana es proporcionalmente mayor, estas se han reducido hasta un 20% en los últimos 20 años hidrológicos (1992/1993-2012/2013) respecto a la serie histórica de los últimos 99 años (desde 1914) (CYII 2012).

Periodo	1914-2013	1993-2013	Tendencia
aportación natural ríos CAM (en hm ³ /año.)	767,6	613,4	↓ 20,1%

Datos: (CYII 2012).

Como la mayoría de localidades, Madrid se abastece de recursos situados más allá de su término municipal, constituye una singularidad a nivel europeo por el pequeño tamaño de sus ríos y su lejanía de la costa (CHT 2011), el 50% del agua embalsada es canalizada para consumo Urbano (BENLLIURE 2004).

	Periodo		
Precipitación mensual media (en mm)	1961-1990	1981-2010	Tendencia
Madrid-Retiro.	456	420,9	↓ 8%
Madrid-Aeropuerto	412	370,8	↓10%

Datos: *Guía resumida del clima en España*.

Observamos una tendencia a la baja. La capacidad de evaporación media aumenta y sin embargo, la humedad y precipitaciones descienden. La causa más probable es que hay menos agua que pueda ser evaporada. Atendiendo a los datos de (CHOW 1994), (KAHAN 2004), (KRAVCIK 2007); el carácter cíclico del sistema da lugar a déficits cada año mayores. Mientras que el impacto en el ciclo largo del agua es insignificante, no así el del ciclo corto.

La comparativa con la estación periférica del aeropuerto confirma las observaciones citadas por (LÓPEZ et al. 1993). Con precipitaciones superiores en los centros urbanos. En el modelo de "ciudad impermeable" actual, debe interpretarse como un agravante del problema, puesto que la rápida conducción al alcantarillado, sin posibilidad de evaporación, retira un mayor porcentaje de agua del ciclo corto y previsiblemente aumentará la sequía a sotavento del núcleo urbano.

Estanques de tormenta:

Los estanques de tormenta de la ciudad son depósitos impermeables, generalmente subterráneos que retienen el agua recogida de la escorrentía superficial para bombearlas lentamente hacia las EDAR, evitando que la contaminación llegue al río. Sus ventajas para la calidad del agua y el medio ambiente son incuestionables, pero del modo en que operan contribuye a aumentar el déficit evaporativo de las ciudades y sus consecuencias climáticas. Para revertir este proceso sería necesario evaporar la misma cantidad de agua que el territorio en estado virgen.

Estanque de Tormentas de Butarque (Madrid). Fuente: <http://www.iagua.es>

Actuaciones del Plan de infraestructuras para la calidad de las aguas del río manzanares. Volumen total de los estanques: 1.221.946m³ Fuente: Área de gobierno y medio ambiente y servicios a la ciudad. Ayuntamiento de Madrid.

Estimación de la huella hídrica y el potencial evaporativo de la ciudad de Madrid:

En este apartado se realiza una estimación del volumen de agua que una ciudad es capaz de retirar del ciclo corto y su potencial evaporativo. Al ser la evaporación un proceso endotérmico, debe entenderse como energía disponible para el enfriamiento de la edificación, pero también como un enfriamiento global si esta práctica tuviera escala mundial.

Para el cálculo se considera exclusivamente el agua que llega a los EDAR. Este volumen comprende tanto las aguas residuales como las pluviales recogidas por el sistema de alcantarillado.

El agua depurada por las estaciones de de la capital en el periodo 2010-2012 fue de 528,43 M. m³/año (CYII 2012). Descontando el agua reciclada para el riego de parques y jardines, que puede regresar al ciclo corto por evaporación, supondría más de **500 M. m³/año** desviados del medio natural.

Del total que acaba en las alcantarillas, descontando 171 M. m³/año (CHT 2014) para garantizar el caudal del manzanares, tendríamos 329 M. m³/año. De evaporarse, reducirían el calor sensible de la ciudad a razón de 2.424 J/g de agua evaporada (NEILA 2004), con una energía de $7,97496 \cdot 10^{17}$ J/año = $25,288 \cdot 10^9$ W **equivalente a la potencia de 23 centrales nucleares** como la de Cofares (producción: 1,104GW) .

Aplicando esta medida en el periodo cálido del año definido por la máscara de sombra de la localidad, se reduciría la demanda de refrigeración de los edificios y se mejoraría el confort a nivel urbano. A nivel socioeconómico podría esperarse un aumento de la actividad en las horas centrales del día, una reducción del horario y el aumento de la productividad.

CONCLUSIONES:

Las emisiones de gases relacionados con la industria refrigerante suponen un volumen pequeño, pero su alto PCA merece la investigación de alternativas más respetuosas con el medio ambiente que no agraven el calentamiento global.

Los materiales empleados como acabados urbanos actúan como acumuladores de energía, provocan el efecto de isla de calor. Son mas impermeables; dando lugar a una rápida escorrentía superficial, una menor evaporación y la alteración del balance energético natural, tanto de calor sensible como latente.

La contaminación y morfología de las ciudades pueden ser responsables de un aumento local de las precipitaciones en determinados casos, pero la impermeabilización del suelo y los sistemas urbanos de gestión del agua actuales crean un "déficit evaporativo" que retira del ciclo corto porcentajes muy importantes de las precipitaciones. Reducen la humedad relativa en el interior de las ciudades y podrían ser una de las causas de la alteración climática y la escasez de recursos hídricos a sotavento.

El volumen de agua vertida al alcantarillado urbano tiene un potencial de enfriamiento que supera la demanda energética. Evaporar de manera sistemática el agua antropizada colaboraría significativamente en revertir el calentamiento global del planeta.

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

TRANSFERENCIA DE CALOR

Introducción

Transmisión de calor por conducción:

Cálculo del coeficiente de transmisión térmica:
Resistencia térmica:
Coeficiente útil de transmisión de calor U_u :
Transmisión de calor en superficies expuestas a la radiación solar:
Temperatura sol-aire:

Convección natural y movimiento de fluidos:

Propiedades de los fluidos:

Viscosidad dinámica y cinemática
Velocidad del fluido

Régimen laminar:

Capa límite superficial

Régimen turbulento:

Desprendimiento de capa límite

Flujo interno:

Movimiento de un fluido en el interior de un conducto:

Ley de *Hagen-Poiseuille*.
Diámetro equivalente:
"Axial Groove" Surcos Axiales.

Longitud de entrada para el flujo interno

Convección natural

Relación general (Convección)
Planos y tubos

Número de Nusselt

Nº de Reynolds

Nº de Grasshof

Nº Prandtl

Nº de Rayleigh

Nº de Sherwood

Número de Biot

Ecuación de Bernoulli sobre la conservación de la energía

La radiación:

Direccionalidad de la radiación:
Emisividad
Albedo

Transmisión de calor por radiación:

Cálculo de la transmisión de calor por radiación:
Radiación entre dos superficies:
Factor de forma:

Radiación solar:

Radiación de onda corta:

Radiación de onda larga:

Materiales selectivos:

Intercambio radiante en fachadas:

Temperatura del cielo:

Cámara termográfica:

CÁMARA VENTILADA

Espesor óptimo de la cámara:
Aislamiento en la hoja exterior:

LA CAL

Cal en la construcción:

Las cales aéreas:

Cales con propiedades hidráulicas:

Las cales hidráulicas
Cales hidráulicas naturales
Cales formuladas

Sostenibilidad del la cal:

GeoSilex®

Morteros de cal:

Resistencia
Higroscopicidad de los morteros
Transporte de humedad y calor

Cargas que podrían mejorar las cualidades deseables en los paneles propuestos:

Resistencia a las heladas
Normativa sobre aditivos
Reducción de la conductividad

Propiedades radiantes de la cal

Efectos de la contaminación

DIÓXIDO DE TITANIO

Introducción
Características generales
Propiedades y aplicaciones del dióxido de titanio en la arquitectura
Adición de TiO_2 en morteros de cal

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA EVAPORACIÓN

Calor Específico
Calor Latente
Ebullición y vaporización
Principio físico del enfriamiento evaporativo
Tensión superficial
Evaporación sobre superficies horizontales y verticales

CAPILARIDAD

Adherencia:

Capilaridad:

Ley de Jurín:
Ley de Thompson:

Influencia de la temperatura en el rendimiento de los paneles evaporativos:

Variación de la densidad:
Variación de la viscosidad:

PSICROMETRÍA

Temperatura de bulbo seco
Presión sobre el nivel del mar

Ley de los gases ideales
Composición del aire
Ley de Gibbs-Dalton
Contenido de humedad
Aire seco
Aire saturado
Humedad específica
Humedad absoluta
Humedad de saturación
Grado de saturación
Humedad relativa
Presión parcial de vapor
Presión de saturación de aire húmedo
Temperatura de bulbo seco
Temperatura termodinámica de bulbo húmedo
Volumen específico del aire húmedo
Densidad del aire húmedo
Punto de rocío
Entalpía del aire húmedo
Entalpía del agua líquida

TRANSFERENCIA DE MASA

Transferencia de masa por difusión

Ley de Fick
Difusión de un gas a través de otro en reposo
Difusión del vapor de agua a través de un medio poroso
Difusión del agua líquida a través de un medio poroso
Flujo de humedad en estado líquido y gaseoso a través de un material higroscópico
Permeancia al vapor de agua
Coeficiente de difusión al vapor de agua

Transferencia de masa por convección:

Movimiento del aire
Difusión del vapor

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Enfriamiento por evaporación mecánica

Enfriamiento por evaporación adiabática

Enfriamiento evaporativo directo

Enfriamiento evaporativo indirecto

Eficiencia del sistema:

Flujo de calor sensible o "*potencia sensible*"
Flujo de calor latente o "*potencia latente*"
Flujo de calor total recuperado o potencia total

PRESENCIA Y RIESGOS DE LA *LEGIONELLA* EN LOS SISTEMAS EVAPORATIVOS

PRECEDENTES HISTÓRICOS DEL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN LA ACTUALIDAD

"*Pot-in-pot*"

Hidroenfriadoras

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN FACHADAS

Clasificación de los sistemas de enfriamiento evaporativo

Precedentes:

Fluyentes Directos:

- "A passive evaporative cooling system by natural ventilation"
- Pabellón de Holanda. MVRDV. Expo de Hannover
- "SGMs: Soportes generadores de microclimas". Expo de Zaragoza.
- "Cool Brick"

Fluyentes Indirectos:

- "Pared de agua". Expo de Sevilla
- "Geomoss", "Atlas House". ETSA UPV. Solar decathlon.
- "Fachada ventilada con sistema de enfriamiento evaporativo"
- "Casa Patio" 2.12 Andalucía Team. Solar decathlon.
- "Sistema Kaikaku"

Acumulación directos:

- "Evapcool" WSP ENVIRONMENTAL LTD, Universidad de Nottingham.
- "Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application"
- "Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler".
- "REC: Refrigerador evaporativo cerámico" Universidad de Valladolid
- "PECW: Passive evaporative cooling wall"
- "Ecooler"
- "Experimental and Numerical Study of a Heat Pipe Based Indirect Porous Ceramic Evaporative Cooler"
- "Cold Spot"

Acumulación Indirectos:

- "Gres-Bot. Cerámica bioclimática"
- "Cerramiento térmico industrializado de fácil montaje" Universidad de Alicante
- "Placa Cerámica Evapotranspiradora para Edificios en Climas Cálidos" Universidad de Sevilla
- "Aislater"
- "Hidrocerámica"

CONCLUSIONES PARCIALES

Limitaciones detectadas

Características deseables

ESTADO DEL ARTE:

TRANSFERENCIA DE CALOR

Introducción:

Existen tres formas de transmisión de calor:

Conducción:

Cada molécula vibra con una intensidad proporcional a su energía calórica. En el caso de que una molécula adyacente tenga un estado de excitación distinto, se producirá un intercambio de energía durante los choques intermoleculares hasta alcanzar el equilibrio.

Convección:

Es el intercambio de energía a través de fluidos en movimiento. Este movimiento puede ser mecánico (*convección forzada*) o bien espontáneo, como consecuencia de la diferencia de densidades producidas por el aporte de energía (*convección libre o natural*).

Radiación:

Se trata de una radiación electromagnética producida por la superficie de los cuerpos como consecuencia de la vibración de sus moléculas y tiene lugar incluso a través del vacío.

Este intercambio de energía depende del material y la temperatura a la que se encuentre.

Transmisión de calor por conducción:

Cálculo del coeficiente de transmisión térmica:

La metodología para el cálculo del coeficiente de transmisión térmica U en la edificación, viene determinada por la UNE-EN ISO 6946:2012, en base a la conductividad de cada una de las capas que componen el cerramiento así como su espesor.

Resistencia térmica:

El Código Técnico de la Edificación, DB-HE Ahorro de energía, aplicable a los cerramientos opacos, establece los parámetros característicos de la envolvente:

La transmitancia térmica U ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) siendo:

$$U = \frac{1}{R_t}$$

donde:

R_t : Resistencia térmica del conjunto del cerramiento ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$).

Si el elemento está constituido por varias capas homogéneas térmicamente, la resistencia total es la suma de las resistencias de cada capa:

$$R_t = R_i + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_e$$

donde:

$R_1, R_2, \dots, R_n$ Son las resistencias de las sucesivas capas ($\text{m}^2\text{K}/\text{W}$).

R_i, R_e Son las resistencias térmicas superficiales del aire con el interior y exterior respectivamente. Como la diferencia de temperatura del cerramiento con el exterior es siempre mucho mayor, también lo es el valor R_e . En el caso de un cerramiento vertical:

$$R_i = 0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

$$R_e = 0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$$

El flujo de energía es perpendicular a la superficie de los elementos considerados. La dirección del mismo no afecta al valor absoluto de los cálculos, pero por coherencia con la hipótesis de un cerramiento que proteja del calor estival, el flujo se producirá del exterior al interior.

Coeficiente útil de transmisión de calor U_u :

Cuando tenemos secciones heterogéneas, emplearemos el *coeficiente útil de transmisión* U_u para el cálculo de la conducción del conjunto, este viene dado por la expresión:

$$U_u = \frac{\sum U \cdot A}{\sum A}$$

Donde:

A: son las distintas superficies que conforman la pieza.

La cantidad de calor que atraviesa un cerramiento viene definida por la expresión:

$$Q=S \cdot U \cdot \Delta T$$

Donde

Q es la cantidad de calor en (J).

S es la superficie en (m^2).

U es la transmitancia térmica del cerramiento en ($W/m^2 \cdot K$).

ΔT es el gradiente térmico entre ambas caras del cerramiento: (T_1-T_0) en (K).

Transmisión de calor en superficies expuestas a la radiación solar:

En climas cálidos, el flujo de calor se ve incrementado por la acción de la radiación solar incidente. Para incorporarla en el cálculo de ganancias a través de un cerramiento se recurra a dos conceptos:

Temperatura sol-aire:

Es un valor analítico que se define como: "Temperatura del ambiente exterior, que en ausencia de todo intercambio por radiación, proporciona un valor de la cantidad de calor que penetra a través de una superficie, igual que con la combinación de los efectos de la T^a exterior, de la radiación solar incidente, de la radiación solar intercambiada con el cielo y de las superficies circundantes y de la convección con el aire exterior". (NEILA 2004)

Diferencia de temperatura equivalente (ΔT_{eq}):

Al gradiente térmico existente entre las T^a exterior e interior (T_e-T_i) se añade otro (ΔT), de carácter empírico, que provocaría el mismo flujo a través del cerramiento que la combinación de, radiación solar, desfase de onda térmica y amortiguación.

$$\Delta T_{eq}=(T_e-T_i)+ \Delta T$$

Convección natural y movimiento de fluidos:

Propiedades de los fluidos:

Viscosidad dinámica y cinemática:

Es la resistencia al cortante de las capas de un fluido (ASHRAE 1997), así la fuerza tangencial por unidad de superficie F que es necesario ejercer para que dos capas paralelas de superficie S separadas una distancia Y deslizando a una velocidad V sería:

$$F/S = \mu(V/Y)$$

Donde:

μ es el factor de proporción denominado *viscosidad absoluta* o *viscosidad dinámica* del fluido.

Mientras que la *viscosidad cinemática* (ν) es la proporción de la viscosidad absoluta y la densidad:

$$\nu = \mu/\rho$$

Velocidad del fluido:

$$V = \frac{L}{t} = \frac{L \cdot S}{t \cdot S} = \frac{V_0}{t \cdot S} = \frac{V_0/t}{S} = \frac{Q}{S}$$

Donde:

L es la longitud en (m)

t es el tiempo en (s)

S es la sección transversal en (m^2)

V_0 es el volumen en (m^3)

Q es el caudal volumétrico en (m^3/s) que atraviesa la sección por unidad de tiempo. ($\frac{dV_0}{dt}$)

Régimen laminar:

Es el movimiento del fluido mediante capas sucesivas que se desplazan en la dirección del flujo sin que aparezcan movimiento normal al mismo. El movimiento y la temperatura son constantes en el tiempo para todas las partículas que pasan por el mismo punto.

En 1800 Coulomb realizó una serie de experimentos que permitieron determinar que la rugosidad influía en la fricción, pero esta es despreciable en régimen laminar. (WHITE 2004).

Capa límite superficial:

Es a la región alrededor de un sólido en la cual los efectos viscosos (τ) de un fluido que se desplaza, no son despreciables. Asimismo es la zona entre la superficie del sólido, donde la velocidad es 0 y la capa de fluido que circula de forma ideal a velocidad máxima. A partir de este punto ya no existe gradiente de velocidad. Este límite es difícil de precisar, puesto que el

gradiente de velocidades es asintótico. Debido a esto se fija en el 99% de la velocidad de corriente libre.

Cuando tenemos una sola superficie como el viento sobre una lámina de agua, se trata de un *flujo externo*. En el caso de que el sólido rodee el fluido como en tuberías o poros, se denomina *flujo interno*.

Diagrama del gradiente de velocidades de un fluido al desplazarse sobre una superficie.

A medida que nos acercamos a la pared del sólido, la velocidad disminuye hasta anularse en el punto de contacto.

Diagrama del gradiente de velocidades al pasar de régimen laminar a turbulento.

Conforme aumenta la velocidad, la capa de aire en reposo disminuye, pero nunca desaparece. En ella, el mecanismo de transferencia de calor sigue siendo la conducción.

A medida que el flujo discurre sobre la superficie, aumenta el espesor de la *capa límite* y si la distancia recorrida es suficientemente grande, se alcanzará el *régimen turbulento* separado del laminar por una *zona de transición*. En las proximidades del sólido, las velocidades seguirán siendo bajas, conservando un flujo laminar denominado: *Sub-capa límite laminar* o simplemente *sub-capa laminar*.

Régimen turbulento:

La fricción entre las distintas capas de un fluido o con la pared de un sólido dan lugar a pequeñas perturbaciones en forma de vórtices que aumentan con la velocidad del fluido o la rugosidad de los sólidos sobre los que se desplacen. En contra están las fuerzas viscosas que interactúan entre las moléculas del fluido, tienden a detener estos vórtices y recuperar el régimen laminar. Si las fuerzas de inercia de estas perturbaciones son suficientemente grandes y no se detienen, el fluido comienza a desplazarse por medio de vórtices sucesivos. Este movimiento se denomina régimen turbulento. Las partículas que pasan por el mismo punto pueden tener velocidades y temperaturas que varíen a lo largo del tiempo.

El régimen turbulento es esencialmente convectivo y favorece el intercambio de masa (vapor de agua) y energía, pero resulta extremadamente complejo de describir de forma matemática.

salvo en condiciones muy concretas donde puede calcularse un valor medio según Blasius y Von Karman.

El rozamiento con las paredes es mayor en régimen turbulento que en laminar (ASHRAE 1997)

La caída de presión para un flujo turbulento no se puede calcular analíticamente (FOX et al. 1989). Debiéndose emplear resultados experimentales y análisis dimensional.

La caída de presión debida al rozamiento para un flujo turbulento completamente desarrollado en un conducto circular de área transversal constante depende del diámetro de tubo D , la longitud L , la rugosidad e , la velocidad promedio V , la densidad ρ y viscosidad del fluido μ .

$$f = \phi\left(Re, \frac{e}{D}\right)$$

y

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \text{ (Fórmula de Darcy-Weisbach)}$$

Donde:

f es el factor de rozamiento. Puede calcularse f por medio de los diagramas de L. F. Moody, siendo necesario primero conocer el nº de Reynolds, la rugosidad relativa e/D .

$$\text{Para un flujo laminar } h_f = \frac{64}{Re} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2}$$

Por tanto para un flujo laminar:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Desprendimiento de capa límite:

Cuando la superficie del sólido no es plana, las líneas de corriente se adaptan a las irregularidades juntándose o separándose. En el caso de encontrar un saliente en un flujo externo o un estrechamiento en un flujo interno, el acercamiento de las líneas supone un aumento de la velocidad y disminución de la presión. Si por el contrario el flujo se encuentra con un ensanchamiento de la sección o circula sobre un hoyuelo de la superficie, las líneas de corriente se abrirán, disminuyendo la velocidad y aumentando la presión. Si la curvatura del cuerpo es suficientemente grande, dependiendo del flujo puede generarse un flujo inverso denominado *desprendimiento de capa límite* y apareciendo una zona de torbellinos llamada estela.

Desprendimiento y flujo inverso en un cuerpo curvo.

El punto de separación se caracteriza por tener una velocidad y gradiente de velocidad nulos.

Las partículas de la capa límite laminar tienen menor cantidad de movimiento que las turbulentas, por lo que tienen más facilidad para desprenderse. (*Gherardelli*)

El arrastre se reduce sustancialmente y su estudio depende en parte de resultados experimentales (SHAMES 1995).

Flujo interno:

Movimiento de un fluido en el interior de un conducto:

En el interior del alveolo, la fuerza de la gravedad impulsa el aire más denso hacia abajo. A esta fuerza se opone el rozamiento con las paredes y la viscosidad. El rozamiento aumenta con la rugosidad y la velocidad; mientras que la oposición al movimiento por la viscosidad, aumenta considerablemente a medida que disminuye la sección.

Asumir la geometría de los alveolos como cilindros permite simplificar el cálculo y aplicar posteriormente una serie de fórmulas ya conocidas.

Las fuerzas de presión que actúan son:

Fuerzas actuantes sobre un fluido en el interior de un cilindro.

La fuerza resultante de la presión es: $[(p+dp)-p] \pi r^2$ (MIRANDA 2005)

Que puede expresarse como fuerza de empuje: $F=\pi r^2 \Delta P$

Viscosidad:

La fuerza de rozamiento contraria al movimiento viene dada por: $\tau 2\pi r dl$

y deberá cumplirse:

$$\tau 2\pi r dl = [(p+dp)-p] \pi r^2$$

Donde:

τ es el esfuerzo cortante producido por la viscosidad del fluido.

p es la presión

Las fuerzas viscosas en el interior del un cilindro en régimen laminar vienen determinadas por la ley de Poiseuille (1840).

Aplicando esta ley, la pérdida de presión sería:

$$\Delta P = \frac{8 \cdot \mu \cdot L \cdot \dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot r_0^4} \quad (\text{MIRANDA 2005})$$

La ecuación recibe el nombre de *Hagen-Poiseuille* es válida para régimen laminar y fluidos cuya viscosidad no varíe con la velocidad.

Despejando el caudal:

$$Q = \frac{\Delta P \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \mu \cdot L} \quad \text{en (m}^3/\text{s)} \quad (\text{WILSON et al.2003}).$$

Despejando la velocidad:

$$V_{med} = \frac{\Delta P \cdot D^2}{32 \cdot L \cdot \mu} \quad (\text{SMITS 2003}).$$

La relación entre V_{max} y V_{med} es: $V_{max} = 2V_{med}$ (ASHRAE 1997).

Perfil parabólico de velocidades de un fluido en régimen laminar desplazándose en el interior de un cilindro vertical.

El perfil de velocidades es una parábola de revolución con su máximo en el eje del cilindro (WHITE 2004). La rugosidad no tiene influencia en régimen laminar (STREETER et al. 2000) como se ha comprobado experimentalmente (FRANCINI et al. 1999).

Comparativa de velocidades en distintos tipos de flujos. "Isostaquias de velocidades"

Diámetro equivalente:

De forma general la caída de presión por rozamiento viene dada por:

$$\Delta P = 2 \cdot f \cdot \rho \cdot \frac{L}{d_e} \cdot v^2 \quad (\text{MIRANDA 2005})$$

Donde:

f es el factor o coeficiente de fricción (No se considera en régimen laminar)

L la longitud del cilindro.

d_e es el diámetro equivalente.

v es la velocidad.

El diámetro equivalente está relacionado con el radio hidráulico que puede hallarse mediante:

$$r_h = \frac{A}{P}$$

Donde:

A es la sección de paso

P es el perímetro mojado

Al considerar la sección entera:

$$r_h = \frac{\pi r^2}{2\pi r} = \frac{r}{2}$$

"Axial Groove" Surcos Axiales.

La industria de la refrigeración ha desarrollado secciones estriadas que aumentan la superficie y mejoran el intercambio térmico.

Para un conducto que disponga de n surcos paralelos a su eje de anchura w , profundidad δ y espacio entre ranuras w_f

Relleno de surcos axiales. Redibujado a partir de (MIRANDA 2005).

El espacio entre ranuras es:

$$w_f = \frac{\pi \cdot d}{n} - w$$

El radio capilar:

$$r_c = w$$

El diámetro equivalente:

$$d_e = \frac{4A}{P} = \frac{4 \cdot w \cdot \delta}{2\delta + w}$$

Longitud de entrada para el flujo interno:

La corriente inicial no viscosa entra en el conducto. Dependiendo de su geometría se produce una mayor o menor pérdida de presión local. Al confinar el flujo entre paredes, las capas fluidas sometidas a los efectos viscosos tienden a crecer a lo largo de una *longitud de entrada* L_e para encontrarse en el eje (WHITE 2004). Las capas límites viscosas que crecen desde la entrada, frenan el flujo en la proximidad de las paredes, acelerándolo en la proximidad del eje para mantener la continuidad de energía. En un flujo incompresible sería:

$$Q = \int u \, dA = \text{Cte.}$$

A una determinada distancia, las capas límite pueden llegar a unirse y desaparecer el núcleo no-viscoso; se dice entonces que el flujo está *completamente desarrollado*, la velocidad axial y el esfuerzo en la pared, se mantienen constantes. La presión disminuye linealmente con la longitud L del conducto tanto en régimen laminar como turbulento.

Para régimen laminar (WHITE 2004):

$$\frac{L_e}{D} \approx 0,06 Re$$

Donde:

L_e es la longitud de entrada en (m)

D es el diámetro en (m)

Re es el número de Reynolds (adimensional)

Desarrollo de los perfiles de velocidad en el interior del alveolo.

Convección natural:

El aire en contacto con una superficie intercambia energía por conducción. A partir de la variación de temperatura se inicia un movimiento del aire producido por la combinación de la diferencia de densidad y la acción de la gravedad.

Convección de una masa de aire a mayor temperatura que la superficie vertical en contacto con ella.

Donde:

T_1 es la temperatura del aire.

T_2 es la temperatura de la pared.

T_3 es la temperatura de la película de aire en reposo.

Experimentalmente se ha comprobado que las temperaturas T_1 y T_3 son muy similares. De este modo tendríamos que:

$$Q = h \cdot S \cdot (\Delta T)$$

Q es el flujo de calor en (W).

h es el coeficiente de convección natural, dependiente de la geometría. $= \frac{\lambda}{e}$

λ es el coeficiente de conductividad térmica del aire en (W/m·K).

e es el espesor de la capa de aire en reposo por el rozamiento de la pared rugosa en (m). Los valores que más influyen en el valor de e son la rugosidad de la pared y la temperatura, que afecta a la viscosidad del aire. Experimentalmente se ha comprobado la convección natural de un fluido sobre distintas geometrías, proponiendo cada autor fórmulas para cada caso.

S es la superficie del plano vertical en (m²).

ΔT es la diferencia de temperatura entre la pared y el aire.= (T₁-T₂)

$\frac{\lambda}{e}$ =h: es el *coeficiente convectivo*, su expresión de carácter empírico, está determinada por las proporciones e inclinación del plano considerado (ASHRAE 1997). Se conoce también como *coeficiente de transmisión por convección* o *conductancia de película* por su relación con la transferencia por conducción en la capa estacionaria del fluido en contacto con la pared. Los coeficientes de convección natural suelen ser menores que los de convección forzada (ASHRAE 1997). Pueden determinarse analíticamente para geometrías sencillas, pero para los casos más complejos, se realiza experimentalmente (HOLMAN 1986). En la siguiente tabla se recogen valores de h que nos permiten comparar las magnitudes de energía transferidos por convección:

Según (HOLMAN 1986)	Valor aprox. de h en(W/m ² ·°C)
Convección de aire libre:	5-25
Convección de aire forzada:	10-500
Agua en ebullición:	2.500-25.000
Condensación de vapor de agua:	5.000-100.000

Se han determinado los distintos coeficientes de convección y transmisión térmica por convección en función del viento para un edificio cúbico mediante dinámica de fluidos en las fachadas (DEFRAEYE et al. 2011). Estas simulaciones han sido desarrolladas posteriormente para geometrías específicamente urbanas tipo cañón (DE LIETO, et al.2015) y resultan de gran interés para determinar depósitos de contaminantes por lluvia dirigida.

Relación general (Convección):

$$N_u = C(Gr \cdot Pr)^n \text{ (ASHRAE 1997)}$$

Donde :

N_u es el número de Nusselt, Gr es el numero de Grashof y Pr es el número de Prandtl. Todos ellos desarrollados más adelante.

C y n son constantes que dependen de la configuración física de las superficies a estudiar.

$$h = C \frac{\lambda}{L} \left(\frac{L^3 \rho^2 \beta g \Delta T}{\mu^2} \right)_f^n \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)_f^n \text{ Formula según (ASHRAE 1997)}$$

Donde:

ΔT es el incremento de temperatura en (K)

g es la constante de la gravedad terrestre=9,8 (m/s²)

λ es la conductividad térmica en (W/m·K)

ν es la viscosidad cinemática= μ/ρ

μ es la viscosidad dinámica del fluido en (Pa·s)

ρ es la densidad del fluido en (Kg/m³)

α es la difusividad térmica= $k/ \rho C_p$

C_p es el calor específico a una presión constante en(KJ/Kg·K)

L es la longitud característica en (m) Según la geometría corresponde a:

Tubos verticales o placas: L= altura

Placas horizontales: L= Longitud

Tubos horizontales: L=diámetro

Esferas: L=radio

Bloque rectangular de longitud L_h y altura L_v: $1/L=(1/ L_h)+(1/L_v)$

Planos y tubos:

Para planos, tubos, bloques rectangulares (verticales u horizontales) y esferas. (Excluyendo planos horizontales orientados hacia abajo para calefacción u hacia arriba para refrigeración)

Régimen laminar, con GrPr entre 10^4 y 10^8 : $N_u = 0,56(GrPr)^{0,25}$

Régimen turbulento: con GrPr entre 10^8 y 10^{12} : $N_u = 0,13(GrPr)^{0,33}$

Con el aire:

$Gr \cdot Pr = 1,6 \cdot 10^6 L^3 \Delta T$ (a $21^\circ C$)

Planos verticales:

Cortos, régimen laminar: $h = 1,42 (\Delta T/L)^{0,25}$

Largos, régimen turbulento: $h = 1,31 (\Delta T)^{0,33}$

Asimismo existen una serie de números o coeficientes de gran interés para el intercambio de energía y el estudio fluidodinámico:

Número de Nusselt (N_u):

Es un coeficiente adimensional que compara la transferencia de calor por convección y conducción en un fluido que discurre sobre una superficie, expresada mediante la fórmula:

$$N_u = \frac{h L}{\lambda}$$

Donde:

L es longitud característica.

h es el coeficiente de transferencia de calor en ($W/m^2 \cdot K$).

λ es la conductividad térmica del fluido en ($W/m \cdot K$).

Nº de Reynolds (Re) [solo Convección forzada según ASHRAE]:

Es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas

$$Re = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V^2 / L}{\mu V / L^2}; \text{ Obteniendo: } Re = \rho V L / \mu = V L / \nu$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido en (Kg/m^3).

V es la velocidad en (m/s).

L es longitud característica en (m).

μ es la viscosidad dinámica del fluido en ($Pa \cdot s$).

ν es la viscosidad cinemática del fluido en (m^2/s).

Un número de Reynolds pequeño implica un régimen laminar. A partir de un valor crítico, el fluido pasa a régimen turbulento. En el caso de un flujo sobre una placa plana, la transición se produce en torno a $Re = 5 \cdot 10^5$ (INCROPERA 1999).

Para conductos de aire:

Será laminar si: $Re < 2.000$ (ASHRAE1997).

Será turbulento si: $Re > 10.000$ (ASHRAE 1997).

Nº de Grashof (Gr), (adimensional):

Describe el movimiento del aire por convección natural en función de la diferencia de densidades producido por el gradiente térmico.

$$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

Donde:

β es el coeficiente de expansión volumétrica.

g es la gravedad.

L es la longitud característica.

ΔT es el gradiente térmico entre la temperatura de la superficie y la del ambiente.

ν es la viscosidad cinemática en (m²/s).

Intercambio de masa:

Existe una expresión análoga al nº de Grasshof para el intercambio de masa:

$$G_{rc} = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \Delta C}{\nu^2}$$

Donde:

$$\beta = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dC_a} \right)_{T,p}$$

g es la gravedad.

L es la longitud característica.

ΔC es la diferencia de concentraciones entre la superficie y el ambiente.

ν es la viscosidad cinemática en (m²/s).

ρ es la densidad del fluido (aire)

C_a es la concentración de la especie a .

T significa temperatura constante.

p significa presión constante.

Nº Prandtl (Pr), (adimensional) :

Es el cociente entre las difusividades de momento y térmica.

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{\nu}{\alpha}$$

C_p es el calor específico a presión cte. en (Kj/Kg·K)

μ es la viscosidad dinámica. En el caso del aire a 20°C, $\mu = 18,25 \cdot 10^{-6}$ N·s/m²

λ es la conductividad térmica.

ν es la viscosidad cinemática. = μ/ρ , En el caso del aire a 20°C, $\nu = 15,16 \cdot 10^{-6}$ m²/s

α es la difusividad térmica en m²/s

$$\alpha = \lambda / \rho \cdot C_p$$

Valores característicos:

Aire Pr=0,7309 a 20°C (CORONEL 2014)

Agua: Pr=7 a 20°C

Para valores inferiores a la unidad, la difusividad de momento determina la transmisión de calor y esta se produce esencialmente por conducción, mientras que para valores superiores a la unidad, la difusividad térmica se impone y la convección es el determinante.

El número de Prandtl nos indica el espesor relativo de las capas límite térmicas y de momento.

Nº de Rayleigh (Ra), (adimensional):

El número de Rayleigh de un fluido indica que por debajo de un valor crítico, la transferencia de calor es fundamentalmente por conducción y por encima de este umbral pasa a ser fundamentalmente por convección. Su expresión es el producto de los números de Grashof y Prandtl.

$$Ra_x = G_{rx} \cdot P_r = \frac{C_p \cdot g \cdot \beta \cdot \rho^2}{\alpha \nu} (T_p - T_e) L^3$$

Ra_x es el número de Rayleigh en el punto x.

G_{rx} es número de Grashof en el punto x.

P_r es número Prandtl.

g es la gravedad.

L es la longitud característica.

$(T_p - T_e)$ es el gradiente térmico entre la pared y el ambiente.

ν es la viscosidad cinemática en m^2/s

β es el coeficiente de expansión térmica.

α es la difusividad térmica.

Nº de Sherwood (sh), (adimensional):

Es un coeficiente que compara la transferencia de masa por convección y difusión. Viene expresado por:

$$Sh = \frac{\text{Velocidad de transferencia de masa por flujo convectivo}}{\text{velocidad de transferencia de masa por difusión}} = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}}$$

Donde:

h_m es el coeficiente de transferencia de masa en (m/s)

L es la longitud característica en (m)

D_{AB} es la difusividad de masa en (m^2/s)

Número de Biot

Es la razón de la resistencia térmica interna de un sólido a la resistencia térmica de la capa límite (INCROPERA 1999).

$$Bi = \frac{h \cdot L}{k}$$

Donde:

h es el *coeficiente de película* o de transferencia de calor en la superficie en ($W/m^2 \cdot K$).

L es la longitud característica en (m), que puede definirse como el volumen del cuerpo dividido entre su superficie externa.

k es la conductividad térmica en ($W/m \cdot K$).

De forma análoga, existe el mismo coeficiente para la transferencia de materia:

$$Bi_m = \frac{h_m \cdot L}{D_{AB}}$$

Donde:

h es el *coeficiente de* transferencia de masa

L es la longitud característica en (m)

D_{AB} es el coeficiente de difusión en (m^2/s)

La Ecuación de Bernoulli sobre la conservación de la energía es:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Por términos tenemos que:

$P_{1,2}$ es la energía de presión.

$\frac{1}{2} \rho v_{1,2}^2$ es la energía cinética.

$\rho g h_{1,2}$ es la energía potencial.

Donde:

P es la presión

ρ es la densidad

v es la velocidad

g es la gravedad

h es la altura sobre un eje de referencia.

La Ecuación de Bernoulli podría ser planteada para el cálculo fluidodinámico en el interior de los alveolos, si se incluye el término hf a un lado de la ecuación, que representa la fricción y se obtiene mediante el diagrama de Moody.

De este modo tendríamos:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + hf$$

Sin embargo sucede que el caudal no es estrictamente constante puesto que al contar con paredes porosas tenemos filtración de aire a través de la red capilar, al que debemos añadir el gas producido por la evaporación del agua de los depósitos, que aumenta 1700 veces su volumen durante el cambio de estado (BABOR et al. 1964).

La radiación:

La radiación se transmite mediante ondas electromagnéticas emitidas por un cuerpo como resultado de su temperatura (HOLMAN 1986). Cualquier cuerpo que se encuentre por encima de 0 Kelvin emite radiación.

La radiación se propaga por el espacio a la velocidad de la luz según:

$$c=\lambda \cdot v$$

Donde:

c es la velocidad de la luz.

λ es la longitud de onda.

v es la frecuencia.

No requiere de ningún medio como ocurre con la conducción y convección. Las radiaciones luminosas y térmicas difieren físicamente en la longitud de onda.

La energía viene dada por la relación de Plank:

$$E=h \cdot v$$

Donde:

h es la constante de Plank= $6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s

v es la frecuencia.

Los cuerpos convierten parte de su energía interna en ondas electromagnéticas que colisionan con otros cuerpos, transfiriéndoles parte de ella. El aire es casi transparente a las radiaciones luminosas, y parcialmente a las infrarrojas o ultravioletas. Un vidrio común puede ser muy transparente a las radiaciones solares, pero se muestra opaco a las radiaciones emitidas por cuerpos a bajas temperaturas dando lugar al efecto invernadero (BLESÁ 1994).

Direccionalidad de la radiación:

Los cuerpos reales no presentan una radiación perfectamente difusa, por lo que su intensidad varía con el ángulo.

Los materiales conductores tienden a radiar en ángulos mayores que los no conductores. (HOLMAN 1986).

El factor de ángulo es la relación entre la radiación emitida por un cuerpo en todas direcciones y la recibida por otro. El tamaño y posición relativa entre ambos determina la cantidad de energía transmitida.

La reflectancia y absorptancia dependen de la superficie del cuerpo, pero también de la dirección y longitud de onda de la radiación incidente.

Cuando la radiación alcanza un cuerpo, parte de ella es absorbida, parte se transmite y la parte restante se refleja.

Emisividad (ξ)

Antes también llamada emitancia. Es la proporción del flujo radiante emitido por un cuerpo en comparación con la que emitiría un cuerpo negro en las mismas condiciones y temperatura. (ASHRAE 1997).

Albedo ($\hat{\alpha}$):

Es la proporción de energía reflejada respecto a la incidente.

α = absorptancia solar = 1- reflectancia solar (ALCHAPAR et al. 2012).

Transmisión de calor por radiación:

La radiación emitida por un cuerpo depende de variables como la temperatura, la longitud de onda (HOLMAN 1986), la rugosidad y dependiendo de la naturaleza del material, también el

espesor que varía desde unas fracciones de milímetro a varios mm para materiales con gran capacidad de absorción (SIEGEL et al. 2002).

Cálculo de la transmisión de calor por radiación:

El flujo de calor Q viene determinado por la expresión:

$$Q_{(W/m^2)} = \xi \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Donde:

ξ : es el coeficiente de emisividad (adimensional) dependiente del material.

σ : es la constante de Stefan-Boltzmann $= 5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K⁴).

S : es la superficie en (m²).

T_1 : es la Tª absoluta del cuerpo a mayor temperatura en (K).

T_2 : es la Tª absoluta del cuerpo a menor temperatura en (K).

Radiación entre dos superficies:

En el caso de que ambas sean planas y paralelas y a una pequeña distancia en comparación con su superficie, el coeficiente de emisividad se expresa como:

$$\xi = \frac{1}{\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} - 1} \quad (\text{BLESÁ 1994}).$$

Factor de forma:

Si la superficie emisora (a mayor temperatura) es pequeña en relación a la receptora, entonces se puede considerar que ambas tienen el mismo coeficiente de emisividad ξ . En el resto de casos ξ se calcula como el producto de las emisividades de ambas superficies (ξ_1, ξ_2) por un *factor de forma* φ :

$$\xi = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \varphi \quad (\text{BLESÁ 1994}).$$

Radiación solar:

El sol emite radiación en un amplio espectro de longitudes de onda. La mayor parte de esta radiación es emitida en el espectro visible. La cantidad de energía que llega hasta la tierra en un metro cuadrado perpendicular a los rayos solares se conoce como *constante solar*. Al atravesar la atmósfera, parte de esta energía es absorbida por los distintos elementos presentes en la atmósfera, fundamentalmente gases. De este modo, la cantidad de energía que alcanza la superficie terrestre queda condicionada por el espesor de atmósfera a atravesar que varía con la altitud, latitud y hora del día.

La Masa de aire MA , es la cantidad de masa atmosférica que la radiación solar atraviesa en comparación con la posición cenital a nivel del mar. $m=1$. A 60°, $m=2$.

Para ángulos entre 0° y 70°:

$$m = \frac{1}{\cos \theta}$$

Donde θ es el ángulo cenital.

Para localidades por encima del nivel del mar se realiza una corrección basada en la presión atmosférica. Hasta los 1000m la presión disminuye a razón de 1,13% por cada 100m de altura y un por encima, el porcentaje disminuye al 1%/100m. (NEILA 2004).

En el caso de Madrid $MA_{(\text{Madrid})} = 0,9246 \cdot MA$

Radiación de onda corta:

O infrarrojo cercano. Es la que proviene del sol (400-3.000 nm) (GOFORTH et al 2002), ya sea directa o difusa. Viene condicionada por la localización, orientación, inclinación, condiciones climáticas y propiedades de la superficie del material.

Radiación de onda larga:

O *infrarrojo lejano*. Es la que se produce entre los cuerpos y la bóveda celeste. (3.000-50.000 nm) (GOFORTH et al 2002). En el caso de fachadas, estas pueden radiar hacia otros edificios a diferente temperatura o el suelo. El flujo de calor depende de la absorptancia de la superficie estudiada y las temperaturas del cuerpo, el cielo y el suelo, así como de los ángulos visibles de uno u otro desde la superficie estudiada.

No hay unicidad de criterios entre los distintos autores sobre límites entre las longitudes de onda, próximo a los 3000nm (BARBERO 2011). La radiación solar en el espectro de onda larga es despreciable frente al intercambio de energía con la bóveda celeste, esta diferencia es fundamental de cara a comprender los materiales selectivos, que reflejan determinadas longitudes de onda. De cara a crear una refrigeración pasiva, nos interesan aquellos que reflejen la radiación solar (onda corta) pero con una elevada emitancia que permita ceder energía en forma de radiación (JOHNSON et al 2003).

Materiales selectivos:

Son aquellos capaces de intercambiar radiación sólo en determinadas longitudes de onda.

Las mediciones que registran las superficies son dependientes del instrumento empleado.

El piranómetro toma medidas con luz natural, considerando la luz difusa mientras que el espectrofotómetro emplea un haz artificial direccional. (BARBERO 2011).

Superficies selectivas frías:

A temperatura ambiente emiten gran cantidad de energía en onda larga y reflejan la onda corta.

Intercambio radiante en fachadas:

Uno de los ejemplos más emblemáticos fue la *Casa Corrales I* de Steve Baer (1972) en Albuquerque Nuevo México (E.E.U.U.) contaba con una serie de depósitos de agua a base de latas metálicas apilados en la envolvente. El agua se enfriaba durante la noche por radiación, mediante una superficie metálica que ayudaba a emitir la mayor cantidad de la radiación hacia el cielo. Posteriormente, durante el día, esta superficie se abatía sobre la fachada, ayudando a sombrearla.

Las fachadas radiantes presentan el problema de la obstrucciones por parte de otros edificios u elementos que rodeen la fachada e impidan el intercambio con la bóveda celeste.

Mientras que las cubiertas radian por completo hacia la bóveda celeste, los planos verticales que forman las fachadas tienen, en el mejor de los casos, solo un 50% de cielo visible, estando el arco visual restante ocupado por el suelo. Cada superficie está a una determinada temperatura como se muestra en el esquema.

Esquema de las temperaturas del cielo y suelo visibles desde una fachada radiante.

Por tanto la energía intercambiada con el entorno será:

$Q = Q(\text{Superficie Cielo}) + Q(\text{Superficie suelo}).$

Aplicado a la fórmula general del intercambio de energía por radiación:

$$Q_{\text{Sup Suelo}} = (1 - \cos\beta) / 2 + A \cdot \sigma \cdot \xi_{\text{Sup}} \cdot \xi_{\text{Suelo}} (T_{\text{Sup}}^4 - T_{\text{suelo}}^4)$$

$$Q_{\text{Sup Cielo}} = (1 + \cos\beta) / 2 + A \cdot \sigma \cdot \xi_{\text{Sup}} \cdot \xi_{\text{Cielo}} (T_{\text{Sup}}^4 - T_{\text{Cielo}}^4)$$

Donde:

β es el ángulo de la pared con el suelo, habitualmente 90° , por lo que $\cos\beta=0$

A es la área de la superficie de la fachada en (m^2)

σ es la constante de Stefan-Boltzmann $= 5,67 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$).

ξ_{Sup} es la emisividad de la superficie de la fachada, dependiente del material.

ξ_{Suelo} es la emisividad del suelo.

ξ_{Cielo} es la emisividad del cielo, que puede variar con la nubosidad.

T_{Sup} es la temperatura de la superficie en (K).

T_{suelo} es la temperatura del suelo en (K).

T_{Cielo} es la temperatura del cielo en (K).

Temperatura del cielo:

Varía en función de la concentración de vapor de agua y contaminación. Existen distintas fórmulas para calcularla (ESTEBAN 1986) en función de la temperatura del aire y la emisividad del cielo (BERDAHL et al. 1982). En grandes ciudades, la temperatura del cielo puede ser hasta 10°C mas alta (NOWAK 1989) que en sus alrededores. (SWINBANK 1963).

Cámara termográfica:

Captan la radiación infrarroja de un objeto, lo que permite calcular su temperatura superficial.

Sin embargo la medición realizada por la cámara no solo depende de la temperatura del objeto; sino que la emisividad y la humedad del mismo, así como temperatura atmosférica y las radiaciones reflejadas de otros cuerpos, afectan a la imagen captada.

El factor de emisividad es el parámetro más importante. Compara con la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y oscila entre 0 y 1. Una superficie especular tendrá un valor inferior a 0,1 mientras que la tierra húmeda, el asfalto, la piel humana o una superficie cubierta de óxido están próximas a la unidad. El agua destilada 0,96 (a 20°C) (WOLFE, ZISSIS 1985), Un revoco de cal 0,910 (entre 10 y 90°C) (BRAMSON 1968).

CÁMARA VENTILADA:

La fachada ventilada se caracteriza por una hoja exterior que sirve de protección contra los agentes atmosféricos. Está separada de la hoja principal por una cámara que actúa de colchón térmico. Cuando la radiación solar incide sobre el elemento exterior, la energía es disipada por convección. El aire a ambos lados del elemento exterior se vuelve más ligero al calentarse. Al ascender por la cámara, la renovación evita el sobrecalentamiento, mejorando la eficiencia hasta un 40% respecto a fachadas con el mismo aislamiento pero de una sola hoja (MONTERO 2007), (CIAMPI et al. 2003). Otros autores elevan el ahorro en refrigeración hasta el 58,7% (MORA et al. 2011). El ahorro energético se incrementa a medida que lo hace la radiación solar.

Sección esquemática de la corriente ascendente inducida por la radiación solar en una fachada ventilada.

Otros factores son la resistencia térmica de la hoja exterior así como de la rugosidad de la superficie en torno a la cámara por donde circula el aire. (CIAMPI et al. 2003).

Entre las características observadas está la temperatura del aire de la cámara, que se incrementa progresivamente con la altura (MORA et al. 2011), (GIANCOLA 2010) y depende de factores como el material y masa de la hoja exterior o la altura y el espesor de la cámara.

Espesor óptimo de la cámara:

Gráfica de la variación del ahorro energético en relación al espesor de la cámara ventilada, redibujado a partir de (CIAMPI et. al 2003).

El ahorro energético aumenta progresivamente con el espesor, pero a partir de 0,3m carece de sentido incrementar la cámara siendo 0,15m el óptimo (CIAMPI et. al 2003). El estudio de muros trombe refleja que las velocidades máximas en el interior de la cámara ventilada se dan con espesores entre 0,2 y 0,3m. A partir de estos espesores, no hay repercusión significativa en el ahorro. (GAN 1998).

Desde el punto de vista fluidodinámico, el espesor de la cámara influye significativamente sobre el régimen y por tanto en la transferencia de calor. Al alcanzar el régimen turbulento, los

vórtices que aparecen trasladan rápidamente las moléculas de aire recalentado desde las proximidades de la hoja exterior a la interior; mientras que el régimen laminar, las venas de aire circulan paralelamente y la transmisión de calor se produce por conducción en un medio naturalmente aislante. El espesor óptimo produciría una corriente laminar con suficiente caudal para disipar la energía radiante, pero con una velocidad que no supere el nº de Reynolds crítico que dé lugar a la aparición de turbulencias en el interior de la cámara.

Aislamiento en la hoja exterior:

En una fachada ventilada, el aislamiento se dispone normalmente sobre la hoja interior.

Según los experimentos realizados por otros investigadores, es posible incrementar la eficiencia de este tipo de fachadas trasladando parte de ese aislamiento sobre la hoja exterior.

El ahorro energético puede superar el 10% para acabados como el cobre, poliéster o aplacados cerámicos, pero es inferior al 5% para hojas exteriores de ladrillo. Las gráficas de ahorro (similares a parábolas), señalan que los mayores ahorros se producen al trasladar hacia la cara exterior porcentajes de aislamiento entre el 15 y el 30% dependiendo del material de acabado. (CIAMPI et al 2003).

Gráfica de la variación del ahorro energético en relación al porcentaje de aislamiento dispuesto en la cara exterior de una cámara ventilada, redibujado a partir de (CIAMPI et. al 2003).

LA CAL:

El uso de la cal se remonta al uso del fuego en época prehistórica, cuando se observa el endurecimiento con el agua de determinadas piedras calcinadas. (CAZALLA 2002).

Los morteros de cal se emplearon en multitud de civilizaciones antiguas, Siria 4250 A.C., China 2000-1700A. C. Así como en la cultura maya. (BARBERO 2011).

El uso del mortero de cal se extendió en Europa en época romana, si bien la cal ya se empleaba como revestimiento de muros por los griegos. (ARREDONDO 1969).

Según la normativa actual, en la cal se diferencian dos grandes grupos según sus propiedades: La *cal aérea* y la *cal con propiedades hidráulicas*.

Representación esquemática de los tipos de cal según (UNE-EN 459-1):

Cal en la construcción:

Cal aérea

Cal Cálctica
(CL)

Cal dolomítica
(DL)

Cales con propiedades hidráulicas

Cal
formulada
(FL)

Cal hidráulica
natural (NHL)

Cal hidráulica
(HL)

Cal viva

Cal viva

Cal hidratada

Cal hidratada

Cal

semihidratada

(S1)

En este apartado se incide sobre aquellos aspectos del material relacionados con el uso singular que se hace de él, documentando características como la higroscopicidad, permeabilidad al vapor de agua, imprescindibles para la hipótesis planteada.

Las cales aéreas:

Los hidratos se combinan y endurecen con el dióxido de carbono presente en el aire, formando carbonato de calcio. No contienen adición hidráulica ni puzolánica.

Las cales aéreas se subdividen en (UNE-EN 459-1):

Cales calcíticas: Formadas por óxido de calcio y/o hidróxido de calcio.

Cales dolomíticas: Formadas principalmente por óxido de calcio y magnesio y/o hidróxido de calcio y magnesio.

Ambas pueden presentarse en forma de Cal viva (Q), Cal hidratada en polvo (S), pasta (S PL) o en suspensión o lechada de cal (S ML).

La cal aérea procede de la calcinación de piedras calizas a una temperatura de entre 900 y 1000 °C, dando lugar a la siguiente reacción endotérmica:

Se obtiene el óxido de cal o *cal viva*.

Con el apagado con agua tenemos:

Es una reacción exotérmica que puede hacer hervir el agua. Según la cantidad aportada se obtendrá cal aérea en polvo, en pasta o lechada.

Una vez en obra y por contacto con el dióxido de carbono del aire se produce la carbonatación:

Esta reacción es más lenta que las anteriores, días incluso años, especialmente si el CO₂ no puede entrar en contacto con el producto, ya sea por la presencia de agua, el espesor o la estructura porosa del compuesto.

Este conjunto de reacciones reciben el nombre de *ciclo químico de la cal*.

Una vez carbonatadas, las cales aéreas no son solubles y por lo tanto no sufren eflorescencias (BLÄUER-BÖHM 2000). Su endurecimiento paulatino (PRADO, GUERRA 1962) permite que se adapten a los movimientos térmicos y permite el autosellado (CHANDRA, BERNTSSON, SVÄRD 2000), (MACHADO 2007) ayudando a contrarrestar la microfisuración térmica y reológica derivada de contracciones diferenciales entre el árido y el aglomerante.

Sin embargo su durabilidad se puede ver reducida en condiciones de saturación de agua (FURLAN, KOHLER 1981).

Cales con propiedades hidráulicas:

Están constituidas fundamentalmente por hidróxidos, silicatos y aluminatos de calcio. Fraguan y endurecen al mezclarse con agua y por reacción con el dióxido de carbono del aire. (UNE-EN 459-1)

Las cales hidráulicas (HL): (Usada en prototipos)

Forman un conglomerante fundamentalmente de cal con adición de otros materiales como cemento, escorias de alto horno, cenizas volantes o filler calizo. (UNE-EN 459-1).

Destacan por su capacidad de endurecimiento en condiciones de humedad. Además de endurecer con el CO₂ del aire, fraguan en contacto con el agua (*hidraulicidad*).

La cal hidráulica se obtiene a partir de piedras calizas con impurezas arcillosas. A 700 °C los silicatos de la arcilla se descomponen dando lugar a óxido de sílice (SiO₂)

Por encima de los 850 °C se descompone el CO₃Ca y a partir de los 1000 °C reaccionan los componentes arcillosos con las moléculas de óxido de cal dando lugar a la cal hidráulica:

Las cales hidráulicas presentan una mayor resistencia y durabilidad que las cales aéreas en presencia de agua (BOYNTON 1980)

La permeabilidad al vapor de agua es similar en las cales aéreas e hidráulicas (FURLAN 1982) y es posible mezclarlas para obtener un conglomerante con determinadas características.

Cales hidráulicas naturales (NHL):

Sus propiedades hidráulicas son exclusivas de la composición de la materia prima natural. Esta se obtiene a partir de la calcinación de calizas más o menos arcillosas o silíceas reducidas a polvo con o sin molienda mediante apagado.

Cales formuladas (FL):

Se constituyen a base de cales aéreas y/o cal hidráulica natural, con adición de material hidráulico y/o puzolánico para obtener unas propiedades específicas.

Sostenibilidad del la cal:

Hasta la aparición del cemento portland, el mortero de cal era el conglomerante empleado tradicionalmente. La rapidez de fraguado y mayor resistencia del cemento, fueron relegando a la cal a actuaciones de restauración y rehabilitación. Sin embargo, al considerar su permeabilidad al vapor, ciclo de vida y huella de CO₂, el interés por este material vuelve a recuperarse en obra nueva. Aparece así el concepto de Bioconstrucción, en referencia a una corriente sensible con el medio ambiente.

Aunque químicamente podamos hablar de un ciclo cerrado del CO₂ en el proceso de producción (calcinación) y carbonatación de la cal, en la práctica el balance no llega a neutralizarse por completo. Si bien, es menos contaminante que el del cemento:

Kg de CO₂ por tonelada de aglomerante:

Material	Fabricación (kg)	Reabsorción por carbonatación (kg)	Porcentaje de reabsorción (%)
Cemento portland	819	--	0
Cal aérea CL	872	535	61
Cal hidráulica natural NHL 3,5	606	270	44
Cal hidráulica natural NHL 5	635	220	34

Fuente: Foro de la cal: <<http://www.forumcalce.it/bioedilizia/102-bioedilizia>>

El encalado ha servido tradicionalmente a la eficiencia energética por su conocida capacidad de reflejar la radiación solar. Así es frecuente encontrar localidades en climas cálidos conocidas como "pueblos blancos" en las que esta técnica ha sido habitual durante generaciones. La reducción de la demanda de refrigeración puede descender hasta un 30% (MARTIN et al. 2005)

Viviendas tradicionales encaladas de la provincia de Almería.

De forma más reciente se ha vuelto a poner en valor la cal como material como aglomerante, combinado con multitud de aditivos que aprovechen su baja densidad y conductividad térmica. Encontramos así forjados y cubiertas ligeras con áridos, tanto en obra nueva como en rehabilitación (BRECKER et al 2001). Como acabado, por su alto albedo, permeabilidad al vapor y menor conductividad y huella de carbono respecto a morteros cementosos.

Vivienda con acabado en revoco de cal "Can Tanca". Passivhaus Premium / BREEAM platino, (Ibiza 2016).

Fuente: <http://www.noudiari.es>

GeoSilex®:

Entre los materiales porosos con los que se podría fabricar los paneles mini-aljibe se encuentra el GeoSilex®: Un conglomerante de cal de carburo, subproducto de la fabricación de acetileno.

Tras la eliminación de impurezas y elementos tóxicos y la incorporación de aditivos (15%) se obtiene el producto que carbonata de forma similar a otras cales para producir $\rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Al fabricarse a partir de un desecho industrial, los procesos de extracción ya han sido amortizados medioambientalmente.

Su pH inicial se aproxima al 12,4 y desciende a 8,5 a 9 cuando se encuentra completamente carbonatado. Para entonces la pieza puede ganar hasta un 20% de su peso inicial extrayendo CO_2 de la atmósfera. (BERMEJO M. 2009).

Morteros de cal:

La adición de áridos abarata los costes aumenta la resistencia y evita la fisuración durante el fraguado.

La arena fragmenta la cal (BARBEROT 1927) y aumenta su permeabilidad al aire, vapor de agua y dióxido de carbono facilitando su fraguado. (BARBERO 2011).

Resistencia:

Los morteros para revestimientos y acabados están definidos en la norma UNE EN 998-1 (AENOR 2010).

Dicha norma clasifica:

GP: Morteros de revoco o enlucido para uso corriente

CR: Morteros para revoco coloreados.

R: Morteros de revoco o enlucido para renovación.

Según sus propiedades:

propiedades:	Categorías:	Valores:
Intervalo de resistencia a compresión (28 días)	CS I	0,4 a 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 a 5 N/mm ²
	CS III	3,5 a 7,5 N/mm ²
	CS IV	≥ 6 N/mm ²
Absorción de agua por capilaridad	W0	No especificado
	W1	c ≤ 0,4 Kg/m ² ·min ^{0,5}

	W2	$c \leq 0,2 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Conductividad térmica	T1	W/m·K
	T2	W/m·K

En el caso de la albañilería, la resistencia a compresión está clasificada por la norma UNE EN 998-2 según las siguientes designaciones:

Clase:	M1	M2,5	M5	M10	M15	M20	Md
Resistencia a compresión (N/mm ²)	1	2,5	5	10	15	20	d
d es la resistencia a compresión declarada por el fabricante, mayor de 25							

A diferencia del cemento, la cal adquiere resistencia de forma más progresiva mediante la carbonatación que se produce desde la superficie hacia el interior.

La mayor parte de los cambios estructurales tienen lugar en los 8 primeros meses, si bien se han registrado su progresión al menos hasta los 5 años a un ritmo más lento. (MARGALHA et al. 2013).

Evolución de la morfología de la portandita del mortero de cal. (MARGALHA et al. 2013).

La estructura alveolar favorece la rápida carbonatación, que progresa desde todos los frentes en contacto con el aire. La humectación posterior de las piezas de mortero puede favorecer la carbonatación de portlandita inalterada; así como la disolución, migración y precipitación de sales.

El empleo de determinados áridos aligerados puede aumentar el módulo de elasticidad, la resistencia térmica y mejorar las propiedades acústicas. (SILVA et al 2010)

La naturaleza de los cristales de hidróxido de calcio influencia la carbonatación, la porosidad y la resistencia a compresión de los morteros. (HANSEN et al. 2008).

Cristales de hidróxido de calcio F: (HANSEN et al. 2008).

Higroscopicidad de los morteros:

La absorción y desorción capilar se define mediante la UNE-EN 1015-18:2003, que permite determinar la resistencia a las heladas.

La permeabilidad al vapor de agua es otro factor crucial en edificación que condiciona el confort higrotérmico y la posible condensación en el interior de los cerramientos. queda determinada por la UNE-EN 1015-19:1999.

Los morteros *porógenos* son aquellos cuyas propiedades naturales o específicamente formuladas favorecen la red capilar y ocluyen espacios en su interior donde pueden depositar sales, impidiendo el afloramiento de las mismas en la superficie.

El regleado con utensilios de madera favorece la apertura de poros respecto de los útiles metálicos. Esta característica es importante si se quiere maximizar la permeabilidad al vapor de agua.

El vapor de agua presente en el aire ejerce una presión denominada *presión parcial de vapor* (P_w). Cuando dos masas de aire con distintas presiones de vapor se ponen en contacto, el vapor de agua se difunde desde aquella con mayor presión. La fuerza ejercida es capaz de abombar o incluso desprender barreras impermeables como la pintura plástica.

El factor μ de un material es el *coeficiente de resistencia a la difusión del vapor de agua* (adimensional). A mayor coeficiente, mayor resistencia a la difusión del vapor. El aire tiene un valor de referencia de 1 mientras que el mortero de cal puede variar entre 6 y 15 y el cemento de 20 a 25.

Los morteros de cal se emplean en rehabilitación por su mayor compatibilidad con las fábricas antiguas, tanto en resistencia como en permeabilidad al vapor, comportándose de manera solidaria con el soporte preexistente. La capilaridad que presentan las fábricas de mortero de cal hacen muy recomendable que cualquier recubrimiento permita transpirar al muro. al mismo tiempo este recubrimiento, en el caso de exteriores, ha de cumplir con unos criterios de impermeabilidad.

Esta combinación de propiedades es la que propició el uso del mortero de cal en los prototipos ensayados y se presenta como una alternativa a los elementos cerámicos habitualmente considerados en fachadas con enfriamiento evaporativo.

Transporte de humedad y calor:

Mendes y Philippi desarrollaron un modelo matemático para definir el transporte de humedad calor y aire a través de medios porosos e interfaces de distinta porosidad. Su estudio, válido para cualquier material poroso, toma como parámetro determinante el contenido de humedad frente a modelos anteriores que contemplaban la humedad relativa y presión capilar. (MENDES et al. 2005)

Cargas que podrían mejorar las cualidades deseables en los paneles propuestos:

Existe una gran variedad de aditivos que se han incorporado a los morteros para modificar sus propiedades.

La adición de sangre mejoraba algunas características como la permeabilidad al vapor de agua o la resistencia a las heladas y la deposición de sales. Actualmente reemplazados por tensoactivos (REICHEL et al. 2004).

La cerámica molida, también llamada chamota, mejora las cualidades hidráulicas, la resistencia mecánica y la durabilidad.

Tradicionalmente y para evitar la fisuración se empleó pelo de animal o fibras vegetales (SICKELS 1982) Actualmente las fibras orgánicas han sido reemplazadas por polipropileno.

UNE EN 13914-1:2006, La adición de fibras no puede modificar el mortero de forma física o mecánica. No se pueden emplear mallas metálicas y las fibras minerales han de resistir los álcalis. La malla de fibra de vidrio ha de estar protegida a tal efecto.

Adición de polímeros que permiten el fibrado con grafeno, mejorando las características mecánicas, resistencia a la abrasión, flexión (400%), compresión (700%). (DCA US 2015).

El alto PH de la cal ataca la fibra de vidrio, que debe ser protegida con imprimación. No así el grafeno.

Las láminas de grafeno se unen a un nanotubo de carbono en forma de espina de pez formando una estructura que alberga los cristales de carbonato cálcico.

propiedades cal: bactericida, fungicida. (LEON 2015).

Resistencia a las heladas:

Tradicionalmente se añadieron agregados aligerados de lava (MALINOWSKI 1982).

Puede lograrse mediante aditivos aireantes recogidos en la UNE EN 934-4 2004 tabla 2. Entre otros efectos logran un tamaño de poro que reduce los efectos adversos de la helada. (BOYNTON 1980), (NEWSOM et al. 2001).

Normativa sobre aditivos:

UNE EN 13914-1 2006 clasifica los áridos.

(UNE EN 13914-1 2006: ap.B.4.7) Adición de polvo de hulla o fibras como pelo de animal

(UNE EN 13914-1 2006: ap.5.1.3) que afecten la resistencia y durabilidad del revestimiento.

UNE EN 934-2+A1:2012 especifica aditivos como inclusores de aire.

Reducción de la conductividad:

El interés en esta cualidad reside en que a menor conductividad del mortero que compone las piezas, menores pérdidas energéticas durante el invierno así como ganancias durante el verano.

A menor densidad aparente, mayor volumen de aire en su interior.

Disminuye con el aumento de la porosidad (KOU et al 2009).

Existen un gran número de patentes con este objetivo citadas por (BARBERO 2011)

Introducción de áridos aligerados en lugar de arena (ALTMANN et al. 1981)

Pumita (piedra pómez) (BAHSLER 1981) Sin embargo son los sistemas porosos abiertos los más interesantes para esta investigación por favorecer la circulación del vapor de agua.

Poliestireno y grafito (GELLERT et al. 1999).

Propiedades radiantes de la cal:

La cal tiene una alta emitancia (0,91) en el infrarrojo lejano, mientras que su absorptancia varía de 0,1 (para el espectro visible), hasta 0,25. (BARBERO 2011). Se trata por tanto de un *material selectivo frío*.

Comportamiento de los materiales en función de su absorptancia, reflectancia y emisividad. Redibujado a partir de (BARBERO 2011).

El hidróxido de calcio hidratado empleado como conglomerante en el mortero de cal presenta una reflectancia elevada. Se han ordenado los agregados de mortero de cal según su espectrometría con objeto establecer los más idóneos para la mejora de su comportamiento térmico, destacando el silicato de calcio y diatomeas con un 90.1% de SiO_2 y un 4,1% de Al_2O_3 , ambos con una reflectancia del 92,4% (BARBERO 2011).

Las propiedades buscadas para reducir la penetración del flujo radiante será la reducción de la absorptancia. El 46% de la radiación solar corresponde al espectro visible comprendido entre los 380-760nm, primando los colores claros (BARBERO 2011) El estudio de morteros de cal que mejoren las propiedades térmicas ya ha sido realizado por esta autora y solo resta seleccionar entre aquellos, los que presentan una estructura de poro abierto, por su mayor permeabilidad al vapor de agua.

Efectos de la contaminación:

El empleo de morteros de cal como acabado en ambientes urbanos contaminados no está exento de riesgos. Los cloruros, fluoruros y compuestos del nitrógeno resultan agresivos (VICENTE 1991). La "lluvia ácida" también es capaz de atacarlo según la reacción:

El SO_2 puede reaccionar con el MgO no hidratado de la cal formando Sulfatos de magnesio que produzcan desconchones. (RODRÍGUEZ-NAVARRO et al 1998).

El dióxido de carbono y el agua actúan sobre el carbonato cálcico insoluble dando lugar a bicarbonato cálcico soluble según la reacción: (VICENTE 1991) (MATTEINI et al 2001).

Sin embargo, aunque las sales pueden causar disgregaciones, este fenómeno conocido como "cárstico" también produce una lenta regeneración de una estructura cristalina más compacta y estable. (MATTEINI et al 2001).

DIÓXIDO DE TITANIO

Introducción:

En 1988, el botánico Wilhelm A. Barthlott comparó cientos de especies, para determinar la que presentaba mejores cualidades de auto-limpieza. Gracias a la aparición del microscopio electrónico pudo determinar la naturaleza de la resbaladidad de las superficies. Desde entonces han sido muchos los estudios que han tratado de copiar el comportamiento auto-limpiante de las nanoestructuras superhidrófugas e hidrófilas de algunas plantas.

En 2001 Pilkington presentó *Pilkington Activ™*, una ventana auto-limpiante gracias a una fina capa de dióxido de titanio, que por sus propiedades hidrófilas y fotocatalíticas descomponía la suciedad y permitía que el agua de lluvia la arrastrara de su superficie, reduciendo los costes de limpieza y mantenimiento. La activación del efecto fotocatalítico del TiO_2 precisa del espectro UV.

Las aplicaciones posteriores han tenido el mismo objetivo, ampliado los materiales de construcción sobre los que se emplea: pinturas, cerámica, hormigones, baldosas, adoquines, señales de tráfico, etc.

Puede desinfectar el agua y el aire gracias a su alto poder oxidante. La incorporación de algunos metales o tratamientos de plasma amplía al espectro visible la activación fotocatalítica (MARTINS et al. 2008).

Características generales:

El dióxido de titanio (TiO_2) es una formación cristalina común muy estable. Es reciclable y sintetizable. Suele adoptar tres estructuras: Anatasa, rutilo y broquita que dan lugar a densidades y bandas electrónicas distintas. Es estable en medio acuoso, opaco a la luz y presenta uno de los mayores índices de refracción, incluyendo el espectro ultravioleta, tanto pulverizado como mezclado por lo que su uso está muy extendido como aditivo blanqueador en pigmentos, e incluso cosméticos.

Propiedades y aplicaciones del dióxido de titanio en la arquitectura:

Al exponerse a la luz solar se vuelve hidrófilo y su ángulo de contacto con el agua pasa de $72 \pm 1^\circ$ a $0 \pm 1^\circ$ creando una película continua de agua si lo humedecemos. El comportamiento con aceite es similar. El fenómeno sucede tanto en el TiO_2 en forma Anatasa como en Rutilo y se mantiene en el tiempo durante varios días después de haber recibido radiación ultravioleta. Transcurrido ese plazo, decrece gradualmente, pero se regenera en cuanto se expone de nuevo. Se han comprobado cualidades oleófilas; tanto en la forma anatasa como rutilo, policristalinas y cristales simples, que permiten que la lluvia pueda arrastrar este tipo de contaminantes (WANG et al 1997).

Variantes de este compuesto como el NF- TiO_2 permiten la autolimpieza por fotocatálisis también en el espectro visible, aunque más lentamente que con el UV, logrando ángulos de contacto reversibles con el agua que se reducen de los 34° a los 8° (KONTOS et al 2011).

Reducción del ángulo de contacto agua - NF-TiO₂ en función del tiempo. Redibujado a partir de (KONTOS et al. 2011).

Reducción del ángulo de contacto agua - NF-TiO₂ en presencia de radiación visible. Redibujado a partir de (KONTOS et al. 2011).

Las estructuras de nanotubos dispuestas verticalmente a modo de felpudos microscópicos han probado su eficiencia en la degradación de compuestos orgánicos volátiles como el benceno y tolueno. Siendo los espesores de 12µm los que presentan mayores valores descontaminantes. (KONTOS et al 2010).

Reacción fotocatalítica descontaminante. Redibujado a partir de (KONTOS et al. 2011).

Adición de TiO₂ en morteros de cal:

El uso de morteros de cal con adición de TiO₂ aumenta su durabilidad, produce la foto-oxidación de los contaminantes orgánicos, que son decolorados durante el proceso, colaborando así a mantener limpia su superficie. (KARATASIOS et al 2010). Asimismo acelera la carbonatación (KARATASIOS et al 2010), (MARAVELAKI et al 2012).

La adición de entre el 4,5 a 6% TiO₂ aumenta la adherencia del mortero a las piedras porosas así como la resistencia a flexión y compresión, no en las primeras 3 semanas, que incluso decrece según apuntan otros autores por la microfisuración por contracción, pero si a partir de periodos de 4 meses o mayores, cuando las ventajas son significativas. (MARAVELAKI et al 2012) Según los ensayos de estos mismos autores, la capilaridad y retención de agua también aumentan; lo que supone un inconveniente para su uso en restauración, pero podría ser una gran ventaja su aplicación para enfriamiento evaporativo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA EVAPORACIÓN.

Calor Específico (C_e), en (J/kg·K):

Es la cantidad de energía que hay que suministrar a una unidad de masa para incrementar su temperatura una unidad.

Calor específico del aire seco: 1.010 (J/kg·K) (NEILA 2004)

Calor específico del Agua: 4.180 J/kg·K (a 20 °C) (ASHRAE)

Calor Latente:

Es la energía necesaria para cambiar de estado una sustancia. Es la misma independientemente del sentido del cambio y la temperatura no se ve alterada.

$C \text{ (J)} = \text{masa (kg)} \cdot \text{calor latente (J/kg)}$

Calor de fusión del hielo: 335.000 J/Kg (a 0°C y 1atm.)

Calor de vaporización del agua (c_v): 2.259.000 J/Kg (a 100°C y 1atm.), (SEESE et al. 1989).

A medida que disminuye la temperatura, la energía necesaria se incrementa, alcanzando: 2.501.000 J/kg a 0 °C.

Ebullición y vaporización:

La ebullición se produce en todo el líquido. Viene condicionada por la presión puesto que el paso de líquido a gas viene acompañado de un aumento de volumen (BABOR et al. 1964). La burbuja debe superar la presión atmosférica mas la columna de líquido que tiene por encima.

Principio físico del enfriamiento evaporativo:

La vaporización se produce únicamente en la superficie del líquido y ocurre a cualquier temperatura. Depende de la presión atmosférica pero sobre todo de la presión de vapor presente en el gas. La evaporación es un proceso endotérmico que absorbe energía.

La temperatura de un cuerpo está vinculada al movimiento de sus moléculas según la teoría cinética. Ninguna molécula se mueve igual de rápido que las demás, siendo la temperatura, una media de la cantidad de energía cinética de cada una. Cuando las moléculas mas energéticas que hay en la superficie de un líquido vencen la atracción de las que la rodean y lo abandonan, pasan a un estado gaseoso. De este modo la velocidad media de las moléculas restantes se ve reducida, descendiendo así la temperatura del líquido. Al mismo tiempo las moléculas gaseosas se incorporan al líquido hasta alcanzar un equilibrio dinámico.

Equilibrio dinámico en la interfase líquido-gas.

Tensión superficial (γ):

Se mide en (dinas/cm) aunque también puede encontrarse en otras unidades como (g/cm). Depende de la naturaleza del líquido. Se debe a que, en el interior de un líquido, las moléculas están sometidas a fuerzas de atracción con las que las rodean en todas direcciones, estableciéndose un equilibrio de fuerzas. Mientras que las que se encuentran en la superficie son atraídas únicamente por las que se sitúan a su nivel e inmediatamente debajo, pero al no tener ninguna sobre ellas, no se produce este equilibrio, dando como resultado neto una

fuerza con dirección hacia el interior del líquido que tiende a curvar la superficie y la aparición de gotas.

Al incrementar la temperatura, se aumenta la energía cinética media de las moléculas, reduciendo la atracción entre ellas.

En Términos cuantitativos es la energía necesaria para incrementar el área superficial de un líquido en (J/m^2). La tensión superficial del agua es $0,072 \text{ J}/\text{m}^2$ (a 25°C). (SEESE, DAUB 1989).

Fuerzas de atracción entre las moléculas de la superficie y en el interior de un líquido.

Evaporación sobre superficies horizontales y verticales:

El enfriamiento evaporativo en superficies horizontales como láminas de agua o cubiertas inundadas es uno de los recursos de climatización empleados en la arquitectura bioclimática (GIVONI 1994),(GONZÁLEZ et al.2013). Experimentalmente se ha comprobado que la potencia de enfriamiento de una cubierta inundada en condiciones óptimas está en torno a $85\text{W}/\text{m}^2$ (NEILA 2004).

Su rendimiento está condicionado por la humedad atmosférica y presencia de viento. El perfil urbano constituye una superficie rugosa que reduce la velocidad del viento proporcionalmente al relieve de los edificios.

Diagrama de perfiles de velocidad sobre zonas urbanas, periféricas y marítimas con porcentaje de velocidad del viento. Redibujado a partir de (GIVONI 1998).

A mayor velocidad del viento, mayor arrastre de las partículas de agua. Pero en su ausencia, el aire frío se estratifica sobre la lámina de agua, no existiendo convección, por lo que la propagación de la humedad depende únicamente del fenómeno de difusión. La importancia

del viento para la evaporación sobre superficies horizontales queda reflejada en las fórmulas de de cálculo, ya sean lagos y recipientes (FITZGERALD 1886), láminas de agua (MEYER 1915),(ROHWER 1931),(HORTON 1939), o suelos y superficies vegetales (PENMAN 1948).

Esquema comparativo de la difusión de vapor en función de la velocidad del aire.

El rango de distancia que cubre cada molécula está vinculado al movimiento oscilatorio de las mismas y es muy inferior al desplazamiento colectivo que tiene lugar en los fenómenos convectivos.

En una superficie húmeda vertical, no se produce estratificación sino un movimiento convectivo producido por el gradiente de densidades del aire, que al no encontrar una superficie que la retenga, se desplaza, aportando aire menos saturado que da lugar a su vez a una mayor tasa de evaporación.

CAPILARIDAD:

Adherencia:

En la superficie de contacto entre el sólido y el líquido aparecen *fuerzas de adhesión*. Cuando estas fuerzas superan a las de cohesión del líquido, se dice que "*el líquido moja el sólido*" y en caso contrario, se dice que "*el líquido no moja el sólido*" (TREMPS 2007)

Se denomina *ángulo de contacto, de capilaridad o de conjunción*, al que forma la tangente de la superficie del líquido con el sólido en el punto de la interfase en la que concurre además el aire.

Al disponer una gota del líquido sobre el sólido podemos observar:

El líquido moja el sólido.

En el caso del agua, hablaríamos de superficie Hidrófila: (φ es un ángulo agudo) $\varphi < \pi/2$

El líquido no moja el sólido

En el caso del agua, hablaríamos de superficie Hidrófuga: (φ es un ángulo obtuso) $\varphi > \pi/2$

Formación de menisco:

Formación de menisco

Cuando las fuerzas de adherencia superan las cohesivas, se dice que el líquido moja el sólido, asciende por la pared capilar y la forma del menisco será cóncava.

Cuando las fuerzas cohesivas superan a las de adherencia se dice que el líquido no moja el sólido (Ej. mercurio), desciende por la pared capilar y la forma del menisco será convexa.

La lectura de nivel en un recipiente se efectúa en el fondo del menisco.

Capilaridad:

Ley de Jurín: "*Los ascensos o descensos de los líquidos por tubos capilares, son inversamente proporcionales a los radios de los tubos*"

El líquido asciende hasta que las fuerzas de atracción de la circunferencia que forma el líquido en el extremo superior del capilar se equilibra con el peso del cilindro.

$$h = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r \rho g} \quad (\text{BURBANO et al 2003}).$$

Donde:

h es la altura a la que asciende el líquido en (m).

σ es la tensión superficial líquido-vapor que en el caso agua-aire a 20 °C es 0,0728N/m

φ es el ángulo de contacto en radianes.

r es el radio del capilar en (m).

ρ es la densidad en (Kg/m³). En el caso del agua es 1.000Kg/m³ con ligeras variaciones en función de la temperatura.

g es la gravedad en (m/s²)

De la que se obtiene que: "Los ascensos o descensos son directamente proporcionales a la tensión superficial y al coseno del ángulo de conjunción, e inversamente proporcionales a la densidad del líquido."

Las rocas y morteros presentan radios muy pequeños. No es extraño observar patologías de humedades en edificios antiguos que ascienden varios metros a través de los morteros de cal. La altura que alcanza el líquido no depende de su viscosidad, pero sí condiciona la velocidad del ascenso. Suponiendo que lo hace en régimen laminar, viene dado por la ley de Poiseuille.

Ley de Thompson:

Describe la difusión del vapor a través de los capilares y está determinada por el gradiente de saturación en los mismos:

$$p'' = p' \left(\frac{s}{\rho RT} \right) = p' \left(\frac{2\sigma \cos \varphi}{r \rho RT} \right)$$

Donde:

p'' es la presión de saturación en el capilar

p' es la presión de saturación en el ambiente a la misma temperatura de p''

ρ es la densidad del agua.

σ es la tensión superficial líquido-vapor. en (N/m)

φ es el ángulo de contacto.

R es la constante del vapor de agua.

T es la temperatura absoluta.

La ecuación de Thompson muestra como la presión de saturación es menor en los capilares más pequeños, lo que fuerza la difusión de los más grandes hacia estos.

También se observa que la presión de saturación disminuye con la temperatura, lo que provoca la difusión hacia las zonas más frías. (ASHRAE 1997)

Si la presión de vapor en el ambiente está en equilibrio con la presión de saturación capilar entonces:

$$s = p \cdot R \cdot T \cdot \ln HR$$

Donde:

s es la succión capilar

HR es la humedad relativa

El flujo de agua en el capilar puede expresarse como función del gradiente de presión:

$$w_m = -k_m \frac{ds}{dx}$$

Donde:

w_m es el flujo de agua

k_m es el coeficiente de permeabilidad.

Influencia de la temperatura en el rendimiento de los paneles evaporativos:

Variación de la densidad:

Variación de la densidad del agua con la Temperatura, según datos (ASHRAE 1997).

Al aumentar la T^a , aumenta capilaridad. Con ello la superficie agua-aire y finalmente la tasa de evaporación.

Variación de la viscosidad:

Variación de la viscosidad del agua con la Temperatura, según datos (ASHRAE 1997).

En el caso de los paneles evaporativos, cuanto mayor sea la temperatura, menor será la viscosidad del agua de los depósitos, aumentando la capilaridad horizontal y vertical; con ello la superficie de contacto agua-aire y por tanto el enfriamiento evaporativo.

PSICROMETRÍA:

La psicrometría es la ciencia que estudia las propiedades del aire húmedo y su influencia a través de las propiedades termodinámicas del aire y el agua. (HYLAND et al. 1983b).

Temperatura de bulbo seco (K):

Es la temperatura registrada por un termómetro convencional.

Nomenclatura y unidades: Según cada autor las fórmulas pueden emplear grados Celsius o Kelvin. Especificándose en cada caso.

Los resultados obtenidos durante los ensayos se facilitan en (°C) para una mejor comprensión, realizándose las oportunas conversiones: $K = ^\circ C + 273,15$

La nomenclatura emplea "θ" para expresar la temperatura de bulbo seco ambiental (aire atmosférico inalterado). Para el resto de situaciones se emplea "T" tal y como aparece en el ASHRAE.

Presión sobre el nivel del mar en (kPa):

$$p = 101.325 (1 - 2,25577 \times 10^{-5} \cdot Z)^{5,2559} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

Z es la altura en (m) sobre el nivel del mar.

Z=667m en Madrid (NEILA 2004).

En los ensayos realizados, la presión es un dato obtenido por monitorización.

Ley de los gases ideales (R):

Si consideramos en aire húmedo como una mezcla de gases ideales, se cumple que:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

P es la presión en (Pa)

V es el volumen en (m³)

n es el nº de moles

R es la constante de los gases ideales= 8314,41 J/kg·mol·K (ASHRAE 1997)

T es la temperatura en (K)

Composición del aire:

El aire seco en ausencia de contaminantes está constituido los siguientes gases expresados en % de volumen (ASHRAE 1997):

78,084 Nitrógeno

20,9476 Oxígeno

0,934 Argón

0,0314 Dióxido de carbono

0,001818 Neón

0,000524 Helio

0,00015 Metano

0 a 0,0001 Dióxido de azufre

0,00005 Hidrógeno.

0,0002 de otros gases como el kriptón, xenón y ozono.

Ley de Gibbs-Dalton:

La presión ejercida por una mezcla de gases es la suma de las presiones que ejercen cada uno de ellos.

$$P_{AB} = P_A + P_B = \text{constante}$$

Contenido de humedad (W) (ASHRAE 1997)

También llamado *Relación de mezcla*. Es la proporción entre las masas de vapor de agua y de aire seco.

$$W = M_w / M_{as}$$

Equivale a la fracción molar x_w/x_a multiplicada por la proporción de las masas moleculares:

$$W = \frac{1 \text{ kg vapor de agua}}{1 \text{ kg aire seco}} = \frac{18,0158 \text{ moles de vapor de agua}}{28,9645 \text{ moles de aire seco}}$$

$$W = \frac{18,0158}{28,9645} \cdot x_w/x_{as} = 0,62198 x_w/x_{as}$$

$$W = 0,62198 \frac{P_w}{P - P_w} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

W es el ratio de agua por kg de aire seco en ($\text{kg}_w/\text{kg}_{as}$)

$(P - P_w)$ es la presión parcial del aire seco en (Pa)

P es la presión total en (Pa)

P_w es la presión de vapor en (Pa)

Aire seco:

Caso ideal en el que el aire no contiene agua alguna.

Aire saturado:

Composición del aire, para una presión y temperatura concretas, en la que no admite mas vapor de agua y cualquier exceso provocaría su condensación.

Humedad específica (q) (ASHRAE 1997)

Es la proporción entre la masa de vapor y la toda la masa del aire húmedo que lo contiene.

$$q = M_w / (M_w + M_a)$$

y puede expresarse como:

$$q = W / (1 + W)$$

Humedad absoluta (dv) (ASHRAE 1997)

También llamado *densidad de vapor*. Es la proporción de masa de vapor de agua por unidad de volumen.

$$dv = M_w / V$$

Humedad de saturación (W_s)

Es la masa de vapor de agua del aire húmedo saturado en proporción a la masa de aire seco a una presión y temperatura dadas.

Es la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener el aire. Depende de la presión y temperatura y alcanza valores que van desde cero para el aire seco, hasta un valor máximo por encima del cual, el agua que se añada al sistema permanecerá en estado líquido.

$$W_s = 0,62198 \cdot \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}}$$

$$W_s \text{ en } (\text{kg}_w/\text{kg}_{as})$$

Grado de saturación: (μ)

Es la cantidad másica de vapor de agua (W) contenida en el aire en relación a la que tendría si estuviera saturado (W_s) en las mismas condiciones de presión y temperatura.

$$\mu = W / W_s \quad (\text{MARDOMINGO 1998})$$

Donde:

W es la humedad absoluta.

W_s es la humedad de saturación.

Humedad relativa: (HR)

Es la razón entre la fracción molar del vapor de agua contenido en un aire y la fracción molar del vapor de agua si estuviera saturado a la misma presión y temperatura.

$$x_{ws} = P_{ws} / P \text{ (MARDOMINGO 1998).}$$

$$HR = x_w / x_{ws} = (P_w / P_{ws})_{p,T} \text{ (MARDOMINGO 1998) (ASHRAE 1997).}$$

Habitualmente se expresa porcentualmente como la relación de vapor y la presión de vapor si estuviera saturado a la misma temperatura:

$$HR = x_w / x_{ws} = (P_w / P_{ws})_{p,T} \cdot 100 \text{ (MARDOMINGO 1998).}$$

Presión parcial de vapor (P_w)

Es la presión que ejercería el vapor de agua contenido en un volumen de aire si extrajéramos el aire seco y dejáramos el vapor de agua. Varía con la temperatura (MARDOMINGO).

Despejando en la expresión de la humedad relativa obtenemos:

$$P_w = HR \cdot P_{ws}$$

Presión de saturación de aire húmedo: (P_{ws})

P_s es la presión de vapor de agua en aire saturado en (Pa).

Algunos sólidos pueden sublimarse. En el caso del hielo, dispone de su propia expresión. Para la fase gaseosa sobre el agua líquida válida entre 0 y 200 °C (HYLAND, WEXLER 1983b) es:

$$\ln(P_{ws}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6(\ln T) \text{ luego: } P_{ws} = e^{C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6(\ln T)}$$

Es prácticamente la del vapor de agua puro por lo que **$P_s \approx P_{ws}$** (ASHRAE 1997)

Donde:

$$C_1 = -5,8002206 \cdot 10^3$$

$$C_2 = 1,3914993$$

$$C_3 = -4,8640239 \cdot 10^{-2}$$

$$C_4 = 4,1764768 \cdot 10^{-5}$$

$$C_5 = -1,4452093 \cdot 10^{-8}$$

$$C_6 = 6,5459673$$

T es la temperatura en (K)

Temperatura de bulbo seco:

Temperatura del aire medida con un termómetro común en (K).

Temperatura termodinámica de bulbo húmedo (t^*):

Es la temperatura que alcanza un volumen de aire mediante enfriamiento adiabático hasta alcanzar la saturación. Todo el calor latente es proporcionado por el aire.

Es la temperatura registrada cuando se dispone una gasa constantemente humedecida alrededor de la sonda de temperatura.

Corresponde a un estado estacionario sin equilibrio con transmisión de calor y cambio de fase.

Para determinar el rendimiento de un sistema evaporativo es fundamental conocer la temperatura de bulbo húmedo, normalmente 1 o 2 °C por encima de la temperatura seca. La diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y el agua enfriada se denomina *aproximación o acercamiento*. Para el cálculo de torres de refrigeración se consideran valores de entre 3 y 6°C según el margen de seguridad deseado. (IDAE 2007).

Volumen específico del aire húmedo (v): (MARDOMINGO 1998)

Es el volumen que ocupa el aire húmedo por kilogramo de aire seco (m^3/Kg):

Se verifica que:

$$v = R_a T / (P - P_w) \text{ (MARDOMINGO 1998), (ASHRAE 1997).}$$

Donde:

R_a es la constante del aire seco ($J/Kg_{as} \cdot K$)

T es la temperatura en (K)

P es la presión en (Pa)

P_w es la presión parcial de vapor en (Pa)

Densidad del aire húmedo (ρ_h):

Es la suma de las masas de aire seco (m_a) más vapor de agua (m_v), dividida entre el volumen total de la mezcla (v_h).

$$\rho_h = \frac{\text{masa total}}{\text{Volumen total}} = \frac{m_a + m_v}{V_h} = (1/v)(1+W) \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

ρ_h es la densidad del aire húmedo en (kg/m^3)

v es el volumen específico del vapor de agua por kg de aire seco en (m^3/Kg)

W es la humedad absoluta en (kg_w/kg_{as})

Punto de rocío (t_d):

Es la temperatura de saturación del aire.

Entre 0 y 93°C puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$t_d = C_7 + C_8 \alpha + C_9 \alpha^2 + C_{10} \alpha^3 + C_{11} (P_w)^{0,1984} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

t_d es la temperatura de rocío en (°C)

$\alpha = \ln(P_w)$

P_w la presión de vapor en (kPa)

$C_7 = 6,54$

$C_8 = 14,526$

$C_9 = 0,7389$

$C_{10} = 0,09486$

$C_{11} = 0,4569$

Entalpía del aire húmedo (h)

Es la energía que contiene el aire a una presión y temperatura dadas. Su valor corresponde a la suma de las entalpías de los gases que lo componen. Suele definirse como la suma de entalpías del aire seco y vapor de agua:

$$h = h_{as} + W \cdot h_g$$

Donde:

h_{as} es la entalpía del aire seco en (kJ/kg)

W es la cantidad de vapor por kg de aire seco en $kg_v/kg_{a.s.}$

h_g es la entalpía del vapor en kJ/ kg_v

$W \cdot h_g$ es la entalpía del vapor de agua saturado a la temperatura de la mezcla. (kJ/kg)

Según el ASRAE:

$$h_{as} = C_{e_{as}} \cdot T$$

$C_{e_{as}}$ Es el calor específico del aire seco = 1,006 (kJ/kg)

$$h_g = \lambda + (C_{p_v}) \cdot T = 2501 + 1,805 \cdot T \quad (\text{kJ}/kg_v)$$

Donde:

λ : Es calor de vaporización a 0°C

C_{p_v} : Es el calor específico del vapor en (kJ/ $kg_v \cdot K$)

T es la temperatura de bulbo seco en (°C)

Entalpía del agua líquida (h_w)

$$h_w = 4,187 \cdot T_s$$

TRANSFERENCIA DE MASA:

Es la propagación de partículas en el seno de un fluido. Se produce mediante dos mecanismos: difusión y convección que presentan analogías con el intercambio de calor por conducción y convección respectivamente.

En el caso del aire húmedo, las moléculas de vapor de agua contenidas en el aire se desplazan para ocupar todo su volumen, hasta alcanzar la misma presión de vapor en todos los puntos. Si este aire se encuentra en reposo, el intercambio se produce lentamente de manera análoga a la transferencia de energía por conducción, pero en el intercambio convectivo, esta transferencia, ya sea de energía o masa, es mucho más rápida.

Transferencia de masa por difusión:

Es un proceso de naturaleza espontánea que esparce la materia en un medio compuesto de varios componentes sometidos a un gradiente de concentraciones. Se trata del movimiento individual de las partículas. La difusión tiende a homogeneizar las concentraciones desde las áreas de mayor concentración hacia las de menos.

Según la teoría cinética de los gases, el coeficiente de difusión aumenta con la temperatura y es inversamente proporcional a la presión.

Es el mecanismo predominante en la capa sublamina y en las proximidades de las superficies de los sólidos, donde la velocidad del fluido tiende a cero.

En materiales permeables como los ladrillos, el vapor se desplaza mediante este mecanismo. (MARTIN 2011).

Ley de Fick:

Debido al movimiento molecular que experimentan los gases, estos tienden a mezclarse hasta ocupar todo el volumen que los alberga hasta alcanzar presiones iguales. La difusión viene determinada por la ley de Fick:

Expresada en términos de masa:

$$J_B = -\rho D_v \cdot \frac{d(\rho_B/\rho)}{dy} \quad (\text{ASHRAE 1997}) \quad [\text{Repe}]$$

J_B es el flujo de masa $\equiv \rho_B(v_B - v)$ en $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$

$(v_B - v)$ es la velocidad del componente B en relación con la velocidad de la mezcla

v es la velocidad (máscica) en el eje y en (m/s)

Expresada en fracción molar tendríamos:

$$J_B^* = -C D_v \cdot \frac{d(C_B/C)}{dy} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

D_v es el coeficiente de difusión o difusividad de masa en (mm^2/s)

J_B^* es el flujo molar $\equiv C_B(v_B - v^*)$ en $\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$

v^* es la velocidad media molar, que representa la velocidad media de un grupo de partículas comprendidas en un pequeño volumen.

El signo negativo expresa que la transferencia de masa se realiza desde la región con mayor concentración hacia la de menor.

Difusión de un gas a través de otro en reposo:

$P_{AB} = P_A + P_B = \text{constante}$ (Ley de Gibbs-Dalton)

También:

$P/R \cdot T = (\rho_A/M_A) + (\rho_B/M_B) = \text{constante}$

Se cumple en el caso del vapor de agua y el aire siempre que el gradiente de temperaturas sea despreciable, teniendo que:

$P = P_{as} + P_w$

P es la presión atmosférica.

P_{as} es la presión ejercida por el aire seco.

P_w es la ejercida por el vapor de agua.

Difusión del vapor de agua a través de un medio poroso:

Viene determinada por una variación sobre la ley de fick:

$$W''_v = -\delta p \frac{dp}{dx} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

W''_v es la masa de vapor que se difunde por unidad de área y tiempo en (kg/(s·m²))

dp/dx es el gradiente de presión de vapor en (Pa/m)

δp es la permeabilidad al vapor en (kg/(s·m·Pa))

Difusión del agua líquida a través de un medio poroso:

Puede ser caracterizada como un fenómeno de difusión según la expresión análoga:

$$W''_l = -\rho D_l \frac{dp}{dx} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

W''_l es la masa de líquido que atraviesa el material por unidad de área y tiempo en (kg/(s·m²))

ρ es la densidad del líquido en (kg/m³)

D_l es la difusividad del líquido en (m²/s)

$\frac{dp}{dx}$ es el gradiente del contenido de humedad en (m⁻¹)

Flujo de humedad en estado líquido y gaseoso a través de un material higroscópico:

Experimentalmente resulta casi imposible distinguir el estado líquido o gaseoso fluyendo a través de un material higroscópico y por lo tanto se expresa con una fórmula que combina ambos en función del contenido de humedad y temperatura:

$$w_m = -D_w \cdot \frac{dm}{dx} - D_T \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{ASHRAE 1997})$$

Donde:

w_m es el flujo combinado de humedad en estado líquido y gaseoso.

D_w es el coeficiente de difusión a temperatura constante.

m es el contenido de humedad en (%).

x es el recorrido que realiza el flujo.

D_T es el coeficiente térmico de difusión de humedad para un contenido de humedad constante.

T es la temperatura absoluta.

D_w y D_T suelen ser función del contenido de humedad, y en menor medida, de la temperatura. Presenta interferencias en los cambios de material. Para calcular el flujo incluyendo las interfaces puede expresarse también como (ASHRAE 1997):

$$w_m = -k'_m \frac{ds}{dx} - D'_T \frac{dT}{dx}$$

Donde:

k'_m es el coeficiente de permeabilidad a la humedad

D'_T es el coeficiente térmico de difusión de humedad en ausencia de gradiente de succión.

Permeancia al vapor de agua (W_p)

Es la permeabilidad de un material de espesor conocido y puede definirse como la cantidad de vapor que atraviesa una superficie por unidad de superficie tiempo cuando se establece una diferencia de presión unitaria.

$$W_p = \frac{\delta p}{d}$$

Donde:

W_p es la permeancia en (kg/m·s·Pa)

δp es la permeabilidad al vapor en (kg/(s·m·Pa))

d es el espesor del material en (m)

Coefficiente de difusión al vapor de agua (μ):

También llamado factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, es un valor relativo que compara un determinado material con el aire y por tanto adimensional, al ser un cociente entre magnitudes con las mismas unidades.

$$\mu = \frac{\text{aire}}{\text{material}}$$

Transferencia de masa por convección:

Análogamente al transporte de calor, la transferencia de masa por convección se desarrolla en la capa límite definida por el gradiente de concentraciones. La transferencia se produce por el movimiento colectivo de las moléculas, aumentando con la turbulencia.

La igualación de concentración por convección es mayor que la de difusión. (MARTIN 2011).

Incluso las corrientes más pequeñas pueden transportar cantidades de vapor de agua mucho mayores que por difusión (ASHRAE 1997).

Al igual que en el intercambio de masa, podemos distinguir entre convección forzada producida por una fuerza externa, y natural como consecuencia de los cambios de densidad originados por las diferencias de concentración.

Movimiento del aire:

El movimiento de vapor de agua en el aire puede expresarse como:

$$w = W \cdot \rho \cdot v$$

Donde:

w es el flujo de vapor de agua por unidad de superficie.

W es la humedad absoluta.

ρ es la densidad del aire.

v es la velocidad del aire.

El aire en movimiento puede arrastrar cantidades mucho mayores de vapor de agua que el fenómeno de difusión. (ASHRAE 1997)

Difusión del vapor:

Para calcular la difusión de vapor de agua a través de un material nos apoyamos en la *Ley de Fick*:

$$w = -\mu \frac{dp}{dx}$$

Donde:

w es el flujo de vapor de agua por unidad de superficie.

p es la presión de vapor

x es la distancia sobre el recorrido del flujo.

μ es la permeabilidad al vapor de agua.

El flujo de vapor de agua por difusión es proporcional al gradiente de presión de vapor y prácticamente correlativo a la ecuación de transmisión de calor de Fourier. (ASHRAE 1997)

Es función de la humedad relativa y puede variar según la dirección del flujo dentro del material (CHANG et al. 1956). (BOMBERG 1989).

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO:

Dependiendo del uso de la compresión para el intercambio de calor podemos distinguir:

Enfriamiento por evaporación mecánica:

Mediante el uso de compresores mecánicos se somete a un gas refrigerante a sucesivos procesos de compresión y expansión que dan lugar a su condensación y evaporación, transfiriendo energía por gradiente térmico.

El trabajo a presión implica máquinas de cierta complejidad así como ruido, vibración, y consumo de electricidad para los compresores.

Este tipo de tecnología se caracteriza por el empleo generalizado de gases de efectos invernadero. En contrapartida, el contenido de agua en el aire no supone un límite al enfriamiento que puede proporcionarse al mismo.

Enfriamiento por evaporación adiabática:

El aire se hace circular en contacto con el agua y el enfriamiento se hace a costa del cambio de estado del agua. El contacto aire-agua puede realizarse mediante superficies húmedas denominadas *rellenos*: Espumas, matrices porosas, paneles textiles, plásticos, metálicos, etc. O sin soporte, mediante goteo, nebulización, micronización etc. del agua, aumentando enormemente la superficie de contacto.

Pueden distinguirse dos tipos de sistemas y algunas máquinas pueden combinar ambos:

Enfriamiento evaporativo directo:

Es el que aprovecha para la climatización el aire que ha entrado en contacto directo con el agua. Este aire ha recibido un aporte de masa en forma de vapor de agua. La principal consecuencia es un aumento de la humedad relativa afectando al confort. Están indicados para climas muy secos. No debe de recircularse el aire de la zona climatizada o este acabaría saturándose, impidiendo cualquier enfriamiento y resultando incómodo para las personas.

En los sistemas más complejos, la entrada del aire exterior se realiza de manera forzada mediante ventilación mecánica, mientras que en los más sencillos se confía en la presencia de viento o unas diferencias de presión suficientes para hacer circular el aire. En cualquier caso es necesario resolver el problema de la entrada de insectos, partículas y ruido.

Enfriamiento evaporativo Indirecto:

No introduce el aire húmedo en la zona habitada. El intercambio térmico no implica intercambio de masa (vapor de agua). El rendimiento generalmente es menor y requiere de un proceso más complejo que los sistemas directos al incluir algún tipo de intercambiador de calor, ventiladores secundarios etc., pero tienen la ventaja de mantener las condiciones de confort higrométricas a lo largo del tiempo.

Algunas máquinas pueden combinar ambos sistemas apareciendo términos como "*semi-indirecto*" para lograr un mayor enfriamiento a costa de introducir cierto grado de humedad.

Eficiencia del sistema:

(GHIABAKLOU et al. 1996) establece la eficiencia en relación a varios parámetros (Prandlt etc.) La más relevante para esta investigación, por su capacidad de demostrar las ventajas de la geometría diseñada y material poroso empleado en los prototipos, sería la *Eficiencia de saturación*:

Se define como la capacidad del sistema de aportar humedad al aire. Alcanzando el máximo cuando lo satura:

$$E_{\text{sat}} = \frac{T_{\text{ex}} - T_p}{T_{\text{ex}} - T_{\text{t*ex}}}$$

Donde:

E_{sat} es la eficiencia de saturación.

T_{ex} es la temperatura de bulbo seco a la entrada del sistema.

T_p es la temperatura de bulbo seco a la salida del sistema.

T_{t*ex} es la temperatura termodinámica de bulbo húmedo que entra en el sistema.

La misma fórmula ha sido empleada por (SANTAMOURIS et al. 1996), (QIU et al. 2006).

Pudiendo alcanzarse el 90% para el enfriamiento evaporativo directo y del 70 al 80% para el indirecto según (CAMARGO et al 2003), (QIU et al. 2006).

Flujo de calor sensible o "*potencia sensible*" :

Energía asociada a la variación de temperatura de aire exterior a su paso por el prototipo.

$Q_s = \dot{m} \cdot C_e (T_{ex} - T_{p1,p2})$ Adaptación de la metodología de (FLORES et al. 2011)

Donde:

Q_s : Potencia sensible de refrigeración (W)

$\dot{m}$: Flujo másico de aire. (kg/s)

C_e : Calor específico del aire a presión constante. (J/kg °C)

T_{ex} : Temperatura del aire a la entrada (exterior) en (°C).

$T_{p1,p2}$: Temperatura del aire a la salida (alveolos P1 y P2 respectivamente) en (°C).

Flujo de calor latente o "*potencia latente*":

Energía asociada a la variación de las propiedades psicrométricas del aire exterior a su paso por el prototipo.

$Q_l = \dot{m} \cdot \Delta h$

Donde:

Q_l : Potencia latente de refrigeración (W).

$\dot{m}$: Flujo másico de aire. (kg/s)

$\Delta h_{p1,p2}$ es la variación de entalpía a su paso por los alveolos de los prototipos P1 o P2 respectivamente.

Flujo de calor total recuperado o potencia total:

Es el resultado de la suma de las potencias sensibles y latentes. Proporciona la transferencia de calor y masa global involucrados en el proceso.

$Q_t = Q_s + Q_l$

PRESENCIA Y RIESGOS DE LA LEGIONELLA EN LOS SISTEMAS EVAPORATIVOS:

El ambiente o lugar de origen del agente infectante se llama *reservorio*. Los agentes de transmisión que transportan el microorganismo hasta el huésped se llaman *vectores* si son organismos vivos y *fómites* o *vehículos* si se trata de elementos inertes. (FORBES et al. 2009). La familia *Legionellaceae* comprende únicamente el género *Legionella* con 48 especies y 78 serogrupos. La mayor parte asociadas a enfermedades humanas. La *L. pneumophila* es la forma de bacteria que más frecuentemente ha sido aislada en pacientes. (VARÓ et al. 2010). Su tamaño es de 0,3 x 0,9 micras (10^{-6} m). Es capaz de vivir intracelularmente parasitando microorganismos presentes en el agua. La transmisión es por medio de aerosoles que se aspiran. El riesgo aumenta de forma inversamente proporcional al tamaño de la gota, siendo las más pequeñas a 5mm las que llegan a los alveolos pulmonares (VARÓ et al. 2010). El microorganismo sobrevive la acidificación al ser fagocitado por los macrófagos alveolares y se multiplica en su interior. (FORBES et al. 2009). Su supervivencia en el aire es corta debido a la poca resistencia que presentan a la desecación y a los efectos de la radiación ultravioleta. (HERNÁNDEZ 1999)

Los factores que colaboran en el desarrollo de la bacteria son:

- Temperatura entre 35 y 46 °C
- HR (>65%)
- Nutrientes: Fe y N.
- Presencia de corrosión
- Presencia de otros microorganismos (amebas, algas y bacterias) que den lugar a la formación del biofilm.

La formación del biofilm se ve condicionado por:

- Existencia de nutrientes orgánicos
- Material
- Propiedades del agua (PH, dureza, sales)
- Eficiencia del desinfectante
- Temperatura elevada.
- Tiempo de retención del agua.

Entre las consecuencias del biofilm destacan: (VARÓ et al. 2010).

- Reducción de la transferencia calorífica
- Reparación de microorganismos
- Resistencia a la desinfección producida por los patógenos supervivientes.

Desinfección: (VARÓ et al. 2010).

- Antibióticos: Rifampicina, macrólidos (eritromicina, claritromicina).
- Desinfectantes: Hipoclorito sódico (1%), Etanol (70%) Formaldehído (1%).
- La efectividad de la desinfección con cloro depende del PH del agua, es máxima a PH neutro o por debajo de 7,0 y disminuye a medida que el PH supera el 8,0.

El RD 1620/2007 de 7 de diciembre establece el régimen jurídico para la reutilización de aguas depuradas. Se define como aguas regeneradas las aguas residuales depuradas que han sido sometidas a un tratamiento que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

Para usos industriales relacionados con torres de refrigeración y condensadores evaporativos, El agua no puede contener patógenos o *Unidades formadoras de colonias* (UFC), mientras que para otros usos de carácter urbano como el riego de jardines o descarga de aparatos sanitarios, se permiten hasta 100 UFC/L.

(VARÓ et al. 2010).

El Real Decreto 865/2003 por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. E incluyen como "*instalaciones de menor probabilidad de proliferación y dispersión de la Legionella*" a los equipos que pulvericen agua. (MSSSI). La *Legionella* es una bacteria anaerobia (respira oxígeno). Puede colonizar desde aguas superficiales hasta las redes de suministro de las ciudades. La máxima mortalidad se alcanza en sujetos inmunodeprimidos. (MARTINEZ 2011).

Temperatura media de algunas instalaciones y su efecto sobre la Legionella. Centro Nacional de Microbiología. ISCIII.

Por debajo de 20 °C La bacteria puede sobrevivir, pero estará aletargada (VARÓ et al. 2010). Si bien es capaz de sobrevivir en un amplio rango de condiciones físico-químicas, es sensible a la radiación ultravioleta y la desecación. Se multiplica en el interior de amebas o formando parte de biocapas. Como el contagio sólo sucede por vía respiratoria, una gota contaminada ha de ser inhalada. No habiendo evidencias de transmisión por ingestión o contacto. (INSHT 2012). Por tanto los sistemas evaporativos sin arrastre de gotas pueden llegar a contener la *Legionella*, pero no causar una infección.

PRECEDENTES HISTÓRICOS DEL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO:

El enfriamiento evaporativo está entre los primeros sistemas de refrigeración empleado por la humanidad. Los egipcios aprovechaban la porosidad de la cerámica para disponer de agua fresca para el consumo hacia el 2500 AC. La refrigeración de sus palacios se lograba igualmente mediante jarras de cerámica gracias a esclavos que las abanicaban manualmente. También empleaban esteras humedecidas en puertas y ventanas cuando soplab el viento. (MUSA 2008). En India se empleaban de manera similar balas de un tipo de hierba llamada *khus* (CHANDRA 2010).

Muscata: Fuente (SCHIANO-PHAN 2004).

La muscata de oriente medio consiste en un recipiente de cerámica porosa, dispuesto en una ventana y protegido de la radiación solar mediante aleros y celosías. La evaporación del agua contenida en el interior refresca el aire. La entrada de este aire se realiza tanto por la ventana situada tras el recipiente como la celosía de que podía disponer el muro en su parte inferior, mientras que la salida ocurría por estratificación térmica en el extremo superior.

Los persas disponían de fuentes y desarrollaron *Malqaf* o "torres de viento". Unas estructuras cuya finalidad era captar las brisas más alejadas de la superficie recalentada del suelo e introducirla en el interior de las estancias de las plantas situadas en la parte baja de los edificios. Su origen se remonta al menos al 2000 AC donde aparecen representadas en las inscripciones de tumbas egipcias y han evolucionado en la región desde El Cairo hasta Afganistán. Durante la era Qajar (1781-1925) se combinaron con el enfriamiento pasivo en la zona central de Persia. (COLES 2007).

Malqaf con vasija cerámica y deflectores humedecidos según Hassan Fathy. Fuente: Biblioteca de naciones unidas.

El aporte de agua se realizaba mediante vasijas porosas cerámicas, láminas de agua y/o una serie de deflectores que recogía el polvo del desierto al tiempo que podían albergar carbón vegetal humedecido. El carbón se retenía entre mallas metálicas superiores y planchas inferiores. Cualquier excedente de agua era recogida por medio de goterones en la parte inferior de la torre. Otro de los elementos empleados para el enfriamiento evaporativo era el *salsabil*, Se trataba de losas de mármol dispuestas en el nicho de la base de la torre y apoyadas contra la pared. Se decoraban con bajorrelieves con motivos relacionados con al aire y el agua por los que ésta discurría, aumentando la superficie de contacto y por tanto el enfriamiento evaporativo. (FATHY 1986).

En la zona del golfo pérsico las tipologías locales son los *badgir* y *khishkhan*. Los *badgir* son torres caracterizadas por tener el conducto vertical dividido en cuatro partes permitiendo captar las brisas dominantes, hacerlas descender hasta la estancia para volver a salir al exterior por la cara opuesta de la torre. Su inercia térmica permitía la ventilación en ausencia de viento, gracias al efecto de tiro térmico (ALLARD 1998). Los *khishkhan* son cúpulas que permiten tanto la ventilación como la iluminación. El enfriamiento evaporativo se realizaba mediante un entramado de madera, arcilla o plantas secas humectadas a lo largo del flujo de aire (HENSEL et al. 2012).

Los *qanat* son galerías subterráneas que interceptan un curso o nivel freático conduciendo el agua mediante una suave pendiente para ser distribuidos hacia cisternas y edificios mediante canales secundarios llamados *kariz*. Datan aproximadamente del 1000 AC (WULFF 1968) y se extendieron desde la antigua Persia hacia Afganistán, China, Norte de África, el mediterráneo y España bajo el nombre de "*viajes del agua*" (BUSTAMANTE et al 2004). Los más largos, de hasta 70 Km se encuentran en la región de iraní de Kerman. (HENSEL et al. 2012).

El enfriamiento evaporativo podía lograrse mediante la circulación de aire al través del espacio entre el agua y la parte superior del conducto. Para extraer este aire más frío y denso e introducirlo en las viviendas, era necesario crear una fuerza de succión mediante chimeneas o aperturas con efecto Venturi. (KAVEH et al. 2013).

Las *ab-anbar* o cisternas recogían el agua de los *qanats* o de las lluvias esporádicas y torrenciales de la meseta iraní. Para ayudar a mantener el agua fresca podían ser

subterráneas, cubriéndolas mediante bóvedas de fábrica. Se empleaban *ajor ab anbari*, un tipo especial de ladrillos y *sarooj*, un mortero a base de cal, arcilla, arena, clara de huevo, pelo de cabra y cenizas en una proporción que dependía del clima. El agua recogida en invierno a pocos grados sobre cero, se mantenía fresca gracias a torres de viento que circulaban el aire sobre la superficie del agua proporcionando un enfriamiento evaporativo.(HENSEL et al. 2012).

Griegos y Romanos colocaban balas de paja humedecida en las ventanas para disminuir la temperatura de las estancias. Aristóteles escribió el primer tratado sobre meteorología y evaporación, relacionándolo con el calor del sol (MOHAN et al. 2009).

Los árabes perfeccionaron la refrigeración de patios mediante fuentes, láminas de agua y recondujeron el viento alrededor de tinajas cerámicas llenas de agua dispuestas en *torres de viento* o en las ventanas (GUT et al 1993). Leonardo Da Vinci escribió a finales de la década de 1400 sobre la relación entre la vida, la luz, el calor y el movimiento del vapor. (MOHAN et al. 2009) e inventó un sistema de refrigeración para el duque de Milán (THEVENOT et al. 1979).

El uso de sábanas humedecidas fue un recurso popular hasta la aparición de la energía eléctrica.

Los primeros ventiladores mecánicos datan del siglo XVI y las primeras torres de refrigeración para la industria aparecieron a principios del S XIX. (MUSA 2008).

Bolsa de agua del desierto, fabricada por Boise Cascade Textile Division. F: Lloyd & Barney, <www.Etsy.com>.

Bolsas de agua: Similares a las "botas" españolas, fueron populares en el oeste Norteamericano y Canadá, pero empleando telas como lino o lona en lugar de piel. La impermeabilización podía mejorarse con ceras o grasas animales. Al humedecer su exterior, se lograba el enfriamiento indirecto del contenido. Desaparecieron a mediados del SXX.

Thermador Car Cooler. F: Doug Coldwell (2009).

Los automóviles incorporaron el enfriamiento evaporativo durante décadas. Aprovechaban el movimiento del vehículo o disponían un ventilador para asegurar la circulación del aire según cada fabricante. El sistema se hizo popular en el suroeste de Estados Unidos entre 1930 y 1960. Algunos modelos emplearon bandejas de madera para el intercambio evaporativo. (HINCKLEY 2005).

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN LA ACTUALIDAD:

"Pot-in-pot" Mohammed Bah Abba. Nigeria. (1990).

Se trata de un sistema de enfriamiento evaporativo directo a base de cerámica destinado a la preservación de alimentos en países en desarrollo donde el acceso a la electricidad o a la tecnología de refrigeración que funciona con ella, no está disponible.

El sistema, que parte de modelos del antiguo Egipto, funciona mediante dos recipientes cerámicos concéntricos entre los que se dispone un relleno de arena que se humedece. La evaporación de la capa exterior mantiene fresco el contenido del recipiente interior. La apertura superior se cubre con un simple paño.

Hidrogenfriadoras:

Se trata de máquinas enfriadoras mediante inmersión, baño, riego pulverización o nebulización de agua; habitualmente empleadas para el enfriamiento de vegetales.

Cuando una lámina de agua fluye uniformemente sobre la superficie de un cuerpo templado, la temperatura del agua y la superficie del cuerpo se igualan.

La cantidad de energía intercambiada (Q) es directamente proporcional a la superficie, el coeficiente de transmisión de calor (h), la superficie (A) y la diferencia de temperatura entre el objeto y el aire (ΔT). Con velocidades suficientes del fluido, como por ejemplo por gravedad o mediante convección forzada, la resistencia térmica superficial es despreciable y el calor del cuerpo a enfriar, es extraído a medida que se conduce hasta la superficie. En la mayoría de alimentos, el gradiente térmico en la superficie es aproximadamente de $0,5K$ (ASHRAE 1998).

En un hidrogenfriamiento ideal, el coeficiente de transferencia de calor de la superficie se aproxima a los $680 \text{ W/m}^2\cdot K$ y la diferencia de temperatura en la capa límite está en torno a $0,4K$, por lo que el enfriamiento por unidad de superficie será $h=680 \text{ (W/m}^2\cdot K) \cdot 0,4K=270 \text{ W/m}^2$ (ASHRAE 1998).

Las torres de refrigeración evaporativas de funcionamiento evaporativo podrían considerarse evolución de los *Malqaf*. funcionan mediante la micronización de agua creando una corriente de aire frío y húmedo que desciende sobre los espacios a climatizar. No precisan de ningún sistema para mover el aire, tan solo una bomba para elevar el agua hasta el extremo superior la torre (BOWMAN et al. 1998), (FORD 2002), (CHAKRABORTY et al 2005).

Torre de viento del Instituto Masdar. F: Javier García López (2014).

ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO EN FACHADAS:

Clasificación de los sistemas de enfriamiento evaporativo:

La gravedad condiciona la presencia del líquido a evaporar, generalmente agua, en un plano vertical. En este sentido se propone clasificar los sistemas conocidos en: **Fluyentes**, para aquellos que no retienen el agua en el plano vertical y **acumuladores**, que cuentan con depósitos o sistemas equivalentes de retención.

En función de su funcionamiento directo o indirecto se tiene por tanto las siguientes posibilidades, representadas por sus correspondientes esquemas:

	Directo	Indirecto
Fluyente		
Acumulación		

Clasificación de los sistemas de enfriamiento evaporativo.

En los sistemas fluyentes, la evaporación se produce por contacto directo entre el agua y el aire. Pueden disponer de una superficie de soporte sobre la que fluye el agua, o no, por ejemplo mediante el goteo libre, micronización, etc. La función del soporte, en caso de haberlo, es aumentar la superficie de contacto agua-aire. Las ventajas frente a los sistemas con acumulación son el ahorro en peso y las escasas limitaciones de los soportes o rellenos, que solo deben de ser resistentes al contacto con el agua.

Sus desventajas son: La necesidad de un suministro constante que además ha de ajustarse a las variables climáticas en cada instante, ausencia de inercia térmica, ruido continuo del agua al fluir o gotear, vulnerabilidad al viento que puede dispersar el agua y propagar infecciones contraídas a través de la inhalación del agua contaminada como la Legionella.

Los sistemas con retención han de solventar el contacto del agua con el aire para lograr la evaporación. El método conocido es que los depósitos cuenten con una membrana o pared porosa que permita la evaporación a través suya.

Las ventajas de los sistemas con retención son: Mayor inercia térmica, no precisan de un suministro constante, lo que implica menor necesidad de bombeo, menor o nula recirculación del agua y operan de forma más autónoma, adecuando su consumo de agua a la demanda producida por las condiciones exteriores.

Sus desventajas: Su peso se incrementa proporcionalmente al agua retenida. Los depósitos o su equivalente, precisan de materiales más específicos que los sistemas fluyentes, al tener que soportar el agua, la presión hidrostática y permitir la evaporación a su través.

Materiales de los depósitos:

Los materiales conocidos para esta función son: textiles, cerámicos o geles; sin que se tenga constancia del uso de morteros. Tanto los materiales cerámicos como los morteros pueden contar con una red capilar en su estructura interna que colabore en la evaporación. En ella, el agua discurre lentamente en todas direcciones gracias a la tensión superficial entre el agua y el material, pudiendo incluso ascender por las paredes del depósito y superar el nivel del agua, aumentando la superficie evaporativa.

Precedentes:

A continuación se recogen los precedentes, ya sean sistemas, prototipos o investigaciones analizados para la elaboración de la hipótesis del sistema para fachada evaporativa:

Resumen:

Nombre	Año	Clasificación
"A passive evaporative cooling system by natural ventilation"	1996	Fluyente Directo
Pabellón de Holanda. MVRDV. Expo de Hannover	2000	
"SGMs: Soportes generadores de microclimas". Expo de Zaragoza.	2008	
"Cool Brick"	2015	
"Pared de agua". Expo de Sevilla	1992	Fluyente Indirecto
"Geomoss", "Atlas House". ETSA UPV. Solar decathlon.	2010	
"Fachada ventilada con sistema de enfriamiento evaporativo"	2012	
"Casa Patio" 2.12 Andalucía Team. Solar decathlon.	2012	
"Sistema Kaikaku"		
"Evapcool" WSP ENVIRONMENTAL LTD, Universidad de Nottingham.		Acumulación Directo
"Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application"	2003	
"Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler".	2005	
"REC: Refrigerador evaporativo cerámico" Universidad de Valladolid	2008	
"PECW: Passive evaporative cooling wall"	2008	
"Ecooler"	2010	
"Experimental and Numerical Study of a Heat Pipe Based Indirect Porous Ceramic Evaporative Cooler"	2015	

"Cold Spot"	2015	
"Gres-Bot. Cerámica bioclimática"	2007	Acumulación Indirecto
"Cerramiento térmico industrializado de fácil montaje" Universidad de Alicante	2009	
"Placa Cerámica Evapotranspiradora para Edificios en Climas Cálidos" Universidad de Sevilla	2012	
"Aislater"	2013	
"Hidrocerámica"	2014	

Sistemas fluyentes de enfriamiento evaporativo directo en fachadas:

"A passive evaporative cooling system by natural ventilation" GHIABAKLOU Z., BALLINGER J. A. Irán. (1996).

Imagen: GHIABAKLOU et al. (1996).

Propone y parametriza un sistema de enfriamiento evaporativo pasivo directo para fachadas mediante goteo a lo largo de cables verticales. El sistema recoge el excedente de agua en su extremo inferior y lo bombea de nuevo hasta las boquillas dispuestas sobre el extremo superior de los cables. (Ghiabaklou et al. 1996) establece una serie de parámetros para determinar la eficiencia de su propuesta. En 2003 amplía el estudio de su sistema de goteo.

Ventajas:

Economía de instalación y mantenimiento.

Ligereza de la solución constructiva.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.

No incorpora sombreado, reduciendo la eficiencia.

El agua queda expuesta directamente a la luz solar con el riesgo de crecimiento de algas y otros microorganismos.

Vulnerabilidad al viento que puede convertirlo en un vehículo de epidemias.

Precisa de un suministro continuo de agua con recirculación de la misma mediante un sistema de bombeo.

Carece de inercia térmica.

Pabellón de Holanda. MVRDV. Expo de Hannover (2000).

Imagen: <http://en.wikiarquitectura.com>

El pabellón contaba con sistemas de acondicionamiento climático basados en el uso del agua. Entre los sistemas de enfriamiento evaporativo directo estaban: Micronización de espacios, cortinas de agua en fachada que fluían sobre cables así como fuentes y láminas de agua en cubierta.

Esquemas de funcionamiento de sistemas bioclimáticos. Imagen: <http://bp.blogspot.com>

"SGMs: Soportes generadores de microclimas". Pabellón de España en la Expo Zaragoza MANGADO F. (2008)

Los SGMs actúan como colchón térmico en el perímetro de la edificación empleando el enfriamiento evaporativo directo. El sistema se combina con una lámina de agua perimetral que cuenta con un sistema de aprovechamiento de pluviales.

Pabellón de España en la Expo Zaragoza.

Imágenes:

Pilares forrados de piezas cerámicas, detalle de junta entre dos piezas cerámicas y detalle de pilar metálico sin forrar en el que se aprecia el sistema constructivo de sujeción.

Fotografías: Fuente propia.

El perímetro del edificio cuenta con una serie de pilares metálicos que nacen de la lámina de agua y están forrados por una serie de piezas cerámicas que proporcionan sombra a la fachada oeste.

La cerámica en contacto con el agua se humecta por capilaridad. Las limitaciones de altura que presenta la fabricación de las piezas implica que solo la primera pueda actuar de este modo. Precizando un sistema de bombeo para llevar el agua a las piezas superiores.

La humectación de los pilares cercanos al acceso se lleva a cabo mediante agua vaporizada desde su interior (MARTÍN et al. 2009).

"Cool Brick" SAN FRATELLO V., RONALD RAE R. (2015).

Mampuesto para enfriamiento evaporativo directo, fabricado mediante impresión tridimensional a base de cerámica porosa, caracterizado por formar una estructura abierta que puede ser humedecida desde su extremo superior, enfriando el aire que ingresa en el edificio.

Las piezas son recibidas con mortero para formar un plano.

Imagen: "Data Clay: Digital Strategies for Parsing the Earth"

Ventajas:

Su plano exterior presenta entrantes y salientes que le permite sombrearse a sí misma. La Incorporación de apantallamiento solar incrementa el gradiente térmico.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.

La densidad de la trama hace necesario la impulsión forzada del aire a través de la matriz con el consiguiente peligro de dispersión de gotas lo que puede convertirlo en un vehículo de transmisión de epidemias.

Precisa de un suministro continuo de agua con recirculación de la misma mediante un sistema de bombeo.

El sistema de unión de piezas mediante mortero complica la circulación descendente del agua entre las distintas piezas así como sustituciones parciales.

Carece de inercia térmica.

Sistemas fluyentes de enfriamiento evaporativo indirecto:

"Pared de agua". Expo de Sevilla (1992)

La exposición universal de Sevilla 92' contó con un amplio abanico de medidas de climatización basadas en el enfriamiento evaporativo tanto pasivas (láminas de agua), como activas (pulverización y empapado) orientadas en su mayoría a la mejora de las condiciones de los espacios públicos. La medida de mayor interés para el estudio de las envolventes con enfriamiento evaporativo fueron las láminas verticales, de carácter fluyente según la clasificación propuesta, en las que el agua discurría sobre fachadas de vidrio.

(GUERRA et al. 1995).

Ventajas:

Además del enfriamiento evaporativo hay que señalar la capacidad del agua de absorber el espectro infrarrojo; colaborando en la mejora del confort térmico de carácter radiante así como lumínico por la dispersión de la luz debida a la falta de planeidad del agua en la cara exterior.

Inconvenientes

Ruido, necesidad de bombeo, Incrustaciones. La exposición del agua a la luz favorece la propagación de algas y la contaminación por partículas.

"Geomoss". DÍEZ A., CHAPARRO I., GARCÍA B., GOZALO J. *"Atlas House"*. Solar decathlon. ETSA UPV. España. (2010).

(DÍEZ et al. 2010)

Panel de fachada vegetal como propuesta para vivienda sostenible. El sistema es modular, de fácil montaje mediante raíles de aluminio y clipado. El suministro de agua se realiza desde un tubo de goteo en el extremo superior.

El musgo que crecería en la fachada colaboraría en la depuración de gases contaminantes (CO_2 , NO_x etc.) transformándolos en oxígeno. Aunque no se especifica, el sistema contempla una variación estética de carácter estacional.

Ventajas:

Contempla la incorporación de vegetación para la reducción de contaminantes atmosféricos.

Inconvenientes:

No incorpora sombreado, reduciendo la eficiencia.

Precisa de un suministro continuo de agua con recirculación de la misma mediante un sistema de bombeo.

Carece de inercia térmica.

"Fachada ventilada con sistema de enfriamiento evaporativo" BANNIER E, CANTAVELLA V, BOU E, CASTELLANO J. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I (UJI). Castellón, España. (2012).

Sistema de enfriamiento evaporativo indirecto fluyente con recirculación de agua mediante bombeo.

Propone como solución óptima una cortina fluyente de agua sobre la cara exterior de la hoja interior de una fachada ventilada. Estimando un sobrecoste de 1,3 a 1,6 €/m² sobre el sistema convencional de fachada ventilada. (BANNIER et al. 2012).

Esquema general de la fachada ventilada con sistema de enfriamiento evaporativo Imagen: (BANNIER et al. 2012)

Para el ensayo se realizó un prototipo sobre el cual se construyó un sistema de recirculación de aire. Las condiciones iniciales de humedad relativa eran controladas mediante un mezclador y un calefactor que impulsaba el aire sobre la pieza cerámica porosa empapada por capilaridad, obteniendo un enfriamiento evaporativo.

Esquema del prototipo para estudiar el enfriamiento evaporativo. Imagen: (BANNIER et al. 2012).

"Casa Patio" 2.12 Andalucía Team. Solar decathlon. Madrid. España (2012).

Panel de enfriamiento evaporativo indirecto para fachada a base de cerámica porosa extrusionada. La humectación se realiza mediante un sistema de manguitos que gotean sobre el canto de las piezas. La superficie exterior presenta una textura acanalada que aumenta la superficie de evaporación.

Ventajas:

Incremento de la superficie evaporativa mediante una geometría acanalada.

Inconvenientes:

No incorpora sombreadamiento, reduciendo la eficiencia.

Precisa de un suministro continuo de agua con recirculación de la misma mediante un sistema de bombeo.

Carece de inercia térmica.

"Sistema Kaikaku", España.

Hoja interior de fachada a base de ladrillo cerámico extrusionado de gran formato en el que sus huecos exteriores disponen de mayor tamaño para permitir la ventilación. Opcionalmente propone un sistema de riego por goteo en la coronación del muro para el enfriamiento evaporativo indirecto de su cara exterior. (KAIKAKU).

<http://kaikaku.es>

Sistemas con acumulación de enfriamiento evaporativo directo:

"Evapcool" WSP ENVIRONMENTAL LTD, Universidad de Nottingham. Reino Unido.

Panel evaporativo directo a base de cerámica del que se han presentado varias variantes: Una apilada y otra colgante. Las secciones propuestas incorporan baterías de paneles en fachada o lucernarios. El llenado se realiza por gravedad y se fuerza la circulación del aire mediante extractores (MUSA 2008).

Con los datos obtenidos de los prototipos fabricados se ha estimado que podrían a mantener la temperatura de una oficina en Teherán a 26°C el 85% del tiempo, ahorrando 32-42KWh/m² con un consumo de 5litros/persona y día. La altura idónea para sus paneles sería 0,2m. El equipo que ha presentado la patente en Inglaterra busca desde 2004 su implantación en zonas áridas como Irán, pero al mismo tiempo tratan de abrir mercado en el sur de España y Grecia dentro del programa PHDC (*Promotion and Dissemination of Passive and Hybrid Dwindraught Cooling in Buildings*) que abarca diversos estudios de tecnologías de bajo impacto ambiental en varios continentes. (PHDC 2008) (WSP Environmental et al. 2003). (BOWMAN et al. 1998) en edificios residenciales como no residenciales, incluyendo actuaciones en inmuebles históricos (FORD, 2002).

En el modelo de pared hueca contempla asimismo el aislamiento en ambas caras de la pared hueca, con un ahorro estimado del 12% para las cargas de calefacción, equivalentes a 18,5 Toneladas de CO₂ (SCHIANO-PHAN 2004).

Ventajas:

Disposición en el interior de otros elementos de envolvente que proporcionan sombreado.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.

La geometría lisa y prismática de los paneles limita la superficie evaporativa reduciendo su eficiencia.

El sistema apilado no facilita la sustitución individual de un elemento.

"Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application" IBRAHIM E., SHAO L., RIFFAT S. B. Nottingham, Reino Unido (2003).

Evaporador poroso cerámico (IBRAHIM ET AL. 2003).

Prototipos cerámicos de diferentes porosidades para enfriamiento evaporativo directo dispuestos en una cámara de ensayo. Obteniendo mayores rendimientos con los materiales

más porosos. Los gradientes térmicos obtenidos oscilan entre 6-8K incrementando la humedad relativa del aire recirculado en un 30% y obteniendo una potencia evaporativa máxima de 224 W/m².

"Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler".
VELASCO E., REY F.J., VARELA F., MOLINA M.J., HERRERO R. (2005).

Imagen: (VELASCO et al. 2005).

Prototipo de tubos cerámicos para enfriamiento evaporativo semi-indirecto dispuestos al trespelillo sobre una placa perforada. La porosidad del material implica intercambio de calor y masa. Los ensayos se sirven de una torre de refrigeración auxiliar para establecer diferentes condiciones en una habitación de control. Las condiciones ensayadas simulaban climas tropicales y veranos e inviernos continentales. Dependiendo de las condiciones del aire, los tubos actúan como intercambiadores de calor sensible o entálpico.

"REC": Refrigerador evaporativo cerámico. FLORES F. Universidad de Valladolid, España. (2008).

Imagen: (FLORES et al. 2011).

Ensayo evaporativo sobre ladrillo hueco sencillo, sellado en su base y relleno con agua. Su objetivo es servir de apoyo a los sistemas todo-aire y la reducción de su consumo. La metodología incluye la recirculación del aire a través de una unidad de tratamiento de aire, donde se monitoriza un caudal con temperaturas entre 20 y 40 °C y humedades relativas entre el 12 y el 85%. Posteriormente se fuerza su paso a través de los ladrillos y finalmente pasa a una torre de condensación de tubos de calor que operan con acetona. Para determinar la eficiencia del sistema se controla la humedad específica del aire primario antes y después de circular entre los ladrillos.

El agua circula a través de los ladrillos para ser recogida posteriormente en una bandeja inferior y recirculada.

La potencia refrigerante se determina por la suma de las variaciones de calor sensible y latente del caudal de aire.

Al disponer de un entorno controlado, se realizaron variaciones independientes de temperatura, caudal y humedad específica, determinando la influencia de cada una de ellas. Según (WANG 2000) la eficiencia de saturación de sistemas evaporativos directos se encuentra habitualmente entre 0,75 y 0,95 y entre 0,6 y 0,8 para los indirectos.

Ventajas:

Aprovechamiento de piezas y sistemas de producción existentes.

Inconvenientes:

La pieza empleada es un paralelepípedo con escasas estrías lo que limita la superficie evaporativa.

El empleo de un material fabricado mediante extrusión limita la geometría que puede crearse y añade la necesidad de sellado para conformar los depósitos que industrialmente deja de ser tan económica.

"PECW: Passive evaporative cooling wall". HE J., HOYANO A. China, Japón. (2008).

Imagen: HE J., HOYANO A. (2008).

Prototipo a base de tubos cerámicos para enfriamiento evaporativo directo exterior o semi-exterior. Los tubos de 1,2m de altura, 0,048m de radio exterior y 0,025 de radio interior, se disponen sobre una bandeja con agua. su humectación resultó casi total mediante succión capilar. La cerámica se compone de: $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ con una densidad en seco de 1.290 kg/m^3 . El diámetro de los poros oscila entre $5-50\mu\text{m}$ y su volumen es del 47%, pudiendo absorber el 30% del peso de la pieza en agua. El estudio contempla el sombreado de las piezas para un mayor enfriamiento, alcanzando temperaturas próximas a la de bulbo húmedo.

Ventajas:

Aprovechamiento de las aguas pluviales.

Incorporación de apantallamiento solar para incrementar el gradiente térmico.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.

"Ecooler" KAHN M., KAHN B. Studiokahn. Israel. (2010).

Imagen: <http://studiokahn.com>

Celosía cerámica con enfriamiento evaporativo directo.

Sus piezas modulares son una fusión de la celosía tradicional *mashrabiya* árabe y la *Jara*, una vasija de efecto botijo. Su fabricación precisa de molde y la unión de piezas se realiza mediante manguitos metálicos o sintéticos. Sus dimensiones son 0,33x0,35m y un grosor de 0,027m. Cada elemento tiene una capacidad de 0,55l y según sus autores un consumo de 0,27l al día. (ECOOLER).

Ventajas:

No hay contacto con el agua ni posibilidad de dispersión de gotas y no facilita la transmisión de epidemias.

Autonomía gracias a la capacidad de su depósito.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.

No incorpora sombreado, reduciendo la eficiencia.

El sistema de unión de piezas no facilita la sustitución de un solo elemento.

Acumulación de la presión hidrostática de un elemento al inferior, incrementando las exigencias de las soluciones constructivas, materiales empleados y agravando cualquier incidencia como fisuras o roturas de un elemento.

"Experimental and Numerical Study of a Heat Pipe Based Indirect Porous Ceramic Evaporative Cooler" BOUKHANOUF R., ALHARBI A., AMER O., IBRAHIM H. G. (2015).

Esquema del enfriador evaporativo indirecto cerámico (BOUKHANOUF et al. 2015).

El ensayo consta de una serie de tubos cerámicos humectados al tiempo que induce una corriente de aire a su alrededor. De este modo se logran potencias de enfriamiento entre 10 y 110W/m² y gradientes térmicos entorno a 5 °C para temperaturas entre 30 y 35°C y humedades entre el 35 y 55%. Establece un COP del 15 a 20 para el enfriamiento evaporativo de los sistemas de enfriamiento directo que comparan con los sistemas desecantes y con compresores.

"Cold Spot" SCHECTER J. Cambridge. UK. (2015).

Imagen: <http://climatecolab.org>

Mampuesto cerámico para enfriamiento evaporativo directo que dispone de cinco mini-aljibes. El sistema de apilado es por apoyo simple. Las piezas forman una celosía de arcadas por donde circula el aire. Se propone el rellenado de los depósitos horizontal para descender posteriormente por cada hilada si bien no se explica cómo se lograría con piezas de las mismas dimensiones.

Inconvenientes:

Incremento de la humedad relativa del aire, afectando a las condiciones de confort.
No incorpora sombreado, reduciendo la eficiencia.

Sistemas con acumulación de enfriamiento evaporativo indirecto:

"Gres-Bot. Cerámica bioclimática" FERRÁNDEZ J. M., QUESADA A. España. (2007).

Sistema de climatización con enfriamiento evaporativo pasivo para interiores mediante piezas cerámicas. Consiste en una serie de tubos cuadrados horizontales fabricados por extrusión y sellados en sus extremos, en los que se aporta agua a través de manguitos sellados que conectan los paneles en serie. La circulación del agua se regula a través de válvulas termostáticas y electroválvulas. Según sus autores la evaporación se produce hacia la masa de aire que queda sobre el nivel del agua y que se hace circular. El sistema, puede ser empleado como pared radiante durante el invierno conectándolo a paneles solares y caldera de apoyo, el

enfriamiento evaporativo en ese modo de funcionamiento, según sus autores, se anula mediante el estancamiento del aire sobre el nivel del agua. Mediante la adición de arena aumentaría la inercia térmica.

Desventajas:

La evaporación se produciría en los poros de la cerámica (ECHARRI et al 2010). El sistema no aprovecha la porosidad de la cerámica y de hacerlo alteraría las condiciones higrotérmicas interiores.

La adición de arena no aumenta la inercia térmica puesto que el calor específico del agua es uno de los mayores: ($C_{e \text{ arena}}$: 910-1.180 J/kg·K mientras que $C_{e \text{ H}_2\text{O}}$: 4187 J/kg·K (NEILA 2004).

"Placa Cerámica Evapotranspiradora para Edificios en Climas Cálidos". MORILLO B. Universidad de Sevilla. (2012).

Prototipo de panel cerámico con depósito para enfriamiento evaporativo indirecto.

La geometría exterior del panel permite el autosombreamiento parcial.

Sección esquemática lleno/vacío. Imagen: (MORILLO 2012).

Vista frontal del prototipo. Imagen: (MORILLO 2012).

"Aislater" VERA B., GORDO J. A. España.(2013).

*Finalista en la 3ª Convocatoria del Fondo de Emprendedores de la Fundación Repsol.
Imagen: www.fondoemprendedores.fundacionrepsol.com*

Panel cerámico para la mejora del aislamiento externo de edificios. Permite el enfriamiento evaporativo indirecto mediante la evaporación del agua retenida en las ranuras horizontales de los paneles.

Inconvenientes:

No incorpora sombreadamiento, reduciendo la eficiencia.

El agua queda expuesta a la luz, los insectos y las partículas atmosféricas.

"Hidrocerámica" RATHEE A., MITROFANOVA E., SANTAYANON P. España (2014).

Imagen: <http://www.elconfidencial.com>

Panel para enfriamiento evaporativo directo e indirecto, desarrollado por estudiantes del instituto de arquitectura avanzada de Cataluña (*Hydroceramic_hydrogel.*), que combina dos capas exteriores cerámicas con esferas de hidrogel retenidas mediante un textil que colabora en la difusión de la humedad. El sistema aprovecha las propiedades de inercia térmica, absorción y aporte de agua del hidrogel. Propone la captación de humedad ambiental y el agua de lluvia como suministro.

Ventajas:

No hay contacto con el agua ni posibilidad de dispersión de gotas y no facilita la transmisión de epidemias o la proliferación de insectos.

Inconvenientes:

No incorpora sombreadamiento, reduciendo la eficiencia.

El agua queda expuesta a la luz solar

La exposición al agua de lluvia limita el control del sistema que podría seguir refrigerando en invierno.

"Cerramiento térmico industrializado de fácil montaje". ECHARRI V. et al. Universidad de Alicante (2009).

FIG. 7

Vista axonométrica seccionando los depósitos y los orificios de interconexión. Fuente: Espacenet.

Patente ES 2352405 A1, WO 2011/015690 A3. de cerramiento modular para el enfriamiento o calefacción pasivos que dispone de depósitos cerámicos y una cámara de ventilación exterior. Propone el aprovechamiento del agua de red o reciclada.

Fuente: Tomo 2 del BOPI de 18 de Febrero de 2011.

Esta es la invención mas similar al *Panel para enfriamiento evaporativo indirecto de fachadas* descrito en la hipótesis. Según el Informe del estado de la técnica realizado por el examinador de la OEPM a la solicitud de patente con fecha 4/10/2016, los documentos citados en dicho informe solo muestran el estado general de la técnica en el campo de la invención. Por tanto, a la vista de los anteriores documentos, se considera que la invención, según se recoge en sus reivindicaciones, **es nueva y tiene actividad inventiva** (Art. 6.1 y 8.1 LP 11/1986).

Ventajas:

Planteamiento de un sistema pasivo de espesor reducido como envolvente única del espacio a climatizar a lo largo de todas las estaciones.

Funcionamiento estacional. Alteración de las propiedades de la cámara ventilada mediante la inserción de elementos auxiliares.

Inconvenientes:

No está solucionado el problema de la dilatación higroscópica ni la presión hidrostática que se acumula con el apilamiento vertical. Depende de sellados de gran precisión y no es posible la sustitución de piezas de forma independiente.

La solución para el funcionamiento en la estación fría no contempla el vaciado de los depósitos, que precisan de la radiación solar para la calefacción.

No existe ninguna investigación publicada sobre este sistema y se desconocen las prestaciones o resultados de su funcionamiento.

CONCLUSIONES PARCIALES:

- En las mismas condiciones y en ausencia de viento, una superficie vertical tiene mayor capacidad evaporativa que otra dispuesta horizontalmente y orientada hacia arriba (lámina de agua).
- El enfriamiento evaporativo es uno de los sistemas de refrigeración más sostenibles tanto económica como medioambientalmente, siempre que funcione en un entorno de baja humedad relativa.
- La incorporación de una cámara ventilada supone un importante ahorro energético que se incrementa en proporción a la radiación solar. Sin embargo los métodos de cálculo que se recogen en la normativa actual son esquemáticos y se alejan de las conclusiones formuladas por distintos autores.
- La alcalinidad de la cal proporciona cualidades desinfectantes y fungicidas de gran interés para los sistemas evaporativos.
- Evitar la inhalación de agua contaminada por legionella es clave para evitar la infección.
- A continuación se enumeran las limitaciones detectadas en los sistemas de fachadas evaporativas existentes y se proponen una serie de características deseables que debería tener un sistema con mayores prestaciones:

Limitaciones detectadas:

- Incremento de la humedad en los espacios a climatizar.
- Sin sombreamiento.
- Agua expuesta a la luz, insectos y partículas.
- Ser un vehículo de epidemias.
- Precisar de un suministro continuo de agua para su funcionamiento.
- Precisar de sistemas auxiliares de recirculación y bombeo.
- Vulnerabilidad al viento.
- Carecer de inercia térmica.
- Generar una excesiva presión hidrostática.
- Precisar de manguitos y sellados.
- No permitir la sustitución parcial de un elemento de forma aislada.

Características deseables:

- No alterar el contenido de humedad de los espacios a climatizar.
- Disponer de sombreamiento para aumentar el enfriamiento.
- Gran albedo para reflejar la radiación solar.
- Protección del agua frente a la luz, partículas e insectos.
- No ser un vehículo de propagación de enfermedades.
- Autonomía suficiente para funcionar sin suministro continuo, lo que amplía el aprovechamiento de recursos hídricos disponibles de forma discontinua como las aguas recicladas de duchas o baños.
- No vulnerable al viento.
- Aporte de inercia térmica a la envolvente.
- Presión hidrostática limitada que no suponga un encarecimiento de la fabricación de otros componentes del sistema y permita un apilamiento ilimitado.
- Sin necesidad de manguitos, juntas o sellados.
- Fácil sustitución de un solo panel sin interferir en el conjunto.
- Mínimo coste y mantenimiento.
- Medioambientalmente sostenible.
- Capilaridad de las superficies evaporativas que incremente la superficie activa.
- Compatibilidad con la vegetación.

No hay un sistema que reúna todas las ventajas deseables y solucione los inconvenientes detectados, lo que justifica la investigación y propuesta de un sistema que se acerque a este objetivo.

La mayoría de sistemas publicados no han sido evaluados bajo condiciones reales exteriores.

Ningún sistema propone para su fabricación el empleo de mortero de cal a pesar de ser un material poroso, conformable, de bajo coste y medioambientalmente aceptable.

CAPÍTULO

OBJETIVOS

OBJETIVOS:**Objetivos de diseño:**

Se plantea el diseño de un panel de fachada para enfriamiento evaporativo pasivo que cumpla las siguientes características:

- Eficiencia energética: Crear un colchón térmico en la envolvente de la edificación que reduzca los gastos de refrigeración con bajo consumo energético, maximizando las medidas pasivas.
- No alterar el contenido de humedad de los espacios a climatizar.
- Disponer de auto-sombreamiento para aumentar el enfriamiento evaporativo.
- Superficie exterior de gran albedo para reflejar la radiación solar.
- Protección del agua frente a la luz, partículas e insectos.
- No ser un vehículo de propagación de enfermedades.
- Gestión sostenible del agua: El consumo hídrico no debe de estar en competencia con los recursos de agua de boca. Por lo tanto el sistema de de disponer de autonomía suficiente para funcionar sin un suministro continuo, Aprovechando recursos como las aguas recicladas de duchas o baños.
- No ser vulnerable al viento.
- Aportar de inercia térmica a la envolvente.
- La presión hidrostática en los depósitos ha de ser limitada de forma que no suponga un encarecimiento de la fabricación de otros componentes del sistema y permita su apilamiento ilimitado.
- Sin necesidad de manguitos, juntas o sellados.
- Fácil sustitución de un solo panel sin interferir en el conjunto.
- Mínimo coste y mantenimiento.
- Capilaridad de las superficies evaporativas que incremente el frente húmedo.
- Compatibilidad con la vegetación.
- Ecológico: El modelo ha de ser medioambientalmente sostenible, carente de elementos tóxicos. Con el menor impacto ambiental a lo largo todo su ciclo de vida.
- Económico: Los materiales empleados han de ser abundantes. Su fabricación, instalación y mantenimiento han de ser económicos.
- Estético: Como acabado de la edificación ha de considerarse su estética e impacto urbano.

Las características relacionadas con el enfriamiento evaporativo han sido evaluadas mediante prototipos. Los objetivos de los experimentos realizados sobre estos prototipos y la demostración de la viabilidad de los mismos se describen en el capítulo: "*Experimentos con prototipos*".

Esquema conceptual de un muro refrescante mediante enfriamiento evaporativo que dispone además de una cámara ventilada con una hoja exterior de gran albedo.

CAPÍTULO IV

HIPÓTESIS

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

PANEL PATENTADO: (ES 2588856 A1)

Introducción

Resumen funcionamiento del panel evaporativo
Panel patentado/prototipos de experimentación

Fundamento teórico:

Biónica de los cactus
Consecuencias y oportunidades del ensuciamiento de las fachadas:
Suministro de agua

Elementos característicos:

Descripción:
Depósitos
Alveolos
Dimensiones

Funcionamiento estacional

Materiales

Costillas verticales

Acústica

Matriz de poro abierto

Estrías Inclinadas

Repelente de insectos:

Fundamentos del sistema óptico de repulsión de plagas
Aplicación en la edificación

Estrías helicoidales

Patrón de hoyuelos asimétricos con resaltes

Llenado de los paneles

Enjarje

Sistema constructivo

HIPÓTESIS:

PANEL PATENTADO: (ES 2588856 A1)

Introducción:

Resumen funcionamiento del panel evaporativo:

El panel evaporativo dispone de unos depósitos que durante el verano se llenan de agua. Sus paredes porosas evaporan hacia una serie de canales similares a una cámara ventilada. De este modo el agua de los depósitos se enfría de forma similar a como ocurre en un botijo. Al cubrir las partes ciegas de la envolvente del edificio actuarían de colchón térmico frente a un entorno exterior cálido. Durante el invierno, los depósitos permanecerían secos, aportando un aislamiento adicional.

Esquema del funcionamiento evaporativo.

Panel patentado/prototipos de Experimentación:

Esta investigación hace referencia a dos modelos de paneles evaporativos estacionales a base de mortero de cal: El primero, es el panel: (ES 2588856 A1, "*Panel para enfriamiento evaporativo indirecto de fachadas*") Patentado en 2015 y publicado en el BOPI en 2016 (MIET 2016), un modelo "ideal" que reúne una serie de innovaciones susceptibles de mejorar la eficiencia energética de la envolvente en climas cálidos y templados. El segundo, es un prototipo que ha sido fabricado y sobre el que se han realizado una serie de experimentos para conocer las posibilidades y limitaciones del primero.

La innovación del modelo patentado deviene de la combinación de múltiples estrategias pasivas que ponen en funcionamiento mecanismos físicos de transferencia de calor y masa: evaporación, conducción, convección y radiación que interactúan de forma compleja. La necesidad de acotar la investigación implica renunciar a la demostración de todas y cada una de los beneficios expuestos en la descripción de la patente.

Los prototipos son modelos simplificados del panel patentado en los que se experimentan solo algunas características refrigerantes como son el enfriamiento radiante y evaporativo. Ambos tienen en común los elementos fundamentales del sistema, como puede verse en la siguiente ilustración comparativa:

Elementos comunes del panel mini-aljibe en la versión patentada y el prototipo fabricado.

Fundamento teórico:

Biónica de los cactus:

La biónica, según la RAE es la "*aplicación del estudio de los fenómenos biológicos a la técnica de los sistemas electrónicos y mecánicos*".

El estudio de las estrategias de adaptación de las especies a un clima, puede dar lugar a nuevos sistemas constructivos o la optimización de los existentes.

Una de las familias de especies más características de los climas cálidos-secos son los cactus. Entender las razones de su morfología puede servir para proponer nuevas estrategias de aislamiento.

Tricoma lanoso de cactácea (Espostoa Lanata). Obsérvese el color más claro y la mayor densidad en el extremo superior, donde recibe mayor radiación al mediodía.

Las aréolas son yemas especializadas que en el caso de las cactáceas, han evolucionado en climas áridos para adaptarse al medio. En ellas surgen los tricomas, que son estructuras filamentosas. Algunas de ellas, sirven para dar sombra o crear un microclima que les permita conservar la humedad (STRASSBURGER, 1994). Estas velloidades lanosas, generalmente de colores claros, sirven de aislamiento para conservar el calor durante la noche. Durante el día reflejan la radiación solar. Los gloquidios son unas finísimas espinas de carácter defensivo que a menudo presentan colores claros y también colaborarían en aumentar el albedo de la planta. La adaptación de estas especies a climas extremos da lugar a sofisticadas estrategias fluidodinámicas que alteran la capa límite sobre su superficie para modificar la transmisión de calor o masa (evaporación).

La propia forma columnar, minimiza la radiación al mediodía y la incrementa en las primeras horas de sol, cuando la planta demanda calor para reponerse de las frías noches del desierto. Esta misma estrategia puede observarse en los termiteros de la termita brújula en el norte de Australia, de morfología vertical y plana.

Puede observarse un paralelismo similar en la inclinación hacia el sol tanto en los termiteros africanos como en especies como el *Echinocactus Grusonii*, reduciendo la superficie expuesta perpendicularmente al sol del mediodía. La arquitectura contemporánea nos deja un claro ejemplo de esta estrategia en el Ayuntamiento de Londres, de Foster&partners de 2002.

Echinocactus Grusonii, levemente inclinado hacia el sol.

Los pliegues verticales en la superficie del tallo de especies como el *Echinocactus* reciben el nombre de costillas. Además de funciones como el control de la expansión para aprovechar las lluvias esporádicas, estas acanaladuras pueden crear un microclima que ayude a la planta a soportar altos niveles de radiación solar. Debido a su reducida capacidad de evaporación y a su color verde oscuro, la superficie tiende a absorber una gran proporción de la radiación solar y a calentarse. Para compensarlo, las acanaladuras incrementan la superficie de enfriamiento convectivo. La alternancia de zonas radiadas y sombreadas crea diferencias de temperatura que incrementan la circulación de aire. Los planos sombreados actúan de disipadores, cediendo temperatura al aire más frío y denso que desciende por ellos. (TRIBUTSCH 1984).

La naturaleza nos señala los beneficios que en climas cálidos supone el uso de superficies con un alto albedo así como un alto coeficiente de forma que permita el enfriamiento convectivo.

La convergencia evolutiva es la adopción por parte de especies muy distintas de soluciones similares al mismo reto de su entorno. La repetición de los mismos patrones nos indica que la naturaleza tiende a evolucionar hacia las formas más óptimas.

El *Stenocara dentata* es un coleóptero de la familia de los *Tenebrionidae* que se caracteriza por su singular capacidad de proveerse de agua en el desierto de Namibia. Este escarabajo se sitúa en el vértice de las dunas al amanecer, cuando la brisa atlántica llega cargada de humedad. El escarabajo logra condensarla gracias a una temperatura corporal por debajo del punto de rocío, así como una combinación de resaltos superhidrófilos en sus élitros que atraen el agua, que desciende posteriormente hasta su boca. Algunas especies presentan canales hidrófugos que aceleran este proceso al forzar a las gotas a "liberar" las superficies hidrófilas para poder condensar más agua. (NØRGAARD et al. 2010)

La necesidad de aprovechar los escasos recursos hídricos es común a todas las especies de climas áridos. Resulta inevitable establecer paralelismos en base a este principio al observar acanaladuras de otras especies desérticas, incluso fuera del reino animal como en la *Euphobia igens*.

Euphorbia igens.

Esta capacidad de redirigir el agua hacia un punto en concreto puede resultar de aplicación en arquitectura para crear patrones por lavado diferencial en fachadas ubicadas en entornos contaminados, no solo para mejorar sus cualidades estéticas y reducir los costes de mantenimiento sino para alterar el albedo total de su superficie, con las implicaciones térmicas que esto puede suponer.

Consecuencias y oportunidades del ensuciamiento de las fachadas:

La contaminación atmosférica puede tener un origen natural o artificial. La contaminación natural puede tener su origen en procesos biológicos, incendios forestales, la erosión o la actividad volcánica. La contaminación urbana está condicionada fundamentalmente por la actividad humana. Su origen es fundamentalmente la combustión de combustibles fósiles ya sea para la industria, transporte o calefacción. La contaminación se compone de gases, líquidos y sólidos en suspensión. En el caso de las ciudades, podemos encontrar diversos óxidos de carbono, nitrógeno y azufre; hidrocarburos, material particulado, ozono, metales pesados y disolventes. (ALFARO 1998). Los gases contaminantes tienden a mezclarse para igualar su concentración mientras que los líquidos y sólidos en suspensión, son arrastrados por el viento y la convección natural. En la medida en la que desaparecen estas corrientes, se depositan por gravedad, concentrándose sobre las superficies horizontales. La influencia de las corrientes de aire, la acción solar y la lluvia, tienen como resultado un ensuciamiento heterogéneo. De forma general la contaminación se acumula en forma de arco en las fachadas, siendo la parte central inferior la más afectada y las esquinas superiores, las menos.

El ensuciamiento heterogéneo resulta más evidente en superficies planas que en aquellas con cierta textura. Lo que puede reducir los gastos de mantenimiento por limpieza.

Desde un punto de vista energético, la alteración de la tonalidad de la fachada afecta a su capacidad de reflejar la radiación incidente. En el caso de climas cálidos, las fachadas con un gran albedo que se encuentren cubiertas de hollín, sufrirán un incremento de su temperatura superficial que repercutirá en un mayor flujo de calor hacia el interior.

Para ilustrar este efecto se muestran las fotografías térmicas de dos probetas de mortero de cal, una lisa y otra texturizada sometidas a un ensuciamiento de uno de sus extremos. Las probetas, que inicialmente se encuentran a la misma temperatura, son expuestas al sol, registrando su temperatura superficial mediante sonda termopar y fotografiadas con cámara termográfica.

Incremento de la T^a superficial debido al oscurecimiento de la superficie de probetas de experimentación.

Este sencillo experimento ilustra las consecuencias energéticas del efecto de la tonalidad de la fachada, ya sea por tener un tono oscuro original o por ensuciamiento posterior.

La lectura evidente que se hace del mismo es que para climas cálidos, una fachada con un alto albedo absorberá menos radiación solar. Al margen de la estética, conservarla limpia implica un ahorro energético.

Sin embargo, en climas templados y secos, donde se alternen estaciones frías y cálidas, podría plantearse el aprovechamiento de la contaminación durante el invierno para aumentar la temperatura Sol-aire, y eliminarla en verano, para reflejar la radiación solar.

Económicamente sería difícil rentabilizar los trabajos de mantenimiento con el ahorro producido. Por este motivo se plantea un sistema pasivo que combina una geometría específica con un acabado fotocatalítico. La geometría dispone de estrías sobre las que incide el sol de forma distinta durante el verano y el invierno, debido a la trayectoria solar. Esta variabilidad es aprovechada, ofreciendo superficies oscuras que serán radiadas en invierno y otras claras, que mantendrán su capacidad de reflejar la radiación solar durante el verano.

Suministro de agua:

Puede realizarse a partir de una o varias fuentes.

- Agua de red:

Puede plantearse como medida excepcional frente al riesgo de colapso de la red eléctrica o en situaciones de abundancia, pero sería medioambientalmente incongruente entrar en competencia con las necesidades de la población.

- Agua de lluvia:

En los lugares donde la evaporación del volumen precipitado sea comparable a la demanda refrigerante, esta sería la opción más económica.

La acumulación en cubierta elimina la necesidad de bombas y el gasto de impulsión, puesto que el sistema puede funcionar únicamente por gravedad, si bien es necesario considerar la sobrecarga de los depósitos.

- Agua condensada:

Fundamentalmente de equipos de aire acondicionado con los que el sistema podría complementarse también en este aspecto.

- Agua azul:

Definida como agua dulce consumida a partir de aguas superficiales (ríos, lagos embalses) y subterráneas (Acuíferos).

- Aguas grises recicladas:

Las aguas grises están comprendidas dentro de las aguas residuales, cuya reutilización está regulada por el Real Decreto 1620/2007.

La actividad humana está ligada a un consumo de agua constante.

El sistema de depuración puede servir a un edificio o grupo de edificios, disponerse por plantas, o incluso por desagüe. La adecuada sensibilización de los usuarios para adoptar un hábito de consumo determinado, permitiría reutilizar un agua poco alterada en origen y más importante aún, esta alteración ser muy específica. Esto permitiría acotar el tratamiento necesario, reduciendo los costes del sistema y su mantenimiento, proporcionando un efluente homogéneo.

Las aguas domésticas de baños y duchas son las más económicas de purificar (MARTINS 2005). Su consumo se estima en 20 a 40 litros para las duchas y 50 a 100 para el baño por persona y día. De ser reciclados, bastarían como suministro de un sistema de climatización evaporativa.

Las tipologías de instalaciones para la reutilización de aguas grises pueden dividirse en: Sistemas centralizados y sistemas individuales o descentralizados, que comprenden viviendas o cuartos húmedos. (FENERCOM 2012).

A su vez, estos se dividen en: "*Equipos y sistemas con tratamiento*" y "*Equipos y sistemas sin tratamiento*". (FENERCOM 2012).

Esquema de reciclaje de agua de lavabos para sistema de fachada con enfriamiento evaporativo.

Una vez el agua reciclada se sirve a la fachada evaporativa, sus características siguen aportando una serie de ventajas:

El agua cae por gravedad a través de la matriz porosa, percolando el efluente de forma similar a un lecho de grava de fase vertical; incrementando el contenido en oxígeno al aumentar la interfase agua-aire.

Las paredes de cal de los depósitos son bacteriostáticas gracias a su alcalinidad.

Elementos característicos:

Descripción:

La presente invención es un panel para ser empleado prioritariamente como fachada, bien en obra nueva o rehabilitación, con capacidad para realizar enfriamiento evaporativo indirecto, mejorando la eficiencia de la envolvente de edificios. El líquido a evaporar es preferiblemente agua.

Imagen del panel evaporativo patentado.

Para una mejor comprensión, cada elemento se acompaña de un número que aparece grafiado siguiendo el esquema de la patente:

- 1= Depósitos centrales.
- 2=Alveolos.
- 3=canal de drenaje.
- 4= Estrías helicoidales en caras interiores de los alveolos.
- 5= Estrías inclinadas con tratamiento hidrófilo y fotocatalítico a base de TiO_2 .
- 6=Entalladura sobre la pared de división de los depósitos que los interconecta a una cota inferior a la de los sumideros de drenaje.
- 7=Machihembrado lateral de los paneles.
- 8= Sumidero en el extremo superior de los depósitos que comunica con el canal de drenaje.
- 9= Goterón
- 10= Canal hueco.
- 11= Depósitos laterales.
- 12= Orificio de salida del canal de drenaje.
- 13= Vértice superior del patrón triangular.
- 14= Hoyuelos triangulares asimétricos
- 15= Resaltes en el lado inferior del triángulo, no perpendiculares al flujo.
- 16= Costillas verticales
- 17= Mitad superior de la estría con tratamiento fotocatalítico a base de dióxido de titanio.
- 18=Codo

Elementos principales del panel mini-aljibe patentado.

Depósitos:

Sus elementos principales son una serie de depósitos dispuestos en su cara interior, separados por paredes de carácter estructural pero interconectados horizontalmente en su extremo superior de forma que se garantice el llenado de todos los depósitos independientemente de cuál reciba suministro. Esto supone una ventaja respecto de los sistemas que no permiten la distribución horizontal del agua. Los depósitos pueden ser simplemente huecos o contener una matriz de poro abierto que percola el agua, la proteja de la luz y la entrada de insectos.

Los depósitos de cada panel se llenan en cascada por rebose secuencial del situado por encima. Este sencillo método por gravedad se realiza a presión atmosférica. La presión hidrostática sólo depende de la altura del depósito por lo que el sistema puede apilarse de manera ilimitada sin incrementarla y supone el ahorro de manguitos, válvulas, boquillas y elementos análogos para la distribución del agua a los paneles inferiores.

El sistema de rebose consta de un sumidero en el extremo superior por encima del canal de interconexión de los depósitos, un canal de drenaje que consta de un codo, un orificio de salida y un goterón.

El sistema permite el reemplazo de un panel mientras el resto están llenos y refrigerando. Al funcionar por gravedad, el relleno secuencial de los depósitos puede lograrse pese a la ausencia de algunos paneles, salvo en condiciones de fuerte viento.

Alveolos:

La cara exterior de los paneles cuenta con una serie de canales huecos denominados alveolos, por los que puede fluir el aire. Se basan en el concepto de la cámara de una fachada ventilada, adaptada geométricamente al material empleado (mortero de cal preferentemente) para formar una pieza monolítica. Su interior acanalado maximiza la superficie evaporativa. Las paredes que separan los depósitos de los alveolos son porosas y a través de ellas se produce la evaporación del agua. Al producirse la evaporación, el aire contenido en los alveolos se enfría y al hacerse más denso, se inicia un movimiento descendente que produce su renovación,

fomentado la entrada de más aire seco que perpetúa el funcionamiento del sistema. Los alveolos forman un colchón térmico que mejora las prestaciones respecto a sistemas de fachadas evaporativas sin cámara, porque en estos la convección de su hoja exterior tiene lugar contra un aire a temperatura exterior, en lugar de una mas atemperada que se obtiene gracias a la cámara. Además los sistemas que carecen de hoja exterior pueden recibir radiación solar directa aumentando las ganancias térmicas.

La geometría exterior de los alveolos forma las costillas verticales, maximizando el enfriamiento convectivo. La sección ovoide de los alveolos forma bóvedas parabólicas que optimizan su resistencia ante impactos exteriores.

Sección horizontal en su extremo superior.

Sección vertical por la mitad de uno de los depósitos.

En la figura se representa el rebosadero de un depósito y el canal por donde el agua descendería hacia la pieza situada inmediatamente debajo, una vez la superior se ha llenado hasta el máximo. Asimismo está representada la matriz de poro abierto que, a modo de esponja, albergaría el líquido contenido en los depósitos.

Dimensiones:

Alzado frontal acotado en el que se representa la textura en forma de espiga que canaliza el agua de escorrentía hacia los vértices cóncavos del frente del panel.

Sección horizontal acotada.

Se proponen las compatibles con bloques existentes en el mercado. Anchura: 40cm Altura: 20cm Profundidad: 18cm. Estas dimensiones se encuentran dentro de los parámetros experimentados; la ascensión capilar es mayor que la altura, permitiendo aprovechar toda su superficie para la evaporación. Los depósitos de los prototipos soportaron una presión hidrostática correspondiente a 0,32m de profundidad mientras que las dimensiones propuestas alcanzarían la mitad de este valor.

Dimensionado de los Alveolos:

El panel funcionaría en cierto rango de dimensiones. Debido a la complejidad del cálculo fluido-dinámico concurrente con las variables atmosféricas, el método empírico empleado en los experimentos podría ser el más adecuado, modificando la geometría elemento a elemento. La hipótesis de dimensionado de la cámara de aire sería que la energía radiante del sol fuera disipada mediante convección natural. En la medida en que se lograra que esta convección se desarrollara en la cara exterior, la velocidad en el interior de la cámara ventilada podría ser suficientemente baja como para no superar un régimen laminar. En un flujo de estas características en el que las venas circulan paralelas sin mezclarse de forma turbulenta, la

transmisión de energía tendría un carácter fundamentalmente conductivo y podrían aprovecharse las cualidades aislantes del aire.

La sección de los alveolos podría variar en función del clima:

Hipótesis de comportamiento fluidodinámico y termodinámico en función del diámetro de los alveolos.

Para climas extremadamente cálidos, es necesario incrementar la evaporación para aumentar la refrigeración. La introducción de pliegues, aletas o resaltos aumenta la superficie evaporativa. Un aspecto limitante es el caudal de aire seco (Q), por lo que aumentando el diámetro ($\emptyset$) del alveolo se reduciría el rozamiento (τ) y en consecuencia se incrementaría la velocidad (v), fomentando un régimen turbulento capaz de un mayor intercambio de masa. El régimen turbulento aumenta el flujo de energía por convección (ZHOU 2007), (DAFEDAR et al. 2013) en dirección perpendicular al alveolo, pero este resulta despreciable frente al enfriamiento evaporativo. Por último, una mayor evaporación implica necesariamente un mayor consumo de agua.

Para un clima menos severo, podría convenir reducir la sección del alveolo, aumentando el rozamiento. La viscosidad del aire puede dar lugar a régimen laminar definido por la ecuación de Hagen-Poiseuille. La gráfica de velocidades se asemejaría a una parábola en la que las venas circulan paralelas. De no producirse turbulencias, el intercambio de temperatura en dirección perpendicular a la corriente es conductivo y puesto que el aire es un material de naturaleza aislante, se lograría aprovechar esta cualidad. La eliminación de turbulencias reduce el enfriamiento evaporativo pero también el consumo de agua.

Además de modificar la sección de los alveolos, otras vías de optimizar el aislamiento serían la disposición de cierta cantidad de material aislante en la hoja exterior como apunta (CIAMPI et al. 2003), el empleo de superficies selectivas frías (BARBERO 2011), o una combinación de las anteriores.

Funcionamiento estacional:

El sistema es versátil estacionalmente, funcionando en dos modos según las condiciones climáticas exteriores:

- Modo Invierno o modo aislante: Los depósitos están secos, la espuma de poro abierto que hay en su interior reduce el movimiento del aire, confiriéndole propiedades aislantes. La baja temperatura exterior y las distintas geometrías de la superficie los alveolos limitan la convección.
- Modo verano o modo evaporativo: Los depósitos están llenos de agua que se evapora a

través de las paredes porosas. El agua, las paredes de los depósitos y el aire en contacto con ellas se enfrían, formando un colchón térmico contra el calor exterior.

Climatización de exteriores:

Durante los meses cálidos, cuando el sistema está enfriando, se puede aprovechar la corriente descendente de aire para la climatización de espacios exteriores y la creación de cortinas de aire frío, reduciendo la ganancia de calor en los accesos de los edificios.

También es posible su aprovechamiento como pre-acondicionamiento del aire de otros sistemas convencionales (bombas de calor, Unidades de tratamiento de aire, etc.) cuyo rendimiento se ve implementado al intercambiar energía con un entorno a una temperatura más favorable para su rendimiento y al mismo tiempo se puede emplear el agua de condensación para alimentar los depósitos.

Materiales: El material preferente de la invención es un mortero armado de cal hidráulica permeable al vapor de agua ($\mu \leq 15$), pudiendo incorporar cales obtenidas a partir del reciclaje de subproductos industriales. La carbonatación progresiva de la cal compensa la eventual aparición de microfisuras derivadas de los procesos de absorción y desecación. El aglomerante se ve sometido a contracciones durante los ciclos secado, mientras que el árido no, generando tensiones que pueden producir pérdidas de resistencia mecánica por fatiga o fugas en los depósitos a largo plazo.

La versatilidad de la invención de ser fabricada a base de mortero amplía las posibilidades de producción y puede suponer un ahorro económico respecto de sistemas estrictamente cerámicos. El sistema de fabricación preferente, pero no el único, es la impresión tridimensional.

Fabricación 3D de un modelo a escala 1/4 en el laboratorio de prototipos de la ETSAM.

Costillas verticales:

La cara exterior del panel consta de una geometría ondulada. Los entrantes y salientes verticales que forma, producen sombras auto-arrojadas cuando el sol incide con un ángulo tangencial sobre el plano de fachada, creando gradientes térmicos que incrementan la convección y aumentando la capacidad de la fachada de disipar la radiación incidente de nuevo hacia la atmósfera.

Sección horizontal en la que se representa esquemáticamente el movimiento convectivo del aire por calentamiento diferencial de la hoja exterior del panel.

Esquema del movimiento convectivo del aire por efecto de la radiación solar sobre el relieve de la hoja exterior del panel.

Las costillas verticales disponen de una serie de estrías inclinadas en la cara exterior del panel con un tratamiento de dióxido de titanio (TiO_2) en la masa del mortero en un espesor $\geq 0,7\text{mm}$ en la mitad superior de dichas estrías que confiere a su superficie propiedades fotocatalíticas e hidrófilas. Las moléculas de contaminación urbana (principalmente NO_x) que se depositan sobre la superficie tratada son descompuestas por la acción del fotocatalítica del TiO_2 en forma de CO_2 y nitratos. Los contaminantes descompuestos son arrastrados por el agua hacia la mitad inferior de las estrías inclinadas mientras que la mitad superior y más expuesta a la luz queda más limpia, formando un patrón claroscuro geométrico. Además de una ventaja estética, el panel varía su absorción de forma estacional, absorbiendo mas radiación en invierno y reflejándola en mayor proporción durante el verano, lo que implica ahorros energéticos tanto en calefacción como en refrigeración.

En climas secos, el agua necesaria para el lavado es aportada por el rezumado de los depósitos durante el verano, cuando se encuentran llenos en modo evaporativo. El lavado diferencial descrito hace que la parte superior de las estrías esté más limpia que la inferior. Como el mortero de cal, material preferente de la invención, y el TiO_2 poseen una baja absorción, reflejan la mayor parte de la radiación incidente en las zonas limpias, que son las que más radiación reciben en verano; mientras que en invierno, cuando los rayos solares son más horizontales, se incrementa la proporción de rayos solares que inciden sobre las zonas oscuras por el lavado diferencial, aumentando la absorción de la fachada y por tanto su temperatura superficial.

Acústica:

Tanto las costillas verticales como las estrías inclinadas mejoran la acústica urbana, absorbiendo las longitudes de onda del mismo tamaño que sus ondulaciones y dispersando las de menor longitud, reduciendo el efecto cañón.

Sección horizontal en la que se representa esquemáticamente la dispersión de las ondas acústicas al rebotar sobre la superficie ondulada del frente del panel.

Este efecto aun sería mejorado por la eventual vegetación que podría incorporar el panel de fachada. (VAN RENTERGHEM. 2013). La capa vegetal de un muro verde puede reducir el sonido de 5-10dB en las frecuencias de 200-1000Hz (WONG et al. 2010 a,b)

Matriz de poro abierto:

Los depósitos disponen de una matriz de poro abierto que a modo de esponja contiene el agua en el *modo evaporativo*, pero protegiéndola al mismo tiempo de la entrada de luz o insectos. Cuando los depósitos están secos, esta matriz reduce el movimiento convectivo del aire, incrementando la capacidad aislante de los paneles durante el invierno.

El material preferente es la espuma cerámica: Un material celular de alta porosidad empleado en múltiples aplicaciones industriales. Sus propiedades son una baja conductividad térmica, alta permeabilidad, estabilidad a altas temperaturas, estabilidad térmica y resistencia al choque térmico. (SCHEFFLER et al. 2005), (PRESAS et al. 2006).

Su fabricación se realiza a partir de alúmina (Al_2O_3) por su bajo coste y propiedades mecánicas. Uno de los métodos de producción es la sinterización a base de esferas de poliestireno expandido que se sacrifican durante la fabricación, obteniendo un material cerámico poroso de estructura abierta y completamente interconectada. (MUÑOZ et al. 2015).

Fotografía y detalle de espuma cerámica de 40 poros por pulgada empleada en los prototipos. Fuente propia.

Características de la espuma cerámica empleada en los prototipos:

Vukopor LD 40 PPI: Datos según Ficha técnica del fabricante (LANIK 2012):

Filtro de espuma cerámica de alúmina		Tolerancia	Referencia
Color	Blanco		
Dimensiones:	0,381x0,381x0,50 m	±0,002m	(LANIK 2012)
Porosidad	80-90%		(ARROSI 2008)
PPP (poros por pulgada)	40	±3 PPP	(LANIK 2012)
Peso:	2,770 Kg	±0,220 Kg	(LANIK 2012)

Directoras: Dra. Consolación Ana Acha Román, Dra. Soledad García Morales.

recubiertas en su cara superior de una capa de TiO_2 , NF-TiO_2 u otros compuestos capaces de descomponer NO_x , SO_x , disolventes y compuestos aromáticos (KONTOS et al 2010) mediante reacciones redox foto-inducidas (JIMÉNEZ E. HTCC CSIC, V encuentro edificios UPM). El lavado se produce en presencia de agua, ya sea procedente de la lluvia o al llenar los depósitos al inicio de la estación cálida, que llegará hasta los vértices cóncavos de la superficie del panel por capilaridad horizontal. Las propiedades hidrofílicas y oleofílicas de estos fotocatalizadores facilitan el arrastre de las partículas contaminantes y los compuestos de su degradación (WANG et al 1997).

La cara inferior de las estrías carece de tratamiento fotocatalítico. Sobre ellas se depositarán los compuestos degradados migrados por escorrentía, oscureciéndolas de forma controlada. Su inclinación negativa hace que absorban una mayor proporción de radiación solar en invierno, cuando la trayectoria solar es más baja.

Los compuestos degradados son ricos en nitratos, que tienen una gran capacidad de desplazarse dentro del mortero, confiriéndole una gran higroscopicidad. El ciclo del nitrógeno supone la aparición sucesiva de algas, hongos, líquenes y plantas superiores. El envejecimiento de la pieza implica que los procesos de evaporación y descontaminación de origen inorgánico, sean sustituidos paulatinamente por procesos naturales. En combinación con la presencia de agua, las especies colonizadoras cerrarían el ciclo del nitrógeno.

Ciclo de depuración de contaminantes atmosféricos mediante la combinación de superficies fotocatalíticas y vegetación.

Los líquenes son colonizadores primarios presentes incluso en climas extremos que preceden la aparición de otras especies. A pesar de su sensibilidad a la contaminación por dióxido de azufre, presentan una elevada tasa de recolonización cuando las condiciones regresan a parámetros admisibles. (ROSE et al. 1981).

Proliferación de líquenes sobre una superficie vertical de piedra.

Aspecto del panel durante el verano.

Aspecto del panel durante el invierno.

En resumen, se busca un triple objetivo, Energético, medioambiental y estético. Éste último, gestiona el envejecimiento de la fachada mediante un patrón controlado. Asimismo se propone un enfoque que contemple la simbiosis entre arquitectura y organismos vivos que renueven de forma continua y pasiva el acabado de las fachadas, reduciendo la necesidad de mantenimiento y limpieza en incluso en condiciones de alta contaminación urbana.

Repelente de insectos:

El tratamiento a base de dióxido de titanio (TiO_2) en la mitad superior de las estrías inclinadas de la cara exterior del panel las hace reflectantes a la luz y reducen la acumulación de suciedad respecto al resto del panel, produciendo un lavado diferencial que da lugar a un patrón de bandas claroscuros similares a las de las cebras. El efecto óptico creado podría ayudar a repeler determinadas especies de insectos.

Las estrías inclinadas siguen dos direcciones perpendiculares entre sí, lo que aumenta el efecto disuasorio de las plagas respecto a patrones con una única dirección (HORVÁTH et al. 2012).

Fundamentos del sistema óptico de repulsión de plagas:

Los parásitos han condicionado la selección natural de aves y mamíferos que han evolucionado hacia determinados rasgos extremos. (HAMILTON ET AL., 1982; ANDERSSON, 1994).

La distribución de équidos del continente africano parece estar relacionada con la presencia de

determinadas especies de insectos como la mosca tse-tse (CARO et al 2014). El estudio de (LARISON et al. 2014) muestra como los patrones de rayas de las distintas subespecies de cebras se acentúan hacia el interior del continente y señalan entre otros factores una relación con la temperatura.

Los estudios y experimentos de Horváth y su equipo demuestran la capacidad del patrón de rayas blancas y negras de las cebras para repeler a tábanos y otras especies de insectos mediante la polarización de la luz. Los insectos poseen ojos compuestos formados por múltiples facetas llamadas omatidios que permitirían distinguir la luz polarizada, mientras que el ojo humano, con una estructura muy diferente, es poco sensible a este efecto.

La reproducción de estas propiedades repelentes en la arquitectura resultarían de gran interés para reducir la transmisión de enfermedades y molestias asociadas a estas plagas.

Las ondas electromagnéticas cuentan con un campo eléctrico y otro magnético oscilantes perpendiculares entre sí. La luz natural no suele estar polarizada y sus vibraciones electromagnéticas se producen en todas direcciones.

Los insectos vinculados a medios acuáticos emplean la luz polarizada para orientarse, buscar huéspedes de los que alimentarse y depositar sus huevos en el medio adecuado. Como superficie del agua polariza la luz horizontalmente; usan la reflexión sobre su superficie a modo de brújula, ya que la polarización lineal de la luz de cielo es siempre perpendicular a la dirección del sol. (HORVÁTH et al. 2004) (HORVÁTH et al., 2008). (HORVÁTH et al., 2010).

Existen varios fenómenos de polarización que dan lugar a ondas que oscilan en un único plano como la polarización por reflexión (ley de Brewster) o el dicroísmo que es una absorción selectiva.

Los tábanos poseen visión polarizada para detectar agua. Para ello se sirven de su capacidad de percibir la polarización horizontal en la luz que se produce cuando la luz natural se refleja sobre la superficie del agua (HORVÁTH et al., 2008).

Polarización horizontal de la luz al incidir sobre la superficie del agua.

Los tábanos tienen polarotaxis positiva, es decir, responden a la luz polarizada condicionando sus hábitos alimenticios. (HORVÁTH et al. 2010). Los patrones de rayas blancas y negras en los animales-huesped como las cebras reducen esta polarotaxis a medida que las franjas se estrechan, y lo que es más relevante, esta capacidad de ahuyentar a determinados insectos se produce incluso cuando el patrón sólo puede ser percibido con luz polarizada.

En el caso del pelaje de las cebras, las diferencias de polarización de la luz están intrínsecamente relacionada con las diferencias de brillo y actúan sinérgicamente. Las rayas blancas reflejan débilmente la luz polarizada mientras que las rayas negras tienen una gran capacidad de polarización. El contraste de las rayas adyacentes y su anchura son relevantes; a medida que se estrechan resultan más efectivas en repeler las plagas. Los patrones que alternan direcciones ortogonales también son más efectivos (HORVÁTH et al. 2012).

A medida que los tábanos se acercan a las cebras y alcanzan una distancia crítica de visualización, sus ojos comienzan a distinguir las rayas de las cebras. El margen de efectividad de las rayas aumenta con la agudeza visual del insecto, relacionada con el tamaño y número de lentes de sus ojos compuestos (HORVÁTH et al. 2012).

Existen más estudios sobre el origen y la finalidad de las rayas de las cebras que presentan otras explicaciones compatibles. Una de ellas la termorregulación gracias al movimiento convectivo inducido por el calentamiento diferencial de las rayas blancas y negras de la piel que favorece la ventilación, manteniendo al animal más fresco que si fuera de un color homogéneo (CLOUDSLEY-THOMPSON, 1984; KINGDON, 1984; MORRIS, 1990; LOUW, 1993).

Aplicación en la edificación:

El objetivo es crear un efecto disuasorio equivalente al producido las rayas de las cebras, mediante la reflexión de la luz siguiendo patrones de bandas casi ortogonales.

La superficie del panel es capaz de crear dos patrones de bandas claroscuros. El primero aparece cuando la luz ilumina su superficie bajo un ángulo suficientemente tangencial como para que una de las caras de las costillas verticales quede iluminada y la otra en sombra. El segundo patrón está producido tanto por el relieve como por el tratamiento superficial de las estrías inclinadas, que dan lugar un lavado diferencial que deposita la suciedad en la mitad inferior de las estrías, oscureciéndolas y aumentando el contraste entre las caras superior e inferior. Al tener una escala menor, este patrón es percibido a una distancia menor que el primero.

Estrías helicoidales:

Sección vertical por la mitad de un alveolo en el que se representan las estrías helicoidales (4).

Conforman una serie de pliegues que aumentan la superficie evaporativa. Tienen un desarrollo vertical levemente helicoidal, similar al ánima de un cañón con la intención de canalizar el aire seco próximo a la cara exterior del panel hacia las paredes húmedas de los depósitos y viceversa.

Sección horizontal en la que se representa esquemáticamente la influencia de las estrías helicoidales sobre la difusión del vapor en el interior de los alveolos.

La inspiración de este sistema tiene su origen en el *Cereus forbesii spiraliforme*, Una cactácea cuyas costillas se desarrollan en espiral. Su color verde oscuro sugiere que su superficie aumentará de temperatura de forma significativa al ser expuesta al sol. Sus prominentes costillas incrementan la superficie de intercambio convectivo. La forma en espiral podría ser una estrategia para desplazar el aire más fresco desde la cara en sombra a la soleada, ayudando a regular la temperatura en condiciones extremas.

Cereus forbesii spiraliforme

Patrón de hoyuelos asimétricos con resaltes:

En vértice de las estrías helicoidales se alinean una serie de hoyuelos y resaltes que aumentan la turbulencia del flujo de aire mezclando el que está saturado de humedad situado en la capa límite con el más alejado y más seco, mejorando la capacidad de evaporación superficial.

Distribución del patrón de hoyuelos a lo largo del vértice de las estrías.

La sección del hoyuelo fomenta el desprendimiento de la capa límite y el paso de un régimen laminar a otro turbulento, aumentando la convección y la transferencia de masa (vapor de agua) a lo largo de la estela de vórtices generada.

Hoyuelo, Visto en sección vertical, en el que se representa esquemáticamente la creación de vórtices sobre la corriente de aire que circula por el alveolo.

Los hoyuelos son asimétricos y disponen de un resalte que forma un ángulo $(90+\alpha)$ con la dirección del flujo (vertical descendente), desviándolo lateralmente a favor del movimiento helicoidal inducido por las estrías y aumentando la difusión del vapor de agua.

Hoyuelo, visto en alzado, en el que se representa esquemáticamente el desvío de la corriente de aire, e imagen térmica de este efecto demostrada mediante experimento sobre un prototipo.

Este efecto queda demostrado en el capítulo de experimentos sobre prototipos.

Llenado de los paneles:

El llenado de los depósitos se realiza por rebose de los paneles superiores sobre los que se encuentran debajo aprovechando la gravedad.

Podría realizarse únicamente desde el perímetro superior de la cubierta o sectorizarse por plantas en edificios de gran altura.

Un canalón en el extremo inferior recoge el agua que pueda rebosar de la fila inferior de paneles.

Los ciclos de llenado pueden regularse para permitir su total desecación semanalmente, el objetivo sería eliminar las larvas de insectos que pudieran ser depositadas en el agua, si todas las medidas anteriores (PH y espuma de poro abierto en los depósitos) no resultaran suficientemente efectivas. En estas condiciones, el agua remanente en la estructura porosa de las paredes de los depósitos continuaría con el refrescamiento evaporativo, y junto con la inercia térmica del panel, seguirían actuando como colchón térmico de la envolvente.

Enjarje:

Si los paneles se disponen formando una retícula, el rebose del superior rellenará únicamente el situado debajo. Al ser modulares y disponer de dos orificios de drenaje (12), es posible enjararlos, posibilitando que cada panel rebose sobre los dos situados debajo.

Esquema de llenado y rebose de paneles enjarjados.

Sistema constructivo:

Detalle del sistema constructivo en el que se representan los paneles de base y coronación de una fachada evaporativa.

Planta indicando el corte representado.

La puesta en obra de los paneles aprovecharía los elementos auxiliares existentes en el mercado para aplacados y fachadas ventiladas con hojas exteriores pesadas.

La sección representada contempla la continuidad del aislamiento e impermeabilización sobre la que se disponen angulares de soporte para las hiladas de paneles evaporativos. Las piezas quedan aseguradas mediante grapas clipadas que previenen de la succión por viento pero facilitan al mismo tiempo la extracción de un panel de forma aislada.

El suministro de agua se ha representado como un conducto que distribuye el agua a lo largo de todos los paneles que coronan el muro.

En el extremo inferior se representa un canalón que recoge cualquier exceso de agua que pudiera rebosar durante la fase de llenado de los paneles.

Traslado del Informe sobre el Estado de la Técnica de la solicitud de Patente Nacional 201530598:

La invención descrita en este capítulo fue presentada como patente con fecha 4 de Mayo de 2015 en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

La solicitud fue evaluada durante la fase de *examen formal y técnico*, según el Artículo 31.2 Ley 11/1986, considerando **cumple con el requisito de aplicación industrial**.

A continuación, en cumplimiento con lo dispuesto en el artículo 29 del Reglamento de Ejecución de la Ley 11/1986 de Patentes (RD 2245/1986), La oficina traslada el Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) que incluye la Opinión Escrita correspondiente a la solicitud.

La declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo de Patentes, considera que la invención "*Panel para enfriamiento evaporativo indirecto de fachadas*" **es nueva y tiene actividad inventiva** (Art. 6.1 y 8.1 LP 11/1986). Es decir: No se considera evidente para una persona experta en la materia llegar a obtener a partir de las invenciones del estado de la técnica o de una combinación relevante de las mismas el panel definido en la reivindicación 1 de la solicitud. El resto de reivindicaciones (2-9) son dependientes de la reivindicación 1 y por tanto, como ella, son nuevas e implican actividad inventiva. Por lo que **la patente es aprobada en su totalidad**. MIET (2016).

CAPÍTULO V

EXPERIMENTOS

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

EXPERIMENTOS

Caracterización del mortero de cal empleado en los ensayos

- Descripción general
- Documentación básica
- Composición e información de los componentes
- Propiedades físicas y químicas
- Información ecológica
- Información reglamentaria
- Datos técnicos

EXPERIMENTOS CON PROBETAS

Experimento de la altura y velocidad de ascensión capilar alcanzadas por el agua en una probeta de mortero de cal de gran altura sometida a distintas condiciones de radiación y temperatura.

Introducción

Objetivo del experimento

Modelo teórico

Método de ensayo

Banco de ensayo

Probeta:

Materiales y fabricación

Encapsulado

Métodos de medida

Desarrollo del experimento

Resultados y discusión:

Elaboración de gráficas a partir de las mediciones recogidas:

Conclusiones

Limitaciones del experimento

Experimento de germinación de semillas sobre probeta humectada de mortero de cal.

Introducción

Objetivo

Limitaciones

Banco de experimentación

Prototipos empleados en el experimento

Desarrollo del experimento

Resultados y discusión

Conclusiones

Ensayos adicionales

Plantación.

Ensayo de la influencia de la geometría y tonalidad en la Temperatura superficial de probetas planas de mortero de cal bajo condiciones reales exteriores.

Objetivo del experimento

Modelo teórico

Método de ensayo

Variables:

Obscurecimiento por contaminación urbana

Diseño del banco de experimentación

Desarrollo del experimento:

Métodos de medida
Prototipos empleados en el experimento:
Dimensiones
Materiales y fabricación

Resultados y discusión

Conclusiones

EXPERIMENTOS CON PROTOTIPOS

Demostración de la generación de una estela turbulenta con desplazamiento lateral sobre hoyuelo asimétrico con resalte.

Justificación

Introducción

Objetivo del experimento

Modelo teórico
Validación del modelo teórico mediante ensayo experimental:

Método de experimentación:

Diseño del banco de experimentación
Métodos de medida
Prototipos empleados en el experimento
Desarrollo del experimento

Resultados y discusión

Conclusiones

Experimentos sobre prototipos de panel para fachada ventilada con mini aljibe, para enfriamiento evaporativo pasivo estacional.

Introducción

Objetivo de los experimentos

Objetivos
Modelo teórico
Gradiente térmico
Depósitos mini-aljibe
Capilaridad
Validación del modelo teórico mediante ensayo experimental
Gradiente térmico
Potencia evaporativa
Cálculo de la densidad del aire
Empuje
Incremento de entalpía
Autonomía de los depósitos mini-aljibe

Método de experimentación:

Variables consideradas:
Diseño del banco de experimentación:
Experimentos en condiciones reales exteriores:
Irradiancia solar
Experimentos en ámbito interior
Métodos de medida:
Disposición de sensores
Ensayo en modo evaporativo
Gradiente térmico
Volumen de agua evaporado:
Ensayos con reposición
Ensayos sin reposición

Potencia evaporativa:

Incremento de entalpía

Autonomía de los depósitos mini-aljibe

Prototipos empleados en el experimento

Desarrollo del experimento

Condiciones exteriores

Panel seco

Modo evaporativo

Condiciones del área de ensayo en interior controlado

Resultados y discusión

Cálculo del intercambio conductivo en los prototipos de mortero de cal

Objetivo

Consideraciones previas

Cálculo del coeficiente de transmisión térmica

Coeficiente útil de transmisión de calor de la pieza U_u

Resultados

Conclusiones

Cálculo del intercambio convectivo en los prototipos de mortero de cal

Objetivo

Consideraciones previas

Hipótesis de cálculo

Convección en el interior de los alveolos de los paneles P1 y P2

Resultado

Convección en frente de los paneles P1 y P2

Conclusiones

Limitaciones:

Cálculo del intercambio radiante en los prototipos de mortero de cal

Introducción

Objetivo

Consideraciones previas

Hipótesis de cálculo

Intercambio radiante del P2 orientado al Este

Resultados

Conclusiones

Hipótesis de cálculo 2

Cálculo de la energía radiante para P1 y P2 considerando la radiación solar

Resultados

Conclusiones

Comparativa de los mecanismos de transmisión de calor en los prototipos en modo evaporativo, según su orientación

Objetivo

Resultados

Conclusiones

Cálculo del calor sensible en los prototipos de mortero de cal

Introducción

Objetivo

Consideraciones previas

Hipótesis de cálculo
Conclusiones
Limitaciones

EXPERIMENTOS

Los Experimentos realizados se dividen en:

1. Experimentos con probetas
2. experimentos con prototipos

Cada apartado cuenta con varios experimentos que van profundizando en la demostración de la hipótesis, siendo el último de ellos el que incide en el enfriamiento evaporativo del panel y por lo tanto el más importante.

Salvo que se indique lo contrario, el mortero de cal es el material empleado en todos ellos. A continuación de recogen las especificaciones técnicas.

CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO DE CAL EMPLEADO EN LOS ENSAYOS:

Descripción general: (Datos según el fabricante).

Mortero de revestimiento acabado para la impermeabilización de fachadas, que constituye también una base idónea para aplicaciones bicapa (MORCEM ESTUCO REVOCO, morteros acrílicos, estucos minerales, revestimientos y pinturas plásticas).

En interiores y exteriores.

Morcem estuco grueso. F: web del fabricante.

Documentación básica:

Clasificación del preparado:

- Xi Irritante
- R36 Irrita los ojos
- R37 Irrita las vías respiratorias.
- R38 Irrita la piel

Otros peligros:

- Contacto: El compuesto puede producir irritaciones en los ojos y en la piel.
- Inhalación: Puede resultar irritante para las vías respiratorias y mucosas.
- Ingestión: Puede causar irritación intestinal.

Composición e información de los componentes:

Composición:

Producto a base de cemento, cal, áridos de granulometría compensada y otros aditivos

- (Contenido en Cr-VI < 2 ppm).

Componentes peligrosos:

Componente	Nº CAS.	Nº EINECS.	Concentración (%)	Símbolo peligro	Frases R.
------------	---------	------------	-------------------	-----------------	-----------

Hidróxido de Calcio	1305-62-0	215-137-3	5-20	Xi	36/37/38
Cemento	65997-15-1	266-043-4	10-50	Xi	36/37/38/43

Rev. 01/12 – Marzo 2012

Medidas de lucha contra incendios:

Riesgo de incendio y explosión: Producto no inflamable.

El hidróxido cálcico se descompone a 580 °C dando óxido de calcio y agua. El óxido de calcio no es inflamable, pero genera calor en contacto con el agua y los ácidos.

Medios de extinción: El producto no limita, en caso de incendio, el uso de agentes de extinción.

Propiedades físicas y químicas:

Estado físico:	sólido pulverulento.
Color:	Blanco.
Olor:	inodoro.
pH en solución acuosa:	11-13.
Solubilidad:	sin determinar.
Punto de ebullición:	no aplicable.
Punto de inflamación:	no aplicable.
Temperatura de auto-ignición:	no aplicable.
Temperatura de descomposición:	no aplicable.
Punto de fusión:	>1000 °C.

Información ecológica:

No se conocen efectos negativos sobre el medio ambiente una vez fraguado el producto.

El material fraguado es un material estable que fija sus compuestos y los hace insolubles.

El vertido del producto en el agua puede producir un aumento del pH.

Información reglamentaria:

El producto está clasificado y etiquetado según Directiva 1999/45/CE y el Real Decreto 255/2003.

Características y aplicaciones:

- Aplicación directa a la pared de cerramiento sin necesidad de enfoscar.
- Aplicación en interiores y exteriores.
- Permeable al vapor de agua, permitiendo que el soporte respire.
- Ideal para uso en trabajos de rehabilitación.
- Respeta el medio ambiente.
- Acabado fratasado.

Datos técnicos:

(Resultados estadísticos obtenidos en condiciones estándar)

Aspecto:	Polvo GRIS/Coloreado
Densidad del polvo:	1,4±0,2 g/cm ³
Densidad de la masa:	1,7±0,2 g/cm ³
Agua amasado:	21±1%
Clasificación según UNE EN 998-1:	CR CSII W2
Rendimiento aproximado:	16 Kg/m ² por cm de espesor

Declaración de prestaciones Según UNE EN-998-1

Reacción al Fuego:	Clase A1
Absorción de agua:	W2
Coeficiente de difusión al vapor de agua:	$\mu \leq 15$ (Adimensional)
Conductividad térmica :($\lambda_{10 \text{ Seco}}$)	0.76 w/mK (Valor tabulado)
Adhesión:	$\geq 0.2 \text{ N/mm}^2$ Forma de rotura B

Morcem estuco grueso según clasificación de morteros UNE EN-998-1

CR	Mortero para revoco coloreado
CSII	Resistencia a compresión de 1,5 a 5 N/mm ²
W2	Resistencia a la absorción de agua $C \geq 0.2 \text{ Kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$

Otros datos:

Densidad aparente (ρ):	1600 kg/m ³	(NEILA 2004)
Calor específico (C_e):	1.100 J/kg·K	(NEILA 2004)
Emisividad (ξ):	0,91 (entre 10-90°C)	(BRAMSON)
Albedo ($\hat{\alpha}$):	0,9-0,93 (Radiación directa) 0,75-0,81 (Radiación indirecta)	(BARBERO 2014)
Aire ocluido:	>30 (UNE-EN 1015-7)	(Fabricante: <i>Morcemcal</i> <i>Porógeno</i>)

Ejecución:

Relación agua/mortero:	21%	(recomendación fabricante)
Rugosidad (e):	0,5mm	

EXPERIMENTOS CON PROBETAS

Se han realizado 3 experimentos con probetas:

1. *"Experimento de la altura y velocidad de ascensión capilar alcanzadas por el agua en una probeta de mortero de cal de gran altura sometida a distintas condiciones de radiación y temperatura".*
2. *"Experimento de germinación de semillas sobre probeta humectada de mortero de cal".*
3. *"Ensayo de la influencia de la geometría y tonalidad en la T^a superficial de probetas planas de mortero de cal bajo condiciones reales exteriores".*

EXPERIMENTO DE LA ALTURA Y VELOCIDAD DE ASCENSIÓN CAPILAR ALCANZADAS POR EL AGUA EN UNA PROBETA DE MORTERO DE CAL DE GRAN ALTURA SOMETIDA A DISTINTAS CONDICIONES DE RADIACIÓN Y TEMPERATURA:

Introducción:

La rutina *NORMAL 11/85* y *RILEM* permite determinar curvas de absorción y ascensión capilar en función del tiempo. Debido al interés en estudiar el comportamiento de piezas de altura equivalente a las del prototipo, se han modificado las proporciones recomendadas que habrían dado lugar a probetas difícilmente manejables, estableciendo medidas compensatorias.

La probeta debe situarse sobre un papel absorbente empapado de tal modo que sólo se humecte el extremo inferior de la muestra. Se coloca en el interior de una cubeta con una tapa de plástico, disponiendo un papel absorbente para evitar el goteo de la condensación de la cubeta sobre la probeta. Todo ello debe estar aislado en el interior de una campana con valores de humedad y temperatura constantes.

Las probetas pueden ser cúbicas, prismáticas o cilíndricas, pero con proporciones similares en todas sus dimensiones.

Las condiciones de ensayo son específicas y no contemplan condiciones reales como influencia de la radiación solar.

Objetivo del experimento:

Se desea comprobar la altura y velocidad a la que el agua asciende por capilaridad en una probeta de las mismas dimensiones de los prototipos.

Asimismo se desea observar la influencia de la radiación solar experimentando con condiciones no-estándar próximas a las que se darán al ensayar los prototipos en condiciones exteriores.

Las observaciones permitirán establecer criterios comparativos de los factores más determinantes como la geometría y presión hidrostática en los depósitos de agua en relación a los parámetros de eficiencia, consumo de agua y autonomía de los paneles mini-aljibe.

Se propone un experimento basado en la rutina *NORMAL 11/85* y *RILEM* según las anteriores intenciones, ajustando:

Proporción alargada de la probeta y encapsulado que evite la evaporación del agua absorbida pero que permita observar la influencia de la radiación solar.

Modelo teórico:

El experimento está motivado por estudiar el comportamiento de las paredes de los depósitos y frente del panel mini-aljibe. En el caso de los depósitos se espera que a medida que se evapora el agua que contienen, el decremento de nivel (Δh) deje expuesto al aire ambas caras de la pared en las que se espera una evaporación inicialmente por el agua remanente en su sistema poroso y posteriormente reemplazada por la que ascienda por el fenómeno de

capilaridad. Estudiar este fenómeno permitirá entender las variaciones en la potencia evaporativa y la autonomía de los depósitos entre otros datos.

En el caso de la cara exterior, se encuentra en contacto con los vértices exteriores de los depósitos, en los que se espera que aparezca una banda vertical humectada por capilaridad horizontal cuando los depósitos estén llenos y vertical a medida que el nivel del agua descienda.

Secciones esquemáticas de paneles mini-aljibe a medida que descende el nivel de sus depósitos.

En el caso del panel patentado, esta banda vertical quedará a la sombra de las costillas verticales que forman los alveolos, dando lugar a una superficie con un gradiente de humedad y temperatura que daría a lugar a una convección, de manera similar a la que sucede en algunas especies de cactus.

Convección natural sobre la superficie de las costillas verticales del Panel patentado.

Existen numerosas experiencias reflejadas en la bibliografía específica de la cal así como tratados de patología y restauración que describen un ascenso del agua por capilaridad en los morteros de varios metros. La curva de ascenso tiene un carácter asintótico. Pero para una altura de paneles y probeta limitados e impidiendo la evaporación, no se espera observar este fenómeno, tan solo corroborar que la capilaridad será capaz de humectar la totalidad de la altura de las paredes de los depósitos para mantener el rendimiento de los paneles mini-aljibe sin que se vea mermado por el descenso de las reservas de agua de los mismos.

En cuanto a la exposición al sol y la variación de temperatura, se espera una mayor progresión capilar al verse modificadas las propiedades del agua dado que la viscosidad disminuye con la T^a . (SEESE et al.1989).

Gráfica de la viscosidad del agua en función de la temperatura. Redibujado a partir de (ASHRAE fundamentals 1997).

Como la temperatura será variable en el ensayo de asoleo, se toma un periodo de 24h de manera que pueda expresarse una temperatura media del aire diaria y establecer una comparativa con la temperatura del ensayo en ausencia de radiación solar.

Ensayos previos:

Los morteros de restauración absorben agua y se secan con gran rapidez.

Experimentos previos realizados sobre el mortero de cal elegido muestran que su superficie es claramente hidrófila, con ángulos de contacto próximos a cero y una absorción rápida de la gota.

Método de ensayo:

Banco de ensayo:

Se plantean dos bancos de pruebas: Uno de asoleo y otro en sombra, que permitan comparar la influencia de la radiación solar.

En ambos casos la probeta se dispone en posición vertical sobre un papel absorbente que se mantiene constantemente humedecido sobre una bandeja de plástico de 60x40cm.

La probeta se impermeabiliza tal y como se explica más adelante por lo que la humedad relativa solo influye en la claridad de la atmósfera.

Esquema de probeta sobre papel absorbente

El banco en asoleo, acristalado con orientación Este, sin oclusión solar:

La probeta se orienta al Este, siendo la Sur más adecuada pero no disponible. El experimento se lleva a cabo en condiciones de estabilidad atmosférica con cielos despejados.

Irradiancia media horaria sobre la probeta (orientación Este) (Latitud 40° N).

El banco sombreado, en interior, es un receptáculo resguardado de la radiación solar en el que se mantienen unas condiciones de temperatura constantes de 25°C. La orientación de la probeta resulta en este caso irrelevante.

Probeta:

Dimensiones: La probeta de ensayo es un paralelepípedo laminar de 33x10x1,5cm

Dimensión de la probeta.

Materiales y fabricación:

Probetas de mortero de cal. La dosificación es *Morcem estuco grueso* con un 21% de agua según las recomendaciones del fabricante. La probeta dispone de un armado de malla de fibra de vidrio con tratamiento anti-álcalis con luz de malla de 2,4mm y resistencia a la tracción 650N/5cm.

La fabricación de las probetas se realiza sobre molde de acetato que encaja en una mesa de encofrado. El material plástico facilita el desencofrado y evita la absorción de agua por parte del molde.

Encapsulado:

La alta porosidad del mortero de cal favorece el equilibrio de presiones de vapor entre su interior y exterior. En ausencia del receptáculo establecido por la rutina *NORMAL 11/85* y *RILEM* que impide la evaporación del agua contenida por la probeta, se hacen necesarias medidas compensatorias que logren una situación similar impermeabilizando la probeta, pero de tal modo que permitan la interacción con un ambiente exterior. Con este criterio se dispone una doble impermeabilización consistente en una capa de cera de 1mm en toda la superficie de la probeta excepto en la cara inferior que deberá de absorber el agua y una banda de 3 cm de anchura a lo largo de una de las caras para permitir la observación y fotografiado de la progresión de la humedad. Sobre esta impermeabilización se dispone una segunda; consistente en una lámina de film plástico transparente, complementaria a la anterior y que limitará la evaporación a través de la banda de observación.

Esta variación sobre a la rutina *RILEM* reduce al mínimo el aire que interactúa en el área de ensayo y por tanto el volumen de agua que puede albergar en forma de vapor, minimizando la influencia de este factor mediante métodos distintos pero equivalentes. Asimismo se espera que este remanente de aire alcance valores próximos a su saturación en cuanto se humedezca la probeta, asemejándose a la rutina *RILEM*.

Esquema de probeta encapsulada.

Métodos de medida:

El intervalo de medición es de 24h

La probeta se sitúa las primeras 24h en el banco de asoleo y a continuación se introduce en el banco en sombra para tener un criterio comparativo.

El experimento se prolonga hasta que el progreso de la humedad sea asintótico o se alcance el extremo superior de la probeta.

La probeta es pesada sobre una báscula, retirando previamente cualquier exceso de agua adherido a la base que está en contacto con el papel humedecido.

Se registra la altura humedecida por ascensión capilar a lo largo de la banda de observación. El incremento de altura es observable a simple vista; sin embargo el oscurecimiento es tan sutil que se ha recurrido a imágenes termográficas para graficar de forma más evidente el avance de la humedad.

Una vez registrados los incrementos de masa y altura de la marca de humedad, se elaboran gráficas en función del tiempo.

Desarrollo del experimento:

Las condiciones en los bancos de experimentación fueron las siguientes:

Día	t (h)	T _a (media diaria. Asoleo) (°C)	T _a (sombreado) (°C)	P (hPa)	M (g)	h (cm)
26	0	32,7	-	1030.6	789	0
27	24	-	25	1024.7	866	18,5
28	48	-	25	1017.8	885	25,0
29	72	-	25	1029.2	901	29,8

Resultados y discusión:

Imágenes (sólo por su interés gráfico):

Secuencia del ascenso capilar captada mediante termografía tras 24, 48 y 72h.

Elaboración de gráficas a partir de las mediciones recogidas:

Gráfica de ascensión del agua (en cm) en probeta de mortero de cal por capilaridad.

Gráfica de incremento de peso (en g) de probeta de mortero de cal por absorción de agua por capilaridad.

En las primeras 24h corresponden al primer banco de experimentación (Asoleo). Las pendientes son más acentuadas, reflejando un progreso de la capilaridad a mayor velocidad que en el siguiente periodo (sombreado) en que sus pendientes se mantienen.

Conclusiones:

Ambas gráficas presentan perfiles similares conformando la validez de los datos de la otra. Puede concluirse que el soleamiento incrementa la temperatura ambiental, esta reduce la viscosidad del agua e incrementa la velocidad de ascenso por capilaridad. Al estabilizar la temperatura durante las últimas 48h de experimento, la velocidad de ascensión no muestra signos de comenzar la ralentización asintótica característica, por lo que la altura máxima del ascenso por capilaridad es superior a la de la probeta (>0,3m).

Conclusiones de interés para el diseño de los paneles mini-aljibe:

El mortero de cal empleado presenta unas propiedades capilares de acuerdo con las expectativas. Puede garantizarse que la totalidad de la altura de un panel de hasta 0,3m podrá humectarse aun cuando los depósitos estuviesen en niveles mínimos, colaborando en mantener su capacidad de enfriamiento evaporativo.

Un panel con superficies evaporativas fabricadas con un material que presente capilaridad adaptará su consumo de agua y potencia refrigerante a la temperatura exterior de forma pasiva.

Limitaciones del experimento:

No se ha determinado la influencia del PH.

No se ha determinado la tortuosidad del sistema capilar.

EXPERIMENTO DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS SOBRE PROBETA HUMECTADA DE MORTERO DE CAL.

Introducción:

Lograr que la presencia de agua no implique un riesgo microbiano o de proliferación de insectos ha sido una constante en el diseño. Al margen de las barreras físicas detalladas en otros capítulos, este apartado no desaprovecha la oportunidad de apuntalar estas medidas.

Existe un gran número de plantas con supuestas propiedades para ahuyentar insectos: *Cymbopogon Citratus* (Citronela), *Pelargonium Crispum* (Geranio limón) *Jasminum* (Jazmín), *Achlys triphylla*, *Chrysanthemum leucanthemum* (Margaritas) *Ageratum*... De algunas de ellas se extraen compuestos como cumarina o piretro entre otros, empleados como repelentes comerciales o insecticidas.

La elección de la albahaca como primera especie a ensayar responde a estos criterios. En la bibliografía específica se estudian los efectos antibacterianos de aceites volátiles, (MÜLLER et al. 1994), (Comisión Europea 2001). Asimismo Chang, Cho y Li, también analizan su contenido en Estragol, trans-anetol y Linalool, con propiedades insecticidas (CHANG et al. 2009).

El linalool es emitido tanto por cítricas como por angiospermas desde sus órganos reproductivos, a menudo junto con otros terpenos (RAGUSO et al. 1999). Su relación con las especies polinizadoras es compleja. Resulta tóxico para la mayoría de los hongos (RAGUSO et al. 1999) y microbios. (KNOBLOCH et al. 1989), (LAWTON et al. 1993), (WEIDENHAMER et al. 1993), (LEE et al. 1998).

Objetivo:

Se ensaya la capacidad del mortero de cal como sustrato para la germinación de especies vegetales y determinar de este modo la viabilidad de vegetar el panel de enfriamiento evaporativo.

Se trata de un paso previo para determinar la capacidad de vegetar los paneles mediante especies con propiedades específicas: bactericidas, insecticidas, plaguicidas etc.

Limitaciones:

No se trata de un estudio botánico que determine en qué medida cada especie es compatible con el mortero de cal, sino un estudio preliminar de la viabilidad de la vegetación de un panel con un PH altamente alcalino.

Banco de experimentación:

El experimento se desarrolla en un espacio exterior cubierto, expuesto a la radiación solar directa. La probeta se coloca en el interior de una cubeta de plástico en la que se mantiene una fina lámina de agua de tal modo que la cara inferior de la probeta esté en contacto constante con el agua, permitiendo que esta ascienda por capilaridad y humecte la pieza entera.

Esquema de humectación de probeta de mortero cal en cubeta de plástico.

Prototipos empleados en el experimento:

La probeta empleada es una pieza prefabricada de mortero de cal de dimensiones: 33x10x1,5cm idéntica a las empleada en la fabricación de los prototipos (a excepción de las acanaladuras).

Desarrollo del experimento:

La probeta en forma de placa se dispone en horizontal sobre la lámina de agua.

A continuación se espolvorearon semillas de *Taraxacum officinale* (diente de León) y *Ocimum basilicum* (albahaca).

Simultáneamente se lleva a cabo una plantación de control en un sustrato orgánico comercial.

Resultados y discusión:

2014_9_10 (Siembra de albahaca)

2014_9_14

Germinación: Se observa la germinación de las primeras semillas de ambas especies. (Albahaca: negras y redondas, Diente de León: marrones y alargadas)

Se ha producido en el menor tiempo esperado, incluso estando fuera de la estación y temperatura apropiada de siembra y con semillas que llevaban varios años almacenadas.

2014_9_17

El porcentaje de semillas germinadas fue de un 80% en el caso del diente de león y de un 20% en el de la albahaca. El crecimiento de cada especie fue proporcional a su germinación.

En la plantación de control la germinación fue similar en ambas especies (próxima al 100%), por lo que la disparidad de resultados sobre la probeta tuvieron que deberse exclusivamente a sus condiciones particulares y no al estado de las semillas.

2014_9_25

2014_10_05

Conclusiones:

El ensayo demuestra que el sustrato de mortero de cal es viable para el crecimiento de determinadas especies, e invita a realizar investigaciones mas especificas del crecimiento vegetal sobre materiales empleados en las envolventes de los edificios, ya sea intencionadamente para fachadas vegetadas o como para estudios patológicos.

Ensayos adicionales:

Comprobada la capacidad de crecimiento de las semillas se coloca la probeta en vertical. El sistema radicular soporta las plantas incluso bajo en condiciones de viento (2m/s)

Plantación.

Se realiza un experimento de siembra sobre una probeta humectada dispuesta en vertical. Los resultados son negativos. La tensión superficial no es suficiente y el porcentaje de semillas retenidas en la superficie es inferior al 10%.

Se realiza un último ensayo sembrando en horizontal y se espera a que las semillas se humecten; posteriormente se coloca la probeta en vertical. En este caso el porcentaje de semillas retenidas en superficie alcanza el 50%.

Es razonable suponer que con las técnicas adecuadas de hidrosiembra y un adecuado patrón superficial, la plantación de los paneles directamente en vertical alcance resultados muy superiores.

EXPERIMENTO DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA Y TONALIDAD EN LA Tª SUPERFICIAL DE PROBETAS PLANAS DE MORTERO DE CAL BAJO CONDICIONES REALES EXTERIORES:

Objetivo del experimento:

La hipótesis planteada es un panel que acumule la contaminación en su superficie durante el invierno, de tal manera que al oscurecerse disminuya su albedo y aumente su temperatura superficial.

Los siguientes ensayos tienen por objeto conocer la influencia de la suciedad, rugosidad y textura en el aumento de la temperatura superficial sobre el mortero de mortero de cal elegido para fabricar el prototipo bajo condiciones exteriores reales.

La bibliografía aporta estudios de cada uno de estos factores por separado, siendo de especial relevancia la tesis de (BARBERO 2011) en cuanto al comportamiento de la cal y sus propiedades radiantes. Sin embargo el planteamiento de una fachada con acabado de mortero de cal que pueda variar su absorción de forma estacional mediante la acumulación de sedimentos contaminantes en condiciones exteriores gracias a una determinada geometría requiere de ensayos específicos.

Modelo teórico:

Factores geométricos que afectan a la temperatura superficial:

Rugosidad y textura son las irregularidades que presenta la superficie. La diferencia estriba en el tamaño de estas irregularidades. Las irregularidades incrementan la superficie de la interfase sólido-aire. La bibliografía fluidodinámica y aeronáutica no contemplan distinciones de escala, empleando únicamente el término "*rugosidad*" (WHITE 2004) (SHAMES 1995) (SMITS 2003) (ASHRAE). Sin embargo, bajo ciertas circunstancias como la exposición al sol, los efectos sobre la temperatura superficial pueden diferir dependiendo de la escala de estas irregularidades hasta el punto de resultar opuestos.

La rugosidad: Cuando la escala de las irregularidades es tal que influye con el tamaño de las ondas que llegan a la superficie (KEITZ 1974). Afectando al albedo, incrementando la absorción (SIEGEL et al. 2002) y con ello la temperatura superficial. (BARBERO 2011).

El flujo térmico disminuye en los acabados lisos (BARBERO 2011). Si la relación entre la media cuadrática de la rugosidad y la longitud de onda es superior a la unidad, la longitud de onda queda atrapada entre las irregularidades y la emisividad y absorción aumentan (SIEGEL et al. 2002).

Bajo la notación propuesta y a las velocidades alcanzadas por convección natural, su influencia sobre el movimiento fluidodinámico se considera despreciable.

La textura: Abarca una escala de irregularidades superficiales mayores. Aumenta la convección (ASHRAE1997), (BLES 1994), Interactuando fundamentalmente con el movimiento fluidodinámico sobre su superficie.

El tamaño en el que los surcos, entrantes y salientes o patrones de resaltos de la *textura* son tan finos que se puede considerar *rugosidad* está relacionado con el comportamiento laminar o turbulento del fluido sobre su superficie. Las velocidades del fluido son las producidas por la convección natural inducida por la radiación solar y el límite en el que la viscosidad del fluido impide la turbulencia según Kolmogorov es:

$$\eta=(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$$

Donde:

ν es la viscosidad cinemática del fluido (En el caso del aire es $1,52 \cdot 10^{-5}$ a 20°C)

ϵ es la velocidad promedio de disipación de energía por unidad de masa

η es la *Escala de longitud de Kolmogórov* y puede alcanzar valores de **0,001 a 0,01 m**

Método de ensayo:

Variables:

La influencia de las condiciones superficiales en la temperatura del material a emplear en los futuros ensayos se analiza mediante un grupo de probetas con distintas variables:

La variable rugosidad: probeta 1; en la que la variable es el acabado liso o rugoso.

La variable oscurecimiento por ensuciamiento: Probetas 2,3,4 y 5 en las que la variable común es un extremo limpio y otro sucio. A su vez cada probeta es distinta de las demás, presentando texturas diferentes.

Oscurecimiento por contaminación urbana:

Las probetas (2,3,4 y 5) son sometidas a un ensuciamiento en una de sus mitades, manteniendo limpio el extremo opuesto para establecer una comparativa. Para lograr el mayor realismo las probetas son expuestas a la intemperie urbana en la misma posición vertical que tendrían en una fachada; con la mitad protegida mediante film plástico a fin de observar su progresivo oscurecimiento. Debido a limitaciones de tiempo y disponibilidad de medios auxiliares, tras dos semanas de "ensuciamiento natural", el proceso tuvo que acelerarse por motivos de disponibilidad de equipos: Como el objeto de la tesis no es determinar la naturaleza y detalles de los procesos de ensuciamiento, sino su influencia térmica en el panel propuesto, se forzó el ensuciamiento de las probetas transfiriendo a las probetas partículas de suciedad recogidas de una fachada urbana situada en el centro de Madrid hasta alcanzar niveles equivalentes de detritus y tonalidad.

Diseño del banco de experimentación:

Las mediciones tienen lugar en Madrid en un espacio exterior.

Disposición de las probetas en posición horizontal, perpendiculares a la radiación solar y puntos de medición con sonda superficial.

Las probetas se disponen perpendiculares al sol en posición horizontal para que el movimiento convectivo del aire generado en un área no influya sobre la otra.

La superficie horizontal sobre la que se apoyan es de madera para reducir la reflexión de la radiación.

Desarrollo del experimento:

Las probetas permanecen toda la noche en el espacio exterior en que se va a realizar la medición y la toma de datos comienza a la salida del sol, de manera que las temperaturas iniciales de las probetas y su entorno son similares y sus variaciones se vean influidas fundamentalmente por la radiación solar.

Condiciones exteriores:

Las mediciones fueron llevadas a cabo con cielo despejado.

2/01/2015 Hora:	ϑ (°C)	H.R. (%)	P (hPa)
9:00	8,3	45	1009.2
9:30	15,5	38	1009.2

Métodos de medida:

Puntos de medida y sensores:

Se monitoriza la temperatura y humedad relativas ambientales en el entorno del banco de experimentación. La sonda se dispone a la sombra, resguardada de cualquier radiación directa o reflejada y permitiendo la libre circulación del aire.

La presión atmosférica es recopilada a partir de los datos publicados por AEMET.

Condiciones del entorno:

- Temperatura y humedad relativa ambientales mediante estación termo-higrométrica modelo: *TFA Klimalogg Pro 30.3039.IT*.

Rango de humedad: 1-99% precisión: $\pm 3\%$ rH

Temperatura: 0-+59 °C precisión: $\pm 0,1$ °C

Probetas:

Se monitoriza la temperatura superficial en el frente de las probetas de cal, en el eje longitudinal de las probetas en el punto en que equidista de tres de sus lados mediante sensor con resorte de banda termopar: *Testo 0602 0393*

Rango de temperatura: -60°C a 300°C (Precisión clase 2)

Los datos son trasladados a un Data Logger multifunción modelo: *Testo 435-2*

Durante el ensayo se recogen imágenes mediante cámara termográfica marca *Flir*, modelo: *E30bx B 1.1*

Rango de temperaturas: -20-+120 °C precisión: $\pm 2^\circ\text{C}$ o $\pm 2\%$

Rango espectral 7,5-13 μm

Resolución IR: 160x120 Pixels

Limitaciones de los sensores:

Cada uno de los dos sistemas de medición presenta ventajas e inconvenientes.

La sonda superficial puede verse condicionada por la falta de planeidad de las superficies a medir. (El sensor no está en pleno contacto con la superficie irregular y se ve afectado por la temperatura del aire, especialmente en condiciones exteriores con brisa.) Realizar una medición exacta de temperatura mediante la cámara termográfica requiere de una precisa calibración. (reflexiones, humedad atmosférica, etc). También es muy sensible a las superficies pulidas que producen reflejos sin que necesariamente estén a mayor temperatura como se demostrará en la probeta 1.

Prototipos empleados en el experimento:

Dimensiones:

Las probetas son placas rectangulares planas de 0,33x0,1x0,015m

Dimensiones de las probetas.

Las piezas se fabrican con un espesor de 1,5cm y con forma plana para que su tiempo difusivo sea de unos pocos minutos y la inercia térmica no desvirtúe las mediciones.

Materiales y fabricación:

Probetas de mortero de cal. La dosificación es *Morcem estuco grueso* con un 21% de agua según las recomendaciones del fabricante. La probeta dispone de un armado de malla de fibra de vidrio con tratamiento anti-álcalis con luz de malla de 2,4mm y resistencia a la tracción 650N/5cm.

La fabricación de las probetas se realiza sobre molde de acetato que encaja en una mesa de encofrado. El material plástico facilita el desencofrado y evita la absorción de agua por parte del molde.

mesa de encofrado. Vista en planta.

Probeta 1:

Tras la dosificación, amasado y vertido sobre el molde, se vibra la mesa de encofrado durante 1 minuto, obteniendo una superficie superior mas lisa y menos porosa.

Acabado superficial:

Finalmente se lija superficialmente la mitad de la probeta dejando su estructura porosa abierta, pero garantizando la homogeneidad del resto de variables.

Aspecto:

Probeta 1

↑ Área rugosa (Arriba) / Área lisa (debajo) ↓

Probeta 2:

Su fabricación es análoga a la probeta 1, con la diferencia en que se realiza un escarificado cuando la pasta ha ganado consistencia, pero aún se encuentra trabajable.

← Área limpia (Izquierda) / Área sucia (derecha) →

Probeta 2

Probeta 3:

Su fabricación es análoga a la probeta 1, con la diferencia en que el encofrado se realiza sobre una forma estriada e impermeabilizada con film plástico.

Probeta 3

Probeta 4:

Su fabricación es análoga a la probeta 1, con la diferencia de no ser vibrada y el molde de acetato, al haber sido empleado con anterioridad, no proporciona un acabado con el poro superficial tan cerrado.

Probeta 4.

Probeta 5:

Su fabricación es análoga a la probeta 4, con la diferencia de que su acabado superior se realiza mediante llana de madera, maximizando la porosidad superficial, según especificaciones del fabricante.

Probeta 5.

Resultados y discusión:

Probeta 1 (Superficie Lisa/rugosa):

Las mediciones mediante sonda superficial resultan contradictorias respecto a las tomadas con sonda termográfica. Esta última se ve afectada por numerosos factores, siendo las propiedades radiantes de la superficie las que más desvirtúan los datos.

Fotografías de la superficie en el espectro visible e infrarrojo. Probeta 1

Si bien la cámara termográfica resulta un apoyo, los datos de temperatura superficial considerados en las conclusiones se basan en los recogidos mediante sonda superficial:

Mediciones según sonda de temperatura superficial:

Ambas superficies son del mismo material y composición. No han estado expuestas a la contaminación atmosférica y se pueden considerar igualmente "limpios". Sin embargo las mediciones registran sistemáticamente una temperatura superficial entorno a 1°C en aquella superficie rugosa, lijada y de poro abierto respecto a la lisa.

Probetas (Superficie Limpia/sucia):
Mediciones según termografía:

Fotografías de la superficie en el espectro visible e infrarrojo. Probetas 4 y 2

Fotografía de la superficie en el espectro infrarrojo. Probeta 5

Las imágenes termográficas muestran un calentamiento superior de las superficies oscurecidas por la suciedad.

Mediciones según sonda de temperatura superficial:

En este caso las mediciones con ambos medios (termografía y sonda superficial) registran valores acordes entre sí.

Probeta 2.

La suciedad incrementa la T^a superficial en +2,8 °C

Probeta 3.

La suciedad incrementa la T^a superficial en +3,8 °C

Probeta 4.

La suciedad incrementa la T^a superficial en +4 °C

Probeta 5.

La suciedad incrementa la T^a superficial en +6,8 °C

Conclusiones:

La suciedad acumulada sobre una fachada con acabado de mortero de cal expuesta al sol incrementa su temperatura superficial. Comparativamente su influencia es superior a la de la textura y aún más a la de la rugosidad.

Una superficie que persiga minimizar la temperatura superficial deberá tener una tonalidad tan clara como sea posible y permanecer limpia, siendo estos dos factores los más determinantes. En un orden secundario, su superficie no sería plana sino con entrantes y salientes que ayudaran a devolver a la atmósfera la radiación recibida mediante la convección. Por último su superficie debería de ser microscópicamente plana para evitar que la radiación incidente quede atrapada en las irregularidades (SIEGEL et al. 2002).

Limitaciones y futuras investigaciones:

Son necesarios más ensayos en los que puedan aislarse las variables geométricas, sistematizando y homogeneizando el ensuciamiento para optimizar la textura, profundidad, dirección de las estrías, etc.

EXPERIMENTOS CON PROTOTIPOS

Se han realizado 2 experimentos con prototipos:

4. *" Demostración de la generación de una estela turbulenta con desplazamiento lateral sobre hoyuelo asimétrico con resalte".*
5. *"Experimentos sobre prototipos de panel para fachada ventilada con mini aljibe, para enfriamiento evaporativo pasivo estacional".*

DEMOSTRACIÓN DE LA GENERACIÓN DE UNA ESTELA TURBULENTO CON DESPLAZAMIENTO LATERAL SOBRE HOYUELO ASIMÉTRICO CON RESALTE:

Justificación:

El motivo del experimento es la demostración del funcionamiento de una geometría superficial de hoyuelos con resaltes generada a lo largo de las estrías helicoidales tal y como ha sido descrita en el panel patentado.

Distribución del patrón de hoyuelos a lo largo del vértice de las estrías y detalle en planta del mismo.

1. Introducción:

Los resaltes hidráulicos mezclan fluidos de forma muy efectiva. (WHITE 2004). Un ejemplo de aplicación está en los condensadores de aparatos de aire acondicionado. Inicialmente se trataba de tubos huecos de cobre a los que progresivamente se fueron añadiendo aletas. La optimización del intercambio de calor y masa dio lugar a estrías en zigzag, espirales etc. Las estrías fueron posteriormente talladas con micro-dentados. Si bien todas estas geometrías producen una pérdida de carga mayor que los tubos lisos, el aumento del rendimiento supera este inconveniente. (SHAH et al. 2014).

Evolución de las roscas internas de los tubos de cobre en los aparatos de AC en Japón. Fuente: Daikin (2007) y ECCJ (2006), "Final SEAD Room AC Report".

El nº de Biot (adimensional) presenta expresiones análogas para el intercambio de calor y masa. En el primer caso, un resultado superior a la unidad indica que el intercambio es fundamentalmente convectivo. En caso contrario, la transmisión se produce en mayor medida por conducción.

La analogía con la transferencia de masa radica en que los fenómenos turbulentos aceleran la dispersión de las partículas respecto a la simple difusión que sucede a nivel molecular en dirección opuesta al gradiente de concentraciones.

Intercambio de humedad y temperatura mediante turbulencias producidas por patrones tridimensionales:

Distintas investigaciones han analizado las turbulencias producidas por patrones geométricos concretos para determinar cuál crea mayores vórtices y estelas más largas que optimicen el intercambio convectivo.

Los hoyuelos triangulares resultaron ser los que mayores valores de intercambio de masa y temperatura presentaban según (DAFEDAR et al. 2013) frente a patrones cuadrados o circulares, demostrando además que la dirección del flujo resulta determinante. Sin embargo no contemplaba patrones con forma de gota que según (ZHOU 2007), resultaban aun más eficientes comparados con los todos los anteriores.

Valores del nº de Sherwood para distintos patrones geométricos. ZHOU (2007).

2. Objetivo del experimento:

La bibliografía señala la efectividad de cada patrón geométrico ensayado (ZHOU 2007) (DAFEDAR et al. 2013). Los experimentos se realizaron sobre patrones geométricos simétricos que generan estelas paralelas al flujo centradas en su eje de simetría.

El aporte de este experimento es un resalto asimétrico que se repetiría a lo largo de las estrías interiores de los alveolos, destinados a incrementar la difusión del vapor de agua desde su superficie saturada hacia el flujo de aire que circula sobre su superficie, demostrando la capacidad de desplazar lateralmente la corriente de aire que se desplaza sobre él.

Aplicado al interior de los alveolos se pretende:

- Incrementar el enfriamiento evaporativo mediante una mayor difusión del vapor hacia las capas del flujo de aire más alejadas y secas en el rango de la capa límite.
- Inducir un movimiento rotacional en el flujo de aire que aumente el intercambio de masa en el rango del diámetro del alveolo.

2.2 Modelo teórico:

El experimento se aprovecha del paralelismo entre los fenómenos físicos de transferencia de calor y masa. Demostrando el comportamiento turbulento convectivo se extrapola que el fenómeno de transferencia de masa

La generación de vórtices aumenta el intercambio de masa de agua entre puntos con distinta saturación de humedad. Los vórtices aparecen invariablemente a velocidades elevadas, cuando las fuerzas de inercia superan a las viscosas. Para facilitar la aparición de vórtices a baja velocidad se busca el desprendimiento de capa límite por medio de resaltos hidráulicos *tempestuosos* (WHITE 2004) que proyecten el flujo y den lugar a una estela amplia turbulenta con el menor cambio de sección.

Hoyuelo, Visto en sección vertical, en el que se representa esquemáticamente la creación de vórtices sobre la corriente de aire que circula por el alveolo.

Hoyuelo, visto en alzado, en el que se representa esquemáticamente el desvío de la corriente de aire.

2.3 Validación del modelo teórico mediante ensayo experimental:

Las turbulencias crean un intercambio de energía por convección que puede ser fotografiado mediante cámara termográfica. Si el banco de trabajo logra un régimen laminar y el prototipo induce una estela turbulenta, debería apreciarse una variación significativa de la temperatura superficial por enfriamiento convectivo.

El intercambio convectivo de masa se extrapolará a partir del intercambio convectivo térmico. Para registrarlo se recurrirá a una imagen termográfica que muestre cómo las turbulencias colaboran en enfriar una superficie expuesta a la radiación infrarroja.

Al mismo tiempo la demostración del movimiento lateral inducido al flujo de aire debería aparecer como una estela asimétrica, proyectada en la dirección del resalto.

3. Método de experimentación:

3.1 Diseño del banco de experimentación:

Disposición de prototipo:

Esquema del banco de trabajo.

El prototipo se dispone verticalmente enfrente a una placa radiante que calentará su superficie. Entre ambas se hace circular una corriente de aire mediante ventilación forzada a una velocidad constante. La corriente es impulsada mediante dos ventiladores dispuestos en serie. El prototipo se sitúa entre ambos.

3.2 Métodos de medida:

Se monitoriza la temperatura y velocidad del aire sobre la superficie del prototipo mediante sonda telescópica termo-anemométrica de hilo caliente modelo *Testo 0635 1025*.

Rango de velocidad: 0-20m/s $\pm$ 5%. Resolución de 0,01m/s.

Rango de temperatura: -20°C a 70°C $\pm$ 0,3°C

Se fotografía la superficie del prototipo mediante cámara termográfica: *Flir*, modelo *E30bx B 1.1*

Rango de temperaturas: -20-+120 °C precisión: $\pm$ 2°C o $\pm$ 2%

Rango espectral 7,5-13 μ m

Resolución IR: 160x120 Pixels

3.3 Prototipos empleados en el experimento:

El prototipo es una lámina de policarbonato de 0,21x0,295m y 0,005m de espesor imprimada en color negro. La delgadez del material reduce al mínimo la inercia térmica de la pieza facilitando registrar los cambios de temperatura de forma casi instantánea. La imprimación en negro transforma el policarbonato en un cuerpo opaco con una elevada absorción. Se dibuja

una retícula de 0,05x0,05m sobre la lámina base para marcar el eje así como ayudar a medir la longitud y ángulo de la estela generada.

El patrón tridimensional tiene 0,03m de largo, una profundidad de 0,005m y sobresale la misma distancia de su plano por lo que su relieve total es de 0,01m. Se adosa como pieza intercambiable en un hueco dispuesto en la lámina base. La forma de hoyuelo es de policarbonato conformado por succión al vacío y el resalto se realiza en masilla bicomponente. El conjunto se imprima en negro como la lámina base.

Fotografía del prototipo y detalle del patrón tridimensional.

3.4 Desarrollo del experimento:

El patrón tridimensional a evaluar se coloca entre un ventilador de impulsión y uno extractor para obtener un flujo homogéneo.

El aire se impulsa a una temperatura inferior a la de la muestra y se registra la variación de temperatura sobre la superficie cuadrículada que rodea al patrón tridimensional.

Parámetros:

Temperatura del aire: 23,4°C

Distancia de la placa al prototipo 1,2m

Temperatura de la placa radiante: 200 °C

Velocidad media del aire sobre el patrón tridimensional: 0,32m/s.

Para obtener un enfriamiento registrable con el equipo disponible, los patrones tridimensionales tienen una escala 2:1 y las velocidades de trabajo son superiores a las que previsiblemente se alcanzarán en la fachada y la longitud de la estela será previsiblemente menor. El nº de Reynolds que se alcanza en los alveolos señala un régimen de transición, por lo que los resaltos trasformarán igualmente el flujo laminar en turbulento a velocidades más bajas respecto a un conducto liso.

4. Resultados y discusión:

El experimento comienza con el calentamiento de la placa, que radia calor hacia la superficie del prototipo. Se aprecia como inicialmente la pintura blanca de la retícula refleja parte de la radiación incidente.

Imagen termográfica del prototipo sin circulación de aire y únicamente expuesto a la placa radiante.

Al conectar los ventiladores, la temperatura de la superficie se homogeniza en las áreas barridas por la corriente.

El flujo que incide sobre el patrón crea una estela en la que se aprecia un descenso de la temperatura superficial. La estela "fría" a gran distancia de forma asimétrica. Se proyecta 0,15m (5 veces la longitud del hoyuelo y 15 veces su relieve total).

Imagen termográfica del prototipo en la que se aprecia el enfriamiento convectivo y el desplazamiento lateral de la corriente de aire.

5. Conclusiones:

El patrón tridimensional altera el régimen del flujo, produciendo un mayor intercambio convectivo como se aprecia en la "estela fría" de la imagen. La imagen termográfica demuestra la capacidad de del patrón de desviar la corriente de aire de forma lateral, cumpliendo con las expectativas para crear un flujo rotacional en el interior de los alveolos.

Esto implicará en un incremento del enfriamiento evaporativo al conseguir mezclar el aire saturado de la humedad que rezuma de los depósitos con el más alejado y seco.

EXPERIMENTOS SOBRE PROTOTIPOS DE PANEL PARA FACHADA VENTILADA CON MINI ALJIBE, PARA ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO PASIVO ESTACIONAL.

1. Introducción:

Una vez identificados en el Estado del Arte las características más adecuadas para el diseño de una fachada energéticamente más eficiente para climas cálidos, se patentó un panel bajo el título: *"Panel para enfriamiento evaporativo indirecto de fachadas"* (PALOMAR 2015). Este panel combina multitud de estrategias pasivas. Aunque necesarias, algunas de ellas exceden el ámbito energético. Como la investigación de la tesis versa sobre el enfriamiento evaporativo en fachadas, se elaboran dos prototipos en los que se simplifica la geometría del panel patentado para demostrar en ellos la validez de las hipótesis de eficiencia energética planteadas, tanto en condiciones controladas como reales en exteriores.

2. Objetivo de los experimentos:

2.1 Objetivos:

Se propone demostrar la capacidad de refrigeración de un sistema constructivo de panel para fachada ventilada, que cuenta con mini-aljibes para incorporar enfriamiento evaporativo pasivo con carácter estacional, por medio de dos prototipos similares de mortero de cal dispuestos en orientaciones distintas.

Los experimentos determinarán:

- Gradiente térmico alcanzado por los prototipos en condiciones reales.
- Potencia evaporativa de los prototipos en W/m^2 .
- Incremento de la entalpía del aire a su paso por los prototipos.
- Influencia de la orientación: (Asoleo/sombra).
- Flujo energético del sistema por medio del empuje en el interior de la cámara ventilada
- Autonomía de los depósitos e influencia de su nivel en la capacidad refrigerante.
- Eficiencia de los prototipos según a la metodología de otros investigadores.
- Condiciones límite de funcionamiento. Influencia del grado de saturación del aire, dependiente de la humedad y temperatura, en un ambiente controlado.

2.2 Modelo teórico:

El objetivo es un sistema de envolvente, motivado por la Directiva 2010/31/UE sobre "Edificios de energía casi nula", que pueda reducir la demanda de refrigeración para climas cálidos y templados de forma pasiva. Para ello se combinan tres sistemas o principios: Fachada ventilada, superficies selectivas frías y enfriamiento evaporativo. Los beneficios de estos principios han sido generalmente investigados de forma individual, pero no su interacción en un mismo sistema constructivo.

Para fabricar el sistema constructivo propuesto se recurre al mortero de cal hidráulico por sus propiedades selectivas frías, su resistencia a la intemperie, impermeabilidad al agua pero permeabilidad al vapor gracias a su estructura porosa.

El mortero de cal utilizado se emplea tanto en obra nueva como en rehabilitación. Su permeabilidad facilita el secado de mampostería con patologías de humedades.

Tanto el enfriamiento evaporativo como el radiante tienden a enfriar el aire contenido en la cámara ventilada, aumentando su densidad e iniciando un movimiento descendente. El incremento de densidad genera una fuerza de empuje que puede ser monitorizada en tiempo real, describiendo el flujo energético que tiene lugar por efecto combinado de todos los condicionantes. Si el panel absorbe más energía de la que es capaz de disipar, la corriente

convectiva será ascendente. Se por el contrario se está produciendo un enfriamiento, la hipótesis contempla una corriente descendente.

Hipótesis de superposición de enfriamiento evaporativo y radiante.

Debido a los ciclos diarios, la temperatura variará con el tiempo; el flujo de calor será por tanto: *"no estacionario o transitorio"*. Estas variaciones se consideran únicamente a lo largo del espesor de los paneles por lo que el flujo se considerará: *"unidimensional"*.

Gradiente térmico:

Es el descenso de temperatura que genera el panel gracias al efecto refrescante en relación a la temperatura exterior. Una hipotética fachada recubierta con estos paneles actuando de colchón térmico, haría frente a una temperatura exterior reducida según este valor, con el consecuente ahorro energético.

Depósitos mini-aljibe:

Al enfriarse, el aumento de densidad del aire provoca su movimiento. En planos horizontales (como cubiertas inundadas), es previsible que el aire tienda a estratificarse y saturarse en capas más gruesas que en planos verticales. Por tanto la temperatura de bulbo húmedo será más alta así como la temperatura mínima que pueda alcanzar el agua.

En planos verticales la convección generada por la diferencia de densidades provocará una renovación, incorporando aire seco al plano de evaporación, manteniendo una baja temperatura de bulbo húmedo y alcanzando temperaturas previsiblemente más bajas que en sistemas evaporativos horizontales.

La Incorporación de enfriamiento evaporativo en un plano vertical precisa de un sistema que permita la interfase agua-aire. La geometría de los depósitos tiene numerosas implicaciones. La disposición de pliegues o superficies porosas aumenta la superficie de contacto agua-aire. En cuanto a la corriente de aire, la geometría condiciona la aparición de turbulencias y por tanto el intercambio de calor y masa. La altura condiciona la presión hidrostática en proporción al nivel de los depósitos.

Presión hidrostática:

El empleo de depósitos permite un apilado ilimitado de una serie de módulos, puesto que cada uno de ellos es alimentado a presión atmosférica mediante simple rebose del situado por encima. Se evita el uso de conectores y el aumento de la presión hidrostática, que en un sistema cerrado limitaría el desarrollo vertical del sistema.

En el sistema propuesto la presión depende únicamente de la altura de los depósitos. Si consideramos un depósito con su extremo superior abierto y un líquido de densidad ρ contenido en su interior, las moléculas del líquido situadas en su superficie estarán a presión

atmosférica (P_o). A medida que nos desplazemos verticalmente por el líquido una profundidad h , la presión p_a aumentará a razón de:

$$P_a = P_o + \rho \cdot g \cdot h$$

Donde:

P_a : es la presión ejercida a una profundidad h , en (Pa).

P_o : es la presión atmosférica en (Pa).

ρ : es la densidad del agua (998,2 kg/m³ a 20°C y 1atm.) (ASHRAE).

g : es la gravedad (=9,8m/s²)

h : es la profundidad en (m).

La presión hidrostática es un inconveniente desde el punto de vista constructivo, con implicaciones en el material empleado y el espesor necesario para contener el líquido. Mayores espesores reducen la permeabilidad de las paredes. Sin embargo una mayor presión acelera el paso del fluido a través de un medio poroso (percolación), puesto que según el principio de Pascal: "La presión aplicada en un punto de un líquido contenido en un recipiente se transmite con el mismo valor en todas direcciones."

Aumento de la presión hidrostática sobre las paredes de los depósitos.

Capilaridad:

Las paredes de los depósitos podrían ser simplemente permeables al vapor de agua, pero el empleo de materiales que dispongan de una red capilar presenta la ventaja de aumentar la superficie de interfase, al ascender el agua por encima del nivel del depósito conforme a la *ley de Jurín*.

A medida que el depósito se vacía, la red capilar deja de estar saturada y entra en marcha otro mecanismo pasivo: Antes de evaporarse por completo, el agua queda en contacto con la pared del poro, sin llegar a colmatarlo, aumentando la superficie de la interfase a escala microscópica, pero que en conjunto puede ser considerable.

Poros saturados

Poros no-saturados

Fig. Relación entre la saturación de la red capilar y la superficie (S) de la interfase evaporativa agua-aire.

Así presión hidrostática y capilaridad resultarán complementarios para mantener la capacidad de evaporación de los prototipos a medida que los depósitos se vacían.

Transferencia de masa en un panel mini-aljibe en modo evaporativo:

El aire exterior a una temperatura (T_1) y con un contenido de humedad (W_1) entrará en los alveolos, recibiendo una cantidad de vapor de agua (W_2) desde las paredes porosas de los depósitos. Una parte de ese vapor atravesará la pared de los alveolos y volverá al exterior, la parte restante (W_4) saldrá por el extremo inferior.

Diagrama de transferencia de masa en un panel mini-aljibe en modo evaporativo

Es previsible que el comportamiento evaporativo pueda cambiar con el nivel de los depósitos. En el estadio casi lleno, la presión hidrostática podría forzar un mayor avance del agua a través de la red capilar, llegando a exudar por la pared exterior de los depósitos. A medida que estos se consumieran, la presión disminuiría y la red capilar dejaría de estar saturada, aumentando la superficie de contacto aire-agua. En este caso, el gradiente de saturación se produciría en el interior de la red capilar en lugar de los alveolos, y el vapor fluiría principalmente por difusión hacia la cara exterior, donde la presión de vapor será siempre menor.

2.3 Validación del modelo teórico mediante ensayo experimental:

Gradiente térmico:

El efecto de colchón térmico que proporciona el panel evaporativo implicará una reducción del flujo energético de la envolvente. Este ahorro es proporcional al gradiente térmico entre la cara interior del panel y el aire. Aunque este valor es dependiente de las condiciones de contorno, también es la mejor medida para conocer los beneficios potenciales del sistema.

Potencia evaporativa:

El descenso del nivel de los depósitos (h_d) equivale a una masa vaporizada que incrementa el contenido de agua del aire equivalente a ($W_2 - W_1$). Siendo:

W_1 La masa de vapor de agua contenida en el aire exterior.

W_2 La masa de vapor de agua contenida en el aire tras su paso por la cámara ventilada.

El grado de saturación del aire exterior limita la cantidad de agua que podrá evaporarse.

Equivalencia energética del volumen evaporado:

La entalpía de vaporización a temperatura ambiente son: 2.424.000 J/kg (NEILA 2004).

Como $1W=1J/s$ podemos calcular la potencia de refrigeración de un prototipo al evaporar la masa de agua cuantificada por Δh_d en un tiempo t .

Si cada prototipo presenta un frente S_p (en m^2) podemos expresar la energía del cambio de estado en W/m^2

La expresión resultante sería:

$$P_p = m_{H_2O \text{ evap}} \cdot C_v / t \cdot S_p$$

Si cada prototipo presenta un frente de 0,17 m^2 la expresión resultante sería:

$$P_p (W/m^2) = H_2O_{\text{evap}} \cdot (kg) \cdot 2.424.000 (J/s) / t(s) \cdot 0,17 (m^2)$$

Obteniendo la potencia evaporativa de una fachada de paneles.

Movimiento del aire en el interior de los alveolos:

La renovación del aire en los alveolos resulta un factor crucial para el enfriamiento evaporativo. Si renovación, la humedad se elevaría hasta niveles próximos a la saturación, limitando enormemente la potencia evaporativa.

La velocidad es monitorizada mediante sonda de hilo caliente obteniendo valores entre 0 y 0,2m/s; sin embargo, los valores registrados podían ser constantes, fluctuantes o pasar indistintamente de un régimen a otro.

Para esas velocidades, el Nº de Reynolds calculado abarca desde los 1.500 a 4.600, confirmando que la corriente de aire se desarrolla entre un *régimen laminar* a otro de *transición* (ASHRAE 1997), sin poder asegurar con exactitud el instante en que pasa de uno a en otro.

Un inconveniente adicional para la aplicación de una u otras fórmulas viene de la variación de régimen que ocurre cuando un fluido entra en un conducto. La distancia en la que este régimen se estabiliza se denomina “Longitud de entrada para flujo interno”.

Para *flujo laminar*: $L_e \approx 0,06R_e$

En *flujo turbulento*: $L_e \approx 4,4R_e^{1/6}$ (WHITE 2004)

Sustituyendo valores:

Para *régimen laminar* ($R_e=1.500$): $L_e \approx 5,7m > L$

Para el régimen de transición ($R_e=4.600$) asumiremos la expresión de *régimen turbulento*: $L_e \approx 1,152m > L$

Al ensayar un único panel, la longitud del alveolo ($L=0,35m$) resulta inferior a la *longitud de entrada* (L_e) obtenida por cálculo, ya sea en régimen laminar o turbulento. Por tanto no podemos hablar de un flujo viscoso completamente desarrollado.

Longitud de entrada para el flujo interno.

Por último, la sonda termo-anemométrica tiene la limitación de no permitir determinar la dirección de una manera automática.

Estas variables se superan recurriendo a la psicrometría para obtener las fuerzas de empuje que indican en cada momento como se renueva el aire en el interior de los alveolos.

Cálculo de la densidad del aire:

Conocidas la temperatura y humedad relativa en el interior y exterior de los alveolos, así como la presión atmosférica, puede determinarse la densidad del aire a lo largo del tiempo mediante las relaciones psicrométricas del aire. Se elabora una hoja de cálculo en la que ϑ , P y H.R. son datos variables. En primer lugar se calcula la *presión de saturación del aire húmedo* (P_{ws}), Con ella y la H.R. se obtiene la *presión parcial de vapor* (P_w) y sabiendo la presión atmosférica es posible calcular el *volumen específico del aire húmedo* (v) y *humedad absoluta* (W). finalmente con ambos datos se llega a la *densidad del aire húmedo* (ρ_h).

Empuje:

Es la fuerza resultante del incremento de densidad; equivalente al peso de de aire que alberga el alveolo en las condiciones de humedad y temperatura exteriores, menos el peso de ese mismo volumen a la temperatura y humedad alcanzadas al enfriarse:

Como:

$$F = m \cdot a, \text{ y } m = V \cdot \rho$$

Asumiendo que no existe gradiente de temperaturas dentro del alveolo tendríamos que:

$$F_{1,2} = (\rho_{ex} \cdot V \cdot g) - (\rho_{1,2} \cdot V \cdot g)$$

Donde:

$F_{1,2}$ es la fuerza en ($\text{Kg} \cdot \text{m/s}^2$) que ejerce hacia abajo el volumen de aire más frío y denso de los paneles 1 y 2 respectivamente, al "sumergirse" a través de los alveolos en el aire exterior más cálido y menos denso. Al contrario que en un globo aerostático, un valor negativo nos indica que la fuerza tiene un sentido descendente.

ρ_{ex} es la densidad del aire exterior en (Kg/m^3), varía con la temperatura, humedad y presión atmosférica.

$\rho_{1,2}$ Son las densidades del aire en el interior de los alveolos de los paneles 1 y 2 respectivamente. Varía con la temperatura, humedad y presión atmosférica.

V es el volumen de un alveolo ($=0,001125\text{m}^3$).

g es la aceleración de la gravedad ($=9,8\text{m/s}^2$).

Mediante el principio de flotabilidad de Arquímedes obtenemos el empuje, que nos indica la dirección e intensidad de la corriente convectiva a lo largo de la cámara y permite comparar la potencia del enfriamiento evaporativo con el calentamiento provocado por radiación solar incidente, puesto que cada una actúa en direcciones opuestas.

Incremento de entalpía (Δh):

La entalpía del aire húmedo es la suma de la del aire seco y el vapor de agua:

$$h = h_{as} + W \cdot h_g$$

Donde:

h_{as} es la entalpía del aire seco en (kJ/kg)

W es la cantidad de vapor por kg de aire seco en $\text{hg}_v/\text{kg}_{a.s.}$

h_g es la entalpía del vapor en kJ/Kg_v

La corriente convectiva de aire intercambia temperatura y humedad con las paredes de los depósitos. El Incremento de entalpía del aire exterior a su paso por los alveolos será:

$$\Delta h = h_{alveolos\ 1,2} - h_{Ext.}$$

Donde:

$h_{(alveolos\ 1,2)}$ es la entalpía en del aire húmedo en los alveolos de los prototipos 1 y 2 respectivamente

$h_{Ext.}$ es la es la entalpía en del aire húmedo del banco de experimentación.

La cantidad total de energía intercambiada dependerá de caudal.

Autonomía de los depósitos mini-aljibe:

Partiendo de los depósitos llenos al máximo de su capacidad, se plantean dos criterios para calcular su autonomía:

1. Tiempo que tarda el nivel de descender hasta el mínimo.
2. Tiempo que se mantiene el efecto refrescante.

Eficiencia de los prototipos según la metodología empleada por otros autores:

Viene determinada por la capacidad del sistema de aportar humedad al aire, y se define como Eficiencia de saturación:

$$E_{\text{sat}} = \frac{T_{\text{ex}} - T_p}{T_{\text{ex}} - T_{t^* \text{ex}}} \quad (\text{GHIABAKLOU et al. 1996})$$

3. Método de experimentación:

Variables consideradas:

En función de las condiciones del entorno podemos distinguir dos Bancos de experimentación:

- *Exterior* (Sujeto al ciclo diario: Verano, Madrid centro).

Que a su vez contempla distinta exposición al sol:

- *Sombreado* (Prototipo P1)
- *Asoleo* (prototipo P2)

- *Interior* (Humedad elevada y temperatura constante).

Al mismo tiempo, en función del nivel de agua de los depósitos se clasifican cuatro posibilidades:

- *Llenos* (Con reposición).

- *Parcialmente llenos* (Sin reposición).

- *Vacíos pero con remanente de agua embebida en el mortero*.

- *Vacíos y con el mortero seco*.

3.1 Diseño del banco de experimentación:

Los ensayos son realizados en dos ámbitos distintos: Exterior, en condiciones reales estivales e interior, en condiciones controladas caracterizadas por una temperatura constante y alta humedad. La mayoría de los parámetros serán experimentados en condiciones reales exteriores, mientras que el ámbito controlado interior se empleará para conocer la eficiencia de los prototipos en los límites de humedad del sistema.

Experimentos en condiciones reales exteriores:

El banco de experimentación se encuentra en un entorno exterior cubierto sin oclusión solar por parte de otros edificios en la localidad de Madrid y con cielos despejados.

Disposición de prototipos:

Planta de posición de prototipos para ensayo en exteriores y esquema de trayectoria solar.

El área de ensayo comprende dos orientaciones según la planta. Una expuesta al sol con orientación Este y otra en sombra con orientación Norte, permitiendo separar el efecto de la radiación solar sobre los prototipos.

La zona de orientación Este recibe radiación solar directa. En ella se sitúa el prototipo 2.

La zona de orientación Norte dispone de un apantallamiento solar que suprime toda radiación directa. En ella se sitúa el prototipo 1 que recibe únicamente radiación difusa.

Irradiancia solar:

Es la potencia de la radiación incidente por unidad de superficie (W/m^2)

Irradiancia media horaria sobre los paneles P1 y P2 (Latitud 40° N). 30/06 al 1/07/2015.

Experimentos en ámbito interior:

La metodología y disposición de sensores es análoga al ensayo en exteriores. En ausencia de radiación solar la orientación carece de relevancia. Los datos mostrados corresponden a un único prototipo, quedando el segundo como redundante.

El espacio de ensayo tiene un volumen de 4m^3 con paredes y suelo impermeables no-higroscópicos.

3.2 Métodos de medida:

Se monitoriza la temperatura y humedad relativas ambientales así como en el interior de la cámara ventilada de los prototipos 1 y 2. La frecuencia de medición son 30'.

La presión atmosférica es recopilada a partir de los datos publicados por AEMET.

Condiciones del entorno:

- Temperatura y humedad relativa ambientales mediante estación termo-higrométrica modelo: TFA Klimalogg Pro 30.3039.IT.

Prototipos:

- Temperatura y humedad relativa en el interior de las cámara ventiladas de los prototipos 1 y 2 mediante sondas termo-higrométricas modelo: *TFA* para exteriores.

Rango y precisión de los equipos:

- Rango de humedad: 1-99% precisión: $\pm 1\%rH$
- Temperatura: $-36^{\circ}6$ – $+59^{\circ}9$ °C precisión: $\pm 0^{\circ}1$ °C

- Temperatura superficial en el frente de los paneles trasventilados de mortero de cal, mediante sensor con resorte de banda termopar: *Testo 0602 0393*

- Temperatura del agua de cada depósito mediante termómetro digital de sonda *TFA LT-101 Nr. 03.1033*.

- Volumen de agua en los depósitos de los prototipos 1 y 2.

Disposición de sensores:

Los puntos de medición están señalados en las siguientes secciones:

Esquema de disposición de sensores en Prototipo 1 (Orientación Norte).

Esquema de disposición de sensores en Prototipo 2 (Orientación Este).

Ensayo en modo evaporativo:

Gradiente térmico:

Los puntos de control son la temperatura del agua de los depósitos y el aire en el interior de los alveolos que está en contacto con ellos. En ausencia de agua la temperatura se mide en la superficie de la cara interior del panel.

Volumen de agua evaporado:

Para determinar la cantidad de agua evaporada se midió el descenso de nivel en los depósitos. Para evitar errores de medición se aguardó previamente 24h en las que se mantuvieron los depósitos llenos hasta que la red capilar estuvo completamente saturada para evitar malinterpretar el volumen absorbido por ésta.

Se realizan dos ensayos consecutivos. El primero con reposición de los niveles de los depósitos y tras dos días de toma de datos, un segundo ensayo de las mismas características en el que no se repone el agua evaporada. Las mediciones recogen el agotamiento de los depósitos y se prolongan hasta que los efectos del remanente de agua embebida en el mortero alcanzan un comportamiento asintótico.

Ensayos con reposición:

El nivel de los depósitos se mantiene al máximo. En la medición se registra el volumen de agua necesario para rellenar cada depósito y el tiempo transcurrido desde la última operación.

La temperatura del agua de reposición se atempera hasta igualarla con la de los depósitos con una precisión de $\pm 0,1$ °C.

Ensayos sin reposición:

Conocido el volumen máximo de un depósito $Vol_d 100\%$, la profundidad del mismo $h_d 100\%$ y Asumiendo que se trata de prismas de sección homogénea, se estableció una proporción directa entre h_d y Vol_d . De este modo se define $\Delta h_{d(t)}$ como el descenso del nivel de cada depósito desde la última medición en un tiempo t .

Potencia evaporativa:

Conocido el volumen (V) evaporado y calor de vaporización (c_v), puede determinarse la energía cedida por el sistema debido al cambio de estado en (J). En función del tiempo (t) transcurrido, se determina la potencia evaporativa en (W).

Dividiendo por la superficie del frente del panel, obtenemos una relación en (W/m^2).

La potencia evaporativa de los prototipos en W/m^2 , permite comparar:

Distintos tipos de paneles o sistemas, independientemente de su tamaño o forma.

Capacidad de evaporación sin que los periodos de monitorización sean necesariamente idénticos.

Incremento de entalpía (Δh):

El balance de energía que los paneles ceden al aire puede visualizarse mediante el incremento de entalpía a su paso por los alveolos.

Autonomía de los depósitos mini-aljibe:

Se registra el nivel de cada uno de los depósitos, calculando tanto el agua evaporada en cada intervalo de medición como el porcentaje sobre el total. Finalmente se obtiene el tiempo que tardan los depósitos en agotarse. Más allá de este punto, el efecto refrescante producido por el agua embebida en el mortero sigue siendo registrado mediante la monitorización del aire en el interior de los alveolos, estableciendo una gráfica de temperaturas e incremento de entalpía del aire a su paso por los paneles.

3.3 Prototipos empleados en el experimento:

Se construyen 2 prototipos de mortero de cal. El objetivo es estudiar la influencia de la radiación solar de forma separada.

Prototipos de mortero de cal (P1 y P2):

Los prototipos $P1$ y $P2$, son similares, variando únicamente su orientación:

P1: Orientado al Norte

P2: Orientado al Este

Los paneles cuentan con una serie de planos interiores que triangulan su estructura y dividen la cámara ventilada en canales verticales. Los 3 canales frontales permiten el paso del aire mientras que los 4 interiores están cerrados en su base, formando los depósitos mini-aljibe.

Dimensiones:

Altura: 0,35m, anchura: 0,474m, fondo: 0,115m, dimensiones interiores de la cámara ventilada: 0,07m. Espesor de la hoja exterior: 0,015m.

La cara posterior se aísla con EPS de 0,04m de espesor. Este aislamiento dispuesto en el trasdós se asume como parte del banco de trabajo y tiene por objeto que el flujo energético se produzca en una sola cara.

Los prototipos se elevan sobre el suelo para permitir la circulación del aire a través de la cámara ventilada.

El volumen de cada alveolo es aproximadamente $0,0011\text{m}^3$ y la capacidad media de cada depósito es de alrededor de un litro.

Vista tridimensional y sección del prototipo acotados.

Representación de la circulación del aire en los canales y fotografía del extremo inferior del prototipo.

Semi-planta del prototipo acotado.

Vista superior de un prototipo con la matriz porosa cerámica en los depósitos. Para poder realizar mediciones, la matriz no ocupa el volumen total del depósito.

Nomenclatura de los 4 depósitos.

	Masa de los prototipos. (Kg)			
	Mortero de cal		Matriz porosa	Agua
	(Frente)	(paredes Depósitos)	cerámica	
Prototipo:	4,5	11,3	1,357	4,334
C_e (J/Kg·K)	1.100		1.100	4.187

Mortero cal empleado: *Morcem estuco grueso* para interior y exterior armado con malla de fibra de vidrio.

Ficha técnica según fabricante:

Aspecto	Blanco
Resistencia al fuego	A1
Densidad del polvo	1,4±0,2 g/cm ³
Densidad de la masa	1,7±0,2 g/cm ³
Agua amasado	21±1%
Clasificación según UNE EN 998-1	CR CSII W2
Conductividad térmica según EN-998-1:2010:	0.76 W/m·K (Valor tabulado)

Propiedades físicas:

Material de la hoja exterior:	Mortero de cal
Masa (hoja exterior):	24 (kg/m ²)
Calor específico (C_e):	1.100 (J/Kg·K)
Difusividad térmica:	0,49 (m ² /s)
Efusividad térmica:	1.237 (s ^{1/2} ·W/m ² ·K)
Emisividad ξ :	0,91 (entre 10-90°C)
Albedo $\hat{\alpha}$:	0,9-0,93 (Radiación directa) 0,75-0,81 (Radiación indirecta)
Rugosidad (mm):	0,5

3.4 Desarrollo del experimento:

Temperatura del agua de los depósitos:

El llenado de los depósitos se inicia 24h antes del experimento, de manera que al inicio del mismo la red capilar se encuentre saturada y en un régimen que dependa únicamente de las condiciones exteriores y el ciclo diario. La temperatura del agua inicial se ajusta a la alcanzada "en régimen" en las numerosas pruebas previas. Durante este periodo "de carga" se alcanza el

régimen cíclico. En adelante el agua de reposición es igualmente atemperada para no influir en los resultados tal y como se describe en el apartado correspondiente.

Cada prototipo dispone de 4 depósitos, dos centrales (A y B) y dos en los extremos (C y D). Debido al efecto de colchón térmico de los alveolos, los depósitos centrales registran una temperatura entre 2 y 4 °C inferior respecto a los extremos, que solo tienen la mitad de su frente protegido. Los vasos reciben radiación de los cuerpos más calientes que los rodean, siendo los interiores apantallados por los exteriores. Puesto que en una fachada completa, todos los depósitos estarían precedidos de una cámara o alveolo, se ha tomado la T^a media ente A y B como valor de cálculo.

Condiciones exteriores - Panel seco:

Gráfica de temperatura frontal de los paneles P1 y P2. (Ensayo en condiciones exteriores).

El panel sombreado registra temperaturas inferiores a las del aire por las propiedades radiantes de la cal clasificada como "*superficie fría*" (BARBERO 2011).

El panel orientado al Este presenta un sobrecalentamiento puntual bajo la radiación solar. El gran albedo del mortero de cal limita este efecto.

Gráfica de temperatura en el interior de los alveolos de los paneles P1 y P2. (Ensayo en condiciones exteriores).

Condiciones exteriores - Modo evaporativo:

Los ensayos se realizaron en periodos de tiempo estables, con cielos despejados, temperaturas medias en torno a los 33 (°C), 23% de HR y 940 hPa. Los datos pormenorizados se adjuntan en el anexo correspondiente.

Gráfica de temperatura, humedad relativa exterior y temperatura del bulbo húmedo del 30/6 al 1/07/2015).

Condiciones del área de ensayo en interior controlado:

El acceso al banco de ensayo provoca descensos puntuales de la humedad por la renovación del aire. Al mismo tiempo los sensores ambientales registran un aumento de la temperatura por renovación del aire, presencia humana y carga de iluminación.

La toma de datos se automatiza para limitar en lo posible la interacción con el experimento. Los prototipos se mantienen al nivel máximo de agua, interactuando con el área de trabajo hasta alcanzar un régimen estable. El aislamiento total del banco de ensayo con el entorno exterior, además de imposible, resultaría contraproducente, toda vez que la humedad relativa podría alcanzar el 100% dañando los equipos. Se contempla por tanto una mínima renovación del volumen de aire del banco de ensayo. Una vez las temperaturas del aire y el agua se estabilizan obtenemos:

Temperatura del aire, temperatura del bulbo húmedo y humedad relativa en el ambiente controlado interior del (26 al 27/09/2014)

Condiciones del experimento en ambiente interior controlado, valores medios (26/09/2014).

ϑ (°C)	HR (%)	t^* (°C)
22,3	87	22,1

4. Resultados y discusión:

Gradiente térmico:

Temperatura del agua de los depósitos durante el experimento en condiciones exteriores con reposición de agua de los depósitos:

Gráfica de T^a del agua de los depósitos centrales en los paneles P1 y P2. (Ensayo en condiciones exteriores del 30/6 al 1/07/2015).

Ambos paneles logran un gradiente térmico entre 7 y 14 °C, superando los 11 °C de media. La orientación no resulta determinante, si bien el panel expuesto al Este presenta máximos y mínimos mas acusados, debido a su mayor exposición al sol durante la mañana y al cielo nocturno durante la noche. Puede observarse como la temperatura del agua se aproxima al mínimo teórico marcado por la temperatura de bulbo húmedo.

La temperatura es similar en la interfase agua-aire en la que tiene lugar la evaporación. Puede asumirse que a velocidades bajas, la corriente de aire al final de su recorrido por la cámara ventilada, tiene la misma temperatura que el agua y las paredes de los depósitos. Esta hipótesis facilita la monitorización del gradiente térmico, especialmente cuando el nivel del agua es mínimo o nulo.

Imagen infrarroja de los depósitos del panel 2, (orientación Este) durante el ensayo evaporativo. 13:44h

A continuación se representan las temperaturas del aire en el interior de la cámara ventilada para comprobarlo:

Gráfica comparativa temperatura del aire en el interior de los alveolos de los paneles P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 4/07/2015.

En la gráfica se representan consecutivamente el ensayo con reposición de de agua en los depósitos y sin reposición.

Se observa que las temperaturas en el interior de los alveolos son muy similares a las de el agua en el interior de los depósitos. En ambos prototipos se acompasan paralelas a los ciclos diarios, presentando un progresivo aumento a medida que descenden los niveles de los depósitos.

Gradiente térmico maximo, mínimo y medio diario:

Gradiente térmico agua-aire según orientación (°C)			Condiciones exteriores		
Ensayo (30/06/2015)	Norte	Este	Hora*	ϑ (°C)	HR media (%)
Máximo:	14	13,7	19:00	36	17
Mínimo:	7,9	6,8	7:30	26,9	38
Media diaria:	11,8	11		33	24

*Hora legal, que corresponde a la hora solar +2h.

Los paneles logran un gradiente térmico similar con independencia de su orientación, si bien el consumo de agua es mayor bajo la radiación solar.

La diferencia entre los valores mínimos se debe a la visual sobre el horizonte de que dispone el Prototipo 2 y que le permite radiar hacia la bóveda celeste durante la noche.

Potencia evaporativa:

Gráfica comparativa de potencia evaporativa de paneles P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 4/07/2015.

Potencia media diaria con niveles al máximo (1/07/2015):

P1(Norte)=282W/m²

P2(Este)=355 W/m²

La radiación solar colabora en ese incremento de temperatura, siendo recomendable el mayor apantallamiento solar posible.

Influencia de la Orientación:

El panel expuesto al sol incrementa ve incrementada su evaporación media diaria en un 25%.

Se observa un desfase en las gráficas. Mientras que el panel expuesto al sol alcanza sus máximos en las horas de radiación directa, el situado a la sombra lo hace a las de máxima T^a ambiente.

Sin reposición de agua en los depósitos, la cantidad de agua evaporada desciende progresivamente.

Movimiento del aire en el interior de los alveolos

Mediante las relaciones psicrométricas se determina la densidad del aire a partir de los datos de presión, temperatura y humedad relativa.

Gráfica de densidad del aire en el exterior e interior de los alveolos de los paneles P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 4/07/2015.

En las primeras 48h sin reposición de agua en los depósitos el comportamiento es similar al observado con los niveles máximos.

A partir de la densidad se calcula el empuje por el principio de flotabilidad de Arquímedes obteniendo:

Fuerza de empuje del aire por enfriamiento evaporativo en el interior de los alveolos P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 4/07/2015.

A lo largo de la noche el empuje se va reduciendo alcanzando su mínimo al amanecer. La radiación solar, incide o no en el prototipo, provoca un calentamiento del aire de carácter local, registrándose un máximo hacia las 10 de la mañana. Conforme el sol deja de incidir perpendicularmente en la fachada, el calentamiento de carácter local y el empuje se reducen, hacia el final del día, cuando el entorno urbano ha almacenado su máxima energía y se

encuentra recalentado, se aprecia un último repunte, para volver a descender tras el ocaso progresivamente hasta la mañana siguiente.

Sin reposición de agua en los depósitos, la gráfica describe el mismo patrón que en el ensayo con niveles al máximo, si bien el empuje se ve progresivamente reducido a medida que el nivel del agua de los depósitos desciende.

Incremento de entalpía:

Incremento de entalpía entre el aire exterior y los alveolos de los paneles P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 4/07/2015.

El signo positivo indica que el aire gana energía a costa de la que pierden los paneles. La gráfica presenta un patrón similar al de potencia. Como el aire se enfría a su paso por los alveolos, este incremento de energía es en forma de calor latente.

Se aprecia un ciclo diario muy claro mientras los depósitos se mantienen al máximo de capacidad, en que los paneles ceden una mayor cantidad de energía y pausas de balance neutro incluso puntualmente negativo en los minutos previos a la salida del sol.

La disparidad entre ambos prototipos se debe al efecto de la radiación solar. Al iniciar el periodo de no-reposición de agua en los depósitos, aumenta la temperatura en los alveolos y con ello, la cantidad de humedad que son capaces de admitir. El aumento de temperatura es globalmente progresivo, pero sujeto a variaciones según el soleamiento que reciban. El primer ciclo diario se caracteriza por unos niveles de evaporación que no son proporcionales al nivel de los depósitos y en los que este efecto concurre junto con otros fenómenos como la porosidad y capilaridad.

Autonomía de los depósitos mini-aljibe:

Gradiente térmico entre el aire exterior y los alveolos de los paneles P1 y P2. Ensayo en exterior del 30/6 al 9/07/2015.

Mediante la monitorización de la temperatura del aire en el interior de los alveolos puede verse como se prolonga el efecto refrescante entre 3 y 4 días sin aporte de agua. Posteriormente el efecto persiste pero a menor intensidad.

Eficiencia de los prototipos según la metodología empleada por otros autores:

Gráfica de eficiencia de saturación del sistema según (GHIABAKLOU et al. 1996) aplicado a los paneles P1 y P2 en condiciones exteriores con reposición de los niveles de agua de los depósitos.

Gráfica de eficiencia de saturación del sistema según (GHIABAKLOU et al. 1996) aplicado a los paneles P1 y P2 en condiciones exteriores sin reposición de los niveles de agua de los depósitos.

Ensayo en interiores:
Modo evaporativo

Una vez las temperaturas del aire y el agua se estabilizan obtenemos:
Ensayo (26/09/2014)

HR (%)	t^* (°C)	T^a depósitos (°C)	Gradiente térmico agua-aire, (°C)	Potencia refrigerante media diaria. (W/m ²).
87	22,1	22,2	1,6	49

Comportamiento de los paneles en condiciones de alta humedad relativa. Experimento (26 al 27/09/2014).

Donde:
 ϑ , es la temperatura del aire del banco de trabajo en (°C).

HR , es la humedad relativa

t_{ex}^* , es la temperatura de bulbo húmedo del aire del banco de trabajo en (%).

$2^{a} Media AB$, es la temperatura media del agua de los depósitos centrales en ($^{\circ}C$).

P_{P2} , es la potencia evaporativa en (W/m^2).

El sistema interactúa con el banco de ensayo hasta alcanzar un régimen semi estacionario. Las condiciones se ven alteradas durante las tomas de datos no automatizadas como se aprecia en el descenso puntual de la HR ., si bien no afectan significativamente a los valores medios obtenidos. Los prototipos enfrían todo el volumen de aire contenido en el are de ensayo a costa de incrementar su humedad relativa. Para salvaguardar los equipos, no se permite que alcance la saturación. A medida que la HR . aumenta y disminuye ϑ , aumenta t^* . El volumen de agua de los depósitos, que inicialmente ha logrado enfriarse por debajo de los valores comprendidos en la gráfica, vuelve a amentar de temperatura lentamente aproximándose a ϑ y t^* . Se deduce que en ausencia de la leve renovación destinada a salvaguardar los equipos, la HR . alcanzaría valores de saturación y la temperatura de los depósitos convergería con ϑ y t^* . El volumen de agua evaporado se reduce considerablemente en comparación con los ensayos en exteriores y es función de la diferencia entre la presión de vapor y la de saturación del aire.

Durabilidad y proliferación de microorganismos:

Los prototipos han sido sometidos a una decena de experimentos desde mayo de 2014 hasta Julio de 2015, durante un total de 84 días. La mayor parte de ellos con los depósitos total o parcialmente llenos de agua. En ningún momento han aparecido signos de degradación: fisuración, proliferación de hongos, algas, manchas u olores.

La carbonatación, la capacidad de enfriamiento del sistema y la naturaleza bactericida de la cal son las causas mas probables de estas observaciones.

Lixiviación de sales:

Al sumergir en agua probetas planas de mortero de cal fraguado por primera vez, se forma una delgada costra flotante. Una vez seca, esta costra resulta insoluble en agua. En posteriores inmersiones el fenómeno se atenúa rápidamente hasta resultar imperceptible. Estos lixiviados deben corresponder al $Ca(OH)_2$ no carbonatado. En las probetas planas este material abandona la pieza. Sin embargo en los paneles queda retenido en los depósitos y podría colaborar en el sellado de eventuales fisuras que pudieran aparecer durante la puesta en obra o en los movimientos térmicos y reológicos durante su funcionamiento evaporativo.

Detalle de lixiviados no-hidratados. F: Fuente propia

CÁLCULO DEL INTERCAMBIO CONDUCTIVO EN LOS PROTOTIPOS DE MORTERO DE CAL:

Objetivo:

Determinación de los coeficientes de transmisión térmica bajo dos hipótesis de cálculo:
Paneles en modo invierno/seco, cuando los depósitos están vacíos y el mortero se encuentra seco.

Paneles en modo verano/evaporativo, cuando los depósitos están llenos y el mortero se encuentra húmedo.

Cálculo del intercambio conductivo entre los prototipos 1 y 2 con el exterior en modo evaporativo en condiciones reales exteriores.

Consideraciones previas:

Los cálculos se realizan sobre el experimento de enfriamiento evaporativo del 30/06/2015 ya descritos, por lo que se omite la descripción completa de los paneles, banco de trabajo, disposición de sensores etc. para evitar repeticiones.

Eje de ordenadas:

(+) Energía entrante en el sistema.

(-) Energía saliente del sistema.

Superficie considerada:

La hipótesis de cálculo contempla una fachada continua a base de paneles evaporativos. No se consideran intercambios en los laterales ni la parte posterior del panel.

Frente del panel y sección considerada para el cálculo, indicando la dirección del flujo de energía en modo evaporativo.

Cálculo del coeficiente de transmisión térmica:

Resistencia térmica total de un elemento de constituido por capas heterogéneas:

Sección vertical del panel acotado.

Los ensayos han demostrado que se produce un movimiento de aire en los alveolos. A efectos de cálculo de resistencia térmica, equivalen a cámaras de aire muy ventiladas y por lo tanto la capa exterior no es considerada.

Coefficiente útil de transmisión de calor de la pieza U_u :

Al disponer el panel de una sección heterogénea, emplearemos el *coeficiente útil de transmisión* U_u

Semi-sección horizontal del panel acotado.

El flujo de energía se abre paso a través de dos secciones distintas, por un lado los depósitos, que estarán ocupados principalmente por agua o por aire y por otro lado los nodos, formados por un engrosamiento de mortero.

Se calcula la resistencia térmica R_t de las dos secciones consideradas tomando la media de las capas de espesor variable según el siguiente esquema:

Sección horizontal esquemática para el cálculo.

Los depósitos están ocupados por una matriz porosa. En el caso ensayado es una espuma cerámica. A efectos de cálculo se ha considerado como una cámara de aire no ventilada de espesor $\geq 0,03\text{m}$ de $R_t=0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$ (NEILA 2004).

$\lambda_{\text{mortero}}=0,87 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (NEILA 2004), (en seco).

Sección del depósito:

$$R_{t(\text{depósito})} = 2 \frac{d(\text{mortero})}{\lambda(\text{mortero})} + R_{\text{cámara}} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}, \text{ Sustituyendo:}$$

$$R_{t(\text{depósito})} = 2 \frac{0,015 \text{ m}}{0,87 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + 0,18 \text{ m}^2\text{K/W} + \frac{1}{25 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{1}{7,69 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} = 0,384 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\text{Como } U = \frac{1}{R_t}, U_{\text{depósito}} = \frac{1}{R_{t(\text{depósito})}} = 2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sección del nodo:

$$R_{t(\text{nodo})} = \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}, \text{ Sustituyendo:}$$

$$R_{t(\text{nodo})} = \frac{0,028 \text{ m}}{\lambda \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{1}{25 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{1}{7,69 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} = 0,202 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\text{Como } U = \frac{1}{R_t}, U_{\text{nodo}} = \frac{1}{R_{t(\text{nodo})}} = 4,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Transmitancia térmica *en seco* del conjunto U_{us} expresada por metro cuadrado:
Sustituyendo en la expresión general:

$$U_{us} = \frac{\sum U \cdot A}{\sum A}, \text{ Tendríamos: } U_{us} = \frac{U(\text{nodo}) \cdot A(\text{nodo}) + U(\text{depósito}) \cdot A(\text{depósito})}{A(\text{nodo}) + A(\text{depósitos})}$$

$$U_{us} = \frac{4,94(\text{W/m}^2\text{K}) \cdot 0,45(\text{m}) \cdot (\text{m}) + 2,6(\text{W/m}^2\text{K}) \cdot 0,069(\text{m}) \cdot (\text{m})}{0,045(\text{m}) + 0,069(\text{m})} = 3,52 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En el caso de que los depósitos estén llenos resolveríamos de manera análoga, sustituyendo la cámara de aire no ventilada por agua.

La conductividad térmica del agua disminuye con la temperatura:

Variación de la conductividad del agua con la Temperatura, según datos (ASHRAE 1997)

Para simplificar los cálculos se toma $\lambda_{H_2O} = 0,590 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

$$Rt_{(\text{dep. lleno})} = 2 \frac{d(\text{mortero})}{\lambda(\text{mortero})} + \frac{dH_2O}{\lambda_{H_2O}} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i}, \text{ Sustituyendo:}$$

$$Rt_{(\text{dep. lleno})} = 2 \frac{0,015 \text{ m}}{0,87 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{0,03 \text{ m}}{0,59 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{1}{25 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} + \frac{1}{7,69 \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)} = 0,384 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U_{(\text{dep. lleno})} = \frac{1}{Rt(\text{dep. lleno})} = 3,91 \text{ W/m}^2\text{K}$$

En esta hipótesis de cálculo el agua satura la cara interior de las paredes porosas del depósito creando un gradiente influenciado por la presión hidrostática del agua y la proximidad a de la cara exterior, donde la evaporación es mayor. Para acercarnos más al valor real, tomaremos la media entre las dos situaciones, esto es: Mortero seco y mortero saturado; asignando en este último, la misma conductividad del agua.

Los valores así obtenidos serían:

$$U_{\text{dep. (m. sat)}} = 3,68 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{dep. (m. parcialmente sat)}} = 3,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

La misma situación se ha calculado para los nodos pero su influencia es despreciable.

Atendiendo a lo anterior, la transmitancia térmica del conjunto con los depósitos llenos, expresada por metro cuadrado de panel sería:

$$U_{ui} = \frac{4,94(\text{W/m}^2\text{K}) \cdot 0,45(\text{m}) \cdot (\text{m}) + 3,8 (\text{W/m}^2\text{K}) \cdot 0,069(\text{m}) \cdot (\text{m})}{0,045(\text{m}) + 0,069(\text{m})} = 4,25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Resultados:

De este modo, el flujo conductivo del frente de los paneles 1 y 2 para las condiciones reales experimentadas a lo largo de dos días, en modo evaporativo con reposición de los niveles de los depósitos, sería respectivamente Q_1 y Q_2 , reflejándose gráficamente del siguiente modo:

Conclusiones:

Los valores positivos indican que el panel está ganando calor del entorno. Los valores son muy similares en ambos prototipos alcanzando los valores máximos y mínimos en función del gradiente térmico.

La transmitancia del panel excede la máxima permitida en cualquier zona climática recogida por la normativa española de limitación de la demanda energética; por lo que no puede ser el único elemento de la envolvente térmica y debe ser implementado. En el capítulo de *futuras investigaciones* se recogen medidas en este sentido.

CÁLCULO DEL INTERCAMBIO CONVECTIVO EN LOS PROTOTIPOS DE MORTERO DE CAL:

Introducción:

Las pérdidas o ganancias de energía en la envolvente de la edificación sólo contemplan la transferencia de calor por conducción por ser este un cálculo sencillo y que representa al mismo tiempo la mayor cantidad de energía intercambiada en las hipótesis de cálculo propias de las edificaciones. Sin embargo la ausencia de aislamiento de los prototipos experimentados, la baja temperatura superficial en el interior de los alveolos y las corrientes de aire inducidas en su interior que se han observado, invitan a comprobar el alcance del flujo energético convectivo y compararlo con los demás mecanismos de transmisión de calor para plantear futuras modificaciones y mejoras tanto en su geometría como en los materiales a emplear.

Objetivo:

Calculo del intercambio de calor por convección natural entre los prototipos 1 y 2 y el aire que los rodea en condiciones reales exteriores.

Consideraciones previas:

Los cálculos se realizan sobre el experimento de enfriamiento evaporativo del 30/06/2015 ya descritos, por lo que se omite la descripción completa de los paneles, banco de trabajo, disposición de sensores etc. para evitar repeticiones.

Eje de ordenadas:

(+) Energía entrante en el sistema.

(-) Energía saliente del sistema.

Hipótesis de cálculo:

Homogeneidad de la temperatura superficial de los prototipos:

La temperatura de las distintas superficies de los prototipos presentan un gradiente de temperatura a lo largo de su altura por efecto de la convección. Para simplificar el cálculo se asume un valor constante equivalente al valor medio de este gradiente situado en el punto medio del panel.

Variación del coeficiente de convección a lo largo del tiempo:

Como la temperatura exterior varía a lo largo del tiempo, y los coeficientes de transferencia de calor por convección están ligados al gradiente térmico entre la superficie del sólido y el fluido en contacto, tanto los coeficientes como el flujo de calor resultante se calculan en periodos de 30 minutos empleando hojas de cálculo. Se asume que la temperatura es constante dentro de cada periodo.

Superficie considerada:

La hipótesis de cálculo contempla una fachada continua a base de paneles evaporativos. No se consideran intercambios en los laterales ni la parte posterior del panel.

La convección del panel se supone fundamentalmente a través de los alveolos, mientras el cálculo a través del frente se realiza únicamente a efectos comparativos.

Esquema de las superficies consideradas para el cálculo convectivo en los alveolos.

Convección en el interior de los alveolos de los paneles P1 y P2:

La convección natural en el interior de los alveolos se produce por la diferencia de temperatura entre la superficie evaporativa de los depósitos y el aire en contacto con ellos.

Las paredes de los depósitos se consideran a la temperatura del agua y el aire que ingresa a la temperatura ambiente del banco de trabajo. Ambos datos son obtenidos mediante la monitorización durante los experimentos.

Geometría y coeficiente de convección:

Los alveolos de los paneles experimentados son prismas triangulares de aristas redondeadas. Para el cálculo del coeficiente de convección se ha considerado una geometría cilíndrica, por estar determinado empíricamente y asemejarse a la geometría de los alveolos de los paneles patentados.

El cálculo del flujo de calor por convección viene dado por:

$$Q=h \cdot S \cdot (\Delta T)$$

S es el área en (m^2).

h es el coeficiente de convección natural, dependiente de la geometría.

ΔT es el gradiente térmico entra la superficie del sólido y el fluido en (K).

El coeficiente de convección natural h para cilindros verticales de altura L mayor que el diámetro es:

$$h=1,24(\Delta T)^{0,33} \text{ (según ASHRAE 1997)}$$

Donde :

ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire exterior y la T^a de la superficie exterior de los depósitos, para la que se ha tomado la T^a media del agua los depósitos.

L es la altura del cilindro equivalente de altura 0,35m

S es el área de las paredes verticales que comparten los depósitos y los alveolos ($0,157m^2$).

Con fines comparativos tendríamos que la superficie convectiva por metro cuadrado de panel sería: $0,92m^2/m^2$

La convección depende de la geometría y de ΔT . Es indiferente del material o el nivel de los depósitos, aunque indirectamente estos influyan en el gradiente térmico y por tanto en el flujo energético.

Introduciendo el gradiente térmico ΔT (variable a lo largo del tiempo):

Resultado:

Tendríamos que el intercambio por convección natural a través de los alveolos Q_1 y Q_2 en los prototipos P1 y P2 respectivamente en sería:

Convección en frente de los paneles P1 y P2:

Esquema de la superficie de cálculo considerada.

El coeficiente de convección natural para una superficie vertical de mayor anchura que altura viene dado por:

$$h = 1,42(\Delta T/L)^{0,25} \text{ (según ASHRAE)}$$

Donde :

ΔT es la diferencia de temperatura entre el aire exterior y la T^a de la superficie frontal de los paneles.

L es la altura del plano vertical (0,35m)

S es el área de la superficie frontal de los paneles.(0,12m²)

Conclusiones:

Las ganancias de calor por convección son mucho más importantes en interior de los alveolos que en el frente del panel, fundamentalmente debido a que el frente del panel tiene una temperatura próxima a la del aire y no sufre un calentamiento acusado al ser radiada por el sol debido a su gran albedo. Esta característica también parece ser la responsable de la homogeneidad de resultados entre ambos prototipos, en los que las diferencias según orientación son escasas.

Limitaciones:

Aunque la hipótesis de cálculo contempla una fachada continua. Los experimentos han sido realizados con un único prototipo por orientación y por tanto la temperatura del aire que ingresa en el interior de los alveolos es superior a la que se daría en una fachada de varios paneles evaporativos apilados. A pesar de la mezcla de aire que pudiera producirse en las juntas horizontales entre paneles, el cálculo convectivo en el interior de los alveolos sería previsiblemente menor a los resultados obtenidos, mientras que el frontal, donde el aire circula con libertad, sería similar a los valores calculados.

CÁLCULO DEL INTERCAMBIO RADIANTE EN LOS PROTOTIPOS DE MORTERO DE CAL:

Introducción:

A temperaturas bajas, el intercambio de energía por convección es determinante frente al producido radiación. (BLESA 1994), (INCROPERA 1999).

En ausencia de radiación solar directa puede presumirse que la superficie exterior de las fachadas de un área urbana se encontrarán a una temperatura similar, por lo que el flujo de energía sería despreciable. Las pérdidas hacia la bóveda celeste quedan compensadas por las ganancias aportadas por otros cuerpos (NEILA et al. 1997) y pueden llegar a considerarse irrelevantes frente a los mecanismos de conducción y convección (BLESA 1994). Sin embargo los paneles en funcionamiento evaporativo, rodeados de fachadas convencionales, serán radiados por superficies a mayor temperatura.

El efecto sol-aire permite aproximar el incremento del flujo de calor por efecto de la radiación solar pero la singularidad de la geometría de los prototipos y el interés por establecer una comparativa entre los tres mecanismos de transmisión de calor motivan un estudio específico del intercambio radiante.

La radiación solar y el gran albedo de la superficie estudiada, también serán determinantes en los resultados.

Objetivo:

Calculo del intercambio de calor por radiación entre los prototipos 1 y 2 y el exterior en modo evaporativo en condiciones reales exteriores, bajo dos hipótesis de cálculo: Con radiación solar y sin ella, para determinar la influencia de esta.

Consideraciones previas:

Los cálculos se realizan sobre el experimento de enfriamiento evaporativo del 30/06/2015 ya descritos, por lo que se omite la descripción completa de los paneles, banco de trabajo, disposición de sensores etc. para evitar repeticiones.

Eje de ordenadas:

(+) Energía entrante en el sistema.

(-) Energía saliente del sistema.

Hipótesis de cálculo:

Superficie considerada:

La hipótesis de cálculo contempla una fachada continua a base de paneles evaporativos. Se suponen a todos la misma temperatura por lo que la transmisión de calor entre ellos resultaría neutra. Interesa conocer el intercambio con el exterior. Por tanto considera únicamente el frente como superficie de intercambio radiante.

Fig. (I) Frente de la pieza considerado para el intercambio radiante.

Superficies emisoras:

Los cuerpos emisores (a mayor temperatura) situados frente a cada prototipo son:

Prototipo 1: Una fachada de ladrillo.

Prototipo 2: El suelo (asfalto) y bóveda celeste.

En ambos casos se ignora la energía reflejada por otras superficies para simplificar el cálculo.

Emisividades de las superficies consideradas:

Mortero de cal: $\xi=0,91$ (entre 10-90°C) (BRAMSON 1968).

Agua: $\xi=0,96$ (BLESÁ 1994),(WOLFE et al. 1985).

Asfalto: $\xi=0,967$ (en 6,5-20 μm) (KERN 1964).

Ladrillo ordinario: $\xi=0,93$ (BLESÁ 1994 p.86)

Saturación de la red capilar y variación de emisividad:

Tendríamos que distinguir entre la emisividad del mortero de cal en seco y el comportamiento mortero saturado de agua en modo evaporativo. En el cálculo conductivo se tomó el valor medio de U con el mortero seco y saturado, para aproximarse al valor real. Entonces resultaba irrelevante la posición del agua líquida en la sección. Sin embargo en el cálculo radiante es determinante únicamente lo que ocurre en la superficie (o en espesores muy próximos), donde el agua se encuentra fundamentalmente en estado gaseoso. Además las diferencias de emisividad del agua y el mortero de cal apenas superan el 5% y no resultan significativas frente a otros factores como son el enfriamiento evaporativo por lo que se simplifican los cálculos, asumiendo que en la superficie, el agua está únicamente en forma de vapor y por tanto se toma el coeficiente del mortero en seco para el cálculo también en modo evaporativo.

Homogeneidad de la temperatura superficial de los prototipos:

La temperatura superficial se supone homogénea, aunque en las imágenes termográficas puede intuirse la confluencia de varios efectos como son una mayor convección en el eje de los alveolos; una mayor inercia térmica y conductividad en los vértices de los depósitos, y en los extremos inferiores de estos vértices un mayor enfriamiento evaporativo.

Imágenes infrarrojas de un panel totalmente seco (izquierda) y con el remanente de agua embebida tras agotarse los depósitos. (derecha).

Consideraciones sobre la temperatura del aire:

Todo entorno, en función de los materiales, orientación y grado de exposición al sol crea microclimas que condicionan en mayor o menor grado la temperatura del aire. La naturaleza del intercambio de energía por radiación abarca un entorno más amplio que el banco de trabajo considerado en los cálculos y experimentos anteriores, debiendo considerar aspectos

como la temperatura del cielo, el suelo o de los edificios que rodean el banco de experimentación utilizado. Por tanto se considerarán dos temperaturas del aire:

ϑ_{ex} que representa la temperatura del aire en el banco de trabajo.

$\vartheta_{est. Retiro}$ Que representa la temperatura del aire en la estación meteorológica más cercana (Madrid-Retiro). Si bien esta también está afectada por su propio microclima, su sinusoide no se ve alterada por una orientación específica, como ocurre en ϑ_{ex} . Estos valores serán los empleados para los cálculos fuera del banco de trabajo.

Hipótesis de cálculo 1:

Calculo de la energía radiante para P1 y P2 en ausencia de radiación solar:

Cada panel recibirá la radiación de los cuerpos enfrentados a su superficie dependiendo del material (emisividad) y de la temperatura.

El intercambio por radiación puede calcularse mediante la fórmula:

$$Q = \xi \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4).$$

En función de la posición de cada panel (P1 y P2) y las superficies a las que se orientan se calculará:

P1: Radiación entre el panel 1 y una fachada de ladrillo enfrentada (orientada al sur).

P2: Radiación entre el panel 2, la bóveda celeste (50%) y el suelo (50%).

El entorno y la posición de los paneles se describen en las siguientes plantas:

Planta de situación acotada y detalle de la orientación de los paneles.

Intercambio radiante en P1 orientado al Norte:

Sección esquemática Norte-Sur de la fachada soleada enfrentada a la posición del prototipo 1.

El prototipo P1 orientado al Norte es radiado por una fachada de ladrillo cuya temperatura nocturna se aproxima a la del aire. No existe ángulo visible con el cielo. Durante el día la temperatura de esta fachada de ladrillo rojo con orientación Sur se ve incrementada por la radiación solar. Para el cálculo de la temperatura superficial de esta fachada tomaremos incrementos tabulados (NEILA 2004, tabla 7.6).

Factor de forma φ :

Al no tener visión del cielo, la superficie del panel está rodeada en cualquier dirección de fachadas a mayor temperatura, por lo que puede suponerse que $\varphi=1$ (BLESA 1994).

Sustituyendo: ξ_1 (Ladrillo ordinario) y ξ_2 (Mortero de cal) en la expresión:

$$Q = \xi_1 \cdot \xi_2 \cdot \varphi \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Con:

$$S = 0,17\text{m}^2$$

T_1 es el cuerpo a mayor temperatura en (K): En nuestro caso la fachada de enfrente.

T_2 el cuerpo a menor temperatura en (K): En nuestro caso, temperatura frontal del Panel 1.

Obteniendo (P1: Q_1 radiante) que es el flujo de calor radiado hacia el prototipo 1 en (W).

Se representará en la misma gráfica la energía recibida por cada prototipo para poder comparar los resultados; y para una mejor comprensión también se incluye el registro de la temperatura del aire en el banco de trabajo (ϑ_{ex}) a lo largo de los dos días que dura el experimento.

Intercambio radiante del P2 orientado al Este:

El panel 2 tiene un 50% de visibilidad sobre el horizonte y que el plano del suelo es, a efectos de cálculo, todo de asfalto.

En un entorno urbano la simplificación de que $T_{\text{suelo}}^a = T_{\text{aire}}^a$ resulta demasiado imprecisa. Los materiales cerámicos y el asfalto son grandes acumuladores de calor y su temperatura superficial es superior a la del aire, por lo que aplicaremos un aumento virtual de la temperatura sirviéndonos de los datos publicados por NEILA 2004, como se hizo en el panel 1.

La energía intercambiada con el entorno será:

$$Q = Q_{\text{Superficie Cielo}} + Q_{\text{Superficie suelo}}$$

Fig. Esquema de la T^a del cielo y suelo.

Donde:

$$Q_{\text{Sup Suelo}} = (1 - \cos\beta) / 2 + A \cdot \sigma \cdot \xi_{\text{Sup}} \cdot \xi_{\text{Suelo}} (T_{\text{Sup}}^4 - T_{\text{suelo}}^4)$$

$$Q_{\text{Sup Cielo}} = (1 + \cos\beta) / 2 + A \cdot \sigma \cdot \xi_{\text{Sup}} \cdot \xi_{\text{Cielo}} (T_{\text{Sup}}^4 - T_{\text{Cielo}}^4)$$

β es el ángulo de la pared con el suelo = 90° , por lo que $\cos\beta=0$

La temperatura de cielo despejado T_c es:

$$T_c = T_a (\xi_c^{0,25}) \quad (\text{ESTEBAN 1986}).$$

Donde:

T_c es la T^a del cielo en (K).

T_a es la T^a del aire en (K).

ξ_c es la emisividad del cielo, que puede variar con la nubosidad. En nuestro caso los ensayos han sido realizados con cielos despejados por lo que no ve afectado.

Existen varias fórmulas empíricas según los distintos autores. Para el cálculo se ha empleado:

$$\xi_c = 0,741 + 0,0062 \cdot Tr \quad (\text{BERDAHL et al.1982})$$

Donde:

Tr es la T^a de rocío en ($^\circ\text{C}$)

Resultados:

De este modo, el flujo radiante del frente de los paneles 1 y 2 en ausencia de radiación solar sería respectivamente: Q_1 y Q_2 para las condiciones reales ensayadas a lo largo de dos días, en modo evaporativo con reposición de los niveles de los depósitos, que se reflejaría gráficamente del siguiente modo:

Conclusiones:

El intercambio de calor, considerando únicamente las masas radiantes del entorno, no son significativas puesto que el frente del panel está compuesto de un material clasificado como "superficie fría" y su temperatura no difiere significativamente de la del entorno en lo que a intercambio radiante se refiere.

Hipótesis de cálculo 2:

Calculo de la energía radiante para P1 y P2 considerando la radiación solar:

Partiendo de las consideraciones y resultados obtenidos en el cálculo anterior (Q_{radiante}), se incluye la irradiancia sobre los paneles (radiación solar directa + difusa) Obteniendo $\sum Q_{\text{radiante}}$ en cada panel en (W).

Trayectoria solar e irradiancia:

Planta de situación acotada del banco de experimentación con representación esquemática de la trayectoria solar y detalle de la orientación de los paneles.

La cantidad de energía absorbida por los paneles será:

$$Q(W)=(1-\alpha)\cdot S\cdot I$$

α es el albedo=0,9 (BARBERO 2014)

S es la superficie frontal del panel en (m²)

I es la irradiancia sobre la superficie en (W/m²), que puede calcularse analíticamente.

Los valores de radiación solar incidente son considerables en las fachadas Este y Oeste durante el verano.

En el panel orientado al norte, por estar inserto en una trama urbana consolidada, no se ha considerado la radiación solar directa, que en los meses de verano y en un entorno sin oclusión alguna, incidiría sobre esa orientación en el amanecer y atardecer.

Irradiancia solar media horaria para orientaciones Norte (con apantallamiento) y Este.

Resultados:

Insertando los valores a lo largo del tiempo obtendríamos, el flujo en ambos paneles sería:

Comparativa de la T^a del aire y el Flujo radiante en P1 y P2 (Ensayo Ext. 30/06/2015).

Conclusiones:

El intercambio radiante en los prototipos es generalmente positivo, los paneles reciben energía radiada desde de un entorno a mayor temperatura, pero el aporte de calor determinante proviene de la radiación solar. Las ganancias son mayores en ambos paneles durante las horas de mayor insolación, ya sea por una incidencia directa de los rayos solares en el panel orientado al Este, o de un entorno sobrecalentado por estos: Panel orientado al norte y enfrentado a fachada de ladrillo.

La comparativa de las dos hipótesis de cálculo señala que el panel sombreado ve incrementadas sus ganancias de manera limitada por el efecto de sobrecalentamiento de la fachada opuesta, mientras que en el panel expuesto, el incremento de energía recibida es mucho mayor en las horas en las que el sol incide directamente. Aun así, albedo del mortero de cal refleja la mayoría de la radiación solar incidente, limitando el incremento de temperatura.

COMPARATIVA DE LOS MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR EN LOS PROTOTIPOS EN MODO EVAPORATIVO, SEGÚN SU ORIENTACIÓN:

Objetivo:

Determinar la relevancia de cada uno de los mecanismos de intercambio de energía sobre el cómputo total para proponer las mejoras con más repercusión.

Resultados:

A continuación se agrupan los resultados de los cálculos de los tres mecanismos de transmisión de calor: Conducción, convección y radiación en cada una de las dos orientaciones monitorizadas durante el experimento del 30/06/2015:

P1: Sombreado y orientado al norte:

P2: Asoleo y orientado al Este:

Conclusiones:

La conducción es el mecanismo de transmisión más relevante que duplica al intercambio convectivo.

En el caso de la radiación, los valores son muy dependientes de la orientación.

Incluso con la mayor parte de la energía reflejada, la radiación alcanza puntualmente los valores máximos para el prototipo 2, donde las mayores ganancias se producen durante la mañana, en las horas en las que el sol incide directamente.

El albedo de la superficie de mortero de cal resulta determinante para limitar las ganancias.

El diseño de fachadas ventiladas con enfriamiento evaporativo debería incorporar aislamiento permeable al vapor de agua en la hoja exterior así como acabados con capacidad para reflejar tanto la radiación solar, como la producida por otras fachadas recalentadas.

CÁLCULO DEL CALOR SENSIBLE EN LOS PROTOTIPOS DE MORTERO DE CAL:

Introducción:

Se han cuantificado los flujos de energía en los tres mecanismos de transmisión, así como la energía invertida en la evaporación del agua de los depósitos en ambos prototipos.

Por último se procede a cuantificar el balance de energía invertido en el calor sensible.

A diferencia del calor latente que escapa del sistema en forma de gas liberado a la atmósfera, el calor sensible queda atrapado en la masa del panel.

Por medio del calor sensible se comprende la relevancia de cada material en la absorción de energía. Este dependerá de su calor específico, su masa y el incremento de temperatura que registre.

Objetivo:

Cálculo del calor sensible en los prototipos 1 Y 2 en modo evaporativo en condiciones reales exteriores.

Consideraciones previas:

Los cálculos se realizan sobre el experimento de enfriamiento evaporativo del 30/06/2015 ya descritos, por lo que se omite la descripción completa de los paneles, banco de trabajo, disposición de sensores etc. para evitar repeticiones.

Eje de ordenadas:

(+) Energía entrante en el sistema.

(-) Energía saliente o almacenada en el sistema.

Calor específico (C_e):

C_e Mortero de cal: 1.100 J/kg·K.

C_e Matriz de espuma cerámica: 1.100 J/kg·K.

Tal y como puede apreciarse en la gráfica, el C_e del agua no es constante y varía con la temperatura.

Variación del calor específico del agua con la Temperatura, según datos (ASHRAE 1997).

Puesto que las variaciones de C_e son limitadas y la temperatura del agua de los depósitos tampoco sufre grandes cambios, a efectos de cálculo se asume un valor constante:

C_e Agua=4.187 J/kg·K.

Hipótesis de cálculo:

Masas a considerar y (Nomenclatura):

Masa del mortero de cal que forma el frente del panel. (Fr)

Masa del mortero de cal que forma los depósitos. (Cal).

Masa de la matriz porosa cerámica en el interior de los depósitos. (Cer)

Masa del agua presente en los depósitos. (Agua)

Como cada material posee un calor específico distinto es necesario desglosar su cálculo.

A su vez se ha observado en la monitorización que las distintas partes de los prototipos alcanzan temperaturas distintas. Como el calor sensible también depende de la temperatura,

vuelve a ser necesario diferenciar algunos elementos en distintas partes con temperaturas relativamente homogéneas.

Desglose de masas consideradas para el cálculo en función del material y variación de temperatura.

Las masas se dividen según la variación de temperatura que experimentan durante un ciclo diario. El frente del panel, especialmente el del panel 2 expuesto al sol, sufre los mayores incrementos de temperatura. El resto de la pieza presenta una temperatura sincronizada, con ligeras variaciones de los dos depósitos laterales (C y D), respecto a los dos centrales (A y B), siendo estos los que registran las temperaturas más bajas de todo el conjunto.

Planta del panel con la nomenclatura de los depósitos.

Finalmente se agrupan las masas del mortero de cal y la matriz cerámica por tener C_e similares.

El cálculo del calor sensible viene dado por la expresión:

$$Q_{sen} = m \cdot C_e \cdot (\Delta T)$$

Donde:

Q_{sen} es la energía en (J)

m es la masa en (Kg)

C_e es el calor específico en (J/Kg)

ΔT es la variación de Temperatura en (K)

Conocidas las masas y las temperaturas es posible determinar el flujo de energía implicado en la variación de temperatura. Como los registros están asociados a un periodo de tiempo t en (s) y $J=W \cdot s$, podemos obtener una potencia en (W):

Donde:

$Q_{1Sen\ Fr.}$: Flujo de calor sensible del frente en el panel 1 (Sombreado) en (W).

$Q_{1Sen\ Cal+Cer}$: Flujo de calor sensible del mortero de cal y la matriz porosa en panel 1 (Sombreado) en (W).

$Q_{1Sen\ Agua}$: Flujo de calor sensible del agua de los depósitos en el panel 1 (Sombreado) en (W).

Donde:

$Q_{2Sen\ Fr.}$: Flujo de calor sensible del frente en el panel 2 (Sombreado) en (W).

$Q_{2Sen\ Cal+Cer}$: Flujo de calor sensible del mortero de cal y la matriz porosa en panel 2 (Expuesto) en (W).

$Q_{2Sen\ Agua}$: Flujo de calor sensible del agua de los depósitos en el panel 2 (Expuesto) en (W)

Para representar ambos prototipos en una misma gráfica se suma el calor de cada una de las distintas masas consideradas en cada uno de ellos, obteniendo el balance total de cada prototipo en la siguiente gráfica:

Donde:

ΣQ_1 Sen: Balance total del flujo de calor sensible en panel 1 (Sombreado) en (W).

ΣQ_2 Sen: Balance total del flujo de calor sensible en panel 2 (Expuesto) en (W).

Conclusiones:

Las tres masas consideradas, pese a sus diferencias, influyen de manera similar en el flujo energético: El frente de la pieza por su máxima exposición y el agua por su mayor calor específico.

La energía del calor sensible en sí misma es despreciable frente al calor latente. Pero condiciona el intercambio convectivo, como se recoge en su apartado.

Las mayores variaciones se producen en ambos prototipos durante la mañana, coincidiendo con la máxima radiación solar y el aumento de la temperatura local del aire en el banco de experimentación.

Limitaciones:

La masa de agua de los depósitos no incluye el agua embebida en el mortero, que puede superar el 10% de su peso en seco: El valor exacto depende en cada momento del nivel de los depósitos, el tiempo que se ha mantenido dicho nivel, la velocidad del viento y por encima de todo, la humedad relativa. En condiciones de alta humedad relativa, el agua líquida llega a la parte frontal por capilaridad horizontal. El comportamiento diferencial de las mismas probetas en veranos consecutivos hace suponer que grado de carbonatación es otro factor a tener en cuenta. Sin embargo, todas estas variaciones se manifiestan en magnitudes poco influyentes en el cómputo global.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

CONCLUSIONES:

- Transmitancia del cerramiento en estado húmedo y seco**
- Comparación de la inercia térmica aportada por el agua de los paneles en *modo evaporativo***
- Ciclo de llenado de los paneles**
- Ciclos de secado de los paneles**
- Empuje del aire en el interior de los alveolos**
- Potencia evaporativa e influencia de las orientaciones:**
- Gradiente térmico**
- Consumo de agua**
- Eficiencia de los prototipos según la metodología empleada por otros autores:**
 - Condiciones exteriores (verano-seco)
 - Condiciones límites de funcionamiento (Alta humedad)
- Ahorro energético de un cerramiento suplementado con paneles evaporativos**

Resumen

CONCLUSIONES:

Transmitancia del cerramiento en estado húmedo y seco:

Considerando que los paneles forman parte de un conjunto y por lo tanto el flujo energético es horizontal y perpendicular a la cara exterior, del cálculo analítico se obtiene:

Flujo de energía	En seco	Depósitos llenos
Conducción	3,5 W/m ² K	4,2 W/m ² K

El sistema puede mejorarse incorporando aislamiento, tanto en la hoja exterior como en las paredes de los depósitos, siempre que este aislante sea compatible con el agua y preferiblemente permeable al vapor.

Comparación de la inercia térmica aportada por el agua de los paneles en modo evaporativo:

El agua presente en los depósitos y estructura porosa de los paneles aporta una mayor estabilidad al cerramiento que otros materiales.

Para visualizar la relevancia que toma la presencia de agua en la inercia térmica del cerramiento se elabora la siguiente tabla:

Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg)	Inercia térmica ($\rho \cdot C_e$)
Mortero de cal:	1.600	1.100	1.760.000
Hormigón:	2.400	1.060	2.544.000
Agua:	1.000	4.180	4.180.000

Inercia térmica aportada por distintos materiales para un mismo volumen e incremento de temperatura:

Datos: (NEILA 2004 p.376)

Ciclo de llenado de los paneles:

El llenado de los paneles se produciría por simple gravedad de forma concatenada por rebose de los paneles superiores sobre los inferiores conforme a la descripción de la patente, permitiendo un apilamiento ilimitado y facilitando las tareas de mantenimiento y sustitución sin necesidad de detener el funcionamiento del resto de paneles.

El descenso de temperatura comienza en cuanto se llenan los depósitos. El tiempo que tarda el agua en alcanzar la temperatura mínima depende tanto de las condiciones atmosféricas, que marcarán el punto de rocío, como del volumen y temperatura del agua que determina la inercia térmica del conjunto. Depósitos mas grandes aportarán mayor inercia, pero precisarán de varios días hasta alcanzar la temperatura mínima.

Ciclos de secado de los paneles:

En el eje vertical se representa la capacidad de los depósitos de los prototipos P1 y P2 en (%) y la temperatura del aire en (°C) y su H.R. en (%).

En el eje horizontal se representa el tiempo en días.

Nivel de los depósitos sin reposición.

En las condiciones estivales registradas los depósitos tardaron 3 días y medio en agotarse. El secado responde a una curva con ligeras oscilaciones producidas por los ciclos día-noche. En experimentos sobre probetas del mismo mortero de cal hidráulica se comprobó que el ascenso de agua por capilaridad vertical alcanzaba toda la altura del prototipo. Un poro no saturado dispone de mayor superficie aire-agua para la evaporación.

Durante el proceso de secado de los prototipos, el frente húmedo disminuye con el nivel de los depósitos, a continuación aparece la zona de poros no saturados, pero que no alcanza la totalidad de la altura de las paredes de mortero, apareciendo en el extremo superior una tercera zona que consigue secarse siempre que pueda aportar al aire mayor cantidad de agua de la que recibe por capilaridad.

La presión hidrostática puede ser uno de los factores responsables de la gran capacidad de evaporación "inicial" cuando los depósitos están totalmente llenos y la estructura porosa se encuentra saturada. La velocidad del aire en el interior de un poro puede considerarse nula. si el poro se encuentra húmedo, el aire se satura y su capacidad de contener más agua depende del movimiento de las moléculas de vapor hacia el exterior. Este movimiento es lento puesto que al no existir convección, la humedad debe desplazarse por difusión.

Cuando el agua aflora a través el extremo inferior de las paredes de los depósitos por efecto de la presión hidrostática, la interfase agua-aire puede ser menor por la reducción o ausencia de menisco, pero al encontrarse con una corriente de aire no saturada, el intercambio de masa tendrá un carácter convectivo de naturaleza más rápida, lo que explicaría los resultados.

Esquema de la disminución del frente húmedo y poros sometidos a la presión hidrostática con el descenso del nivel de los depósitos.

Empuje del aire en el interior de los alveolos:

Fuerza media diaria de empuje del aire en el interior de los alveolos P1 y P2. Señalando el momento en el que deja de reponerse agua en los depósitos.

El empuje disminuye lentamente durante los primeros 3 días, pero continúa hasta el 6º día. A partir de ese momento, el calor aportado por el entorno supera al enfriamiento evaporativo. Aunque la temperatura de los depósitos es muy similar en ambos prototipos, la del aire en el interior de los alveolos del panel expuesto al sol es mayor por efecto de la radiación y por eso su empuje es menor.

Temperatura del aire en el interior de los alveolos a partir del momento en que los depósitos se han agotado. Ensayo exterior del 4 al 7/07/2015.

Con una media de 30,1 (°C) y 32,8% de HR., los mini-aljibes tuvieron una autonomía efectiva de 3 días; manteniendo un gradiente térmico medio de 7,2 °C, un 75% respecto al periodo con reposición. Tras agotarse los depósitos, los paneles mantuvieron un gradiente térmico apreciable en la gráfica durante otros 3 días.

Imágen termográfica del un panel evaporativo. Tras agotarse el agua de los depósitos, persiste el efecto refrescante.

Potencia evaporativa e influencia de las orientaciones:

Por cada prototipo en (W/m^2), gradiente térmico agua-aire (°C) e influencia de las orientaciones:

Potencia absorbida por el panel de fachada según orientaciones en (W/m^2).

La gráfica muestra un primer periodo de dos días con reposición constante del agua de los depósitos y un segundo periodo sin reposición hasta que los niveles se reducen a cero.

Durante el periodo con reposición ha generado entre 156 y 479 W/m^2 (para temperaturas entre 26 y 36°C y humedades entre el 14 y 38%) frente a los 10 - 110 W/m^2 (para temperaturas entre 30 y 35°C y humedades entre el 35 y 55%) en sistemas de enfriamiento evaporativo mediante tubos cerámicos (BOUKHANOUF et al. 2015).

El evaporador poroso cerámico de (IBRAHIM ET AL. 2003) obtiene potencias de 224 W/m^2 para incrementos del 30% de H. R., mientras que el prototipo sombreado llega a los 448 W/m^2 para incrementos del 51%

La potencia de enfriamiento de una cubierta húmeda es aproximadamente 85 W/m^2 en condiciones óptimas (NEILA 2004). Inferior a cualquiera de los anteriores.

Comparativa de potencia de enfriamiento del prototipo P1 con los resultados obtenidos por otros autores.

Gradiente térmico:

Gradiente térmico entre el agua de los depósitos y el aire exterior en (°C).

Ensayo (30/06/2015)	Orientación		Condiciones exteriores		
Potencia evaporativa (W/m ²)	Norte (W/m ²)	Este (W/m ²)	Periodo*	Tª media del aire (°C)	HR media (%)
máxima		479	11:00-13:00	36	24
	448		19:00-23:00	35	16
mínima		334	0:00-7:30	30	31
	156		7:30-11:00	31	30
media diaria	279	388	0:00-23:00	33	24
Gradiente térmico agua-aire (°C)	(°C)	(°C)			
máximo	14	13,7	19:00	36	17
mínimo	7,9	6,8	7:30	26,9	38
media diaria	11,8	11	0:00-23:00	33	24

*Hora legal: corresponde a la hora solar +2h.

Los paneles logran un gradiente térmico similar con independencia de su orientación, si bien el consumo de agua es mayor bajo la radiación solar.

La orientación produce un desfase en la hora en la que la evaporación es máxima. La radiación solar es determinante para las fachadas soleadas y la inercia térmica del entorno en las no-irradiadas.

Perfil de temperaturas en la sección según orientaciones:

Sección por alveolo: Perfiles de temperatura de los prototipos 1(izquierda) y 2(derecha) a las 11:00h (1/07/2015).

Puede observarse un gradiente térmico similar en ambas orientaciones. La monitorización de cada una de las capas nos indica que este se produce en la cámara de aire ventilada (alveolos). La temperatura de esta corriente de aire se encuentra próxima a la de los depósitos que a la cara interior; fundamentalmente por la sección triangular del alveolo de los prototipos que disponen del doble de superficie de contacto con los depósitos que con la parte posterior de la hoja exterior del panel.

Consumo de agua:

El material y geometría estudiadas son capaces de un considerable intercambio de masa con la atmósfera.

El consumo instantáneo de agua en $\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ medido en condiciones reales en orientaciones Norte y Este sería:

Consumo medio diario de agua en ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{sm}^2$) y ($\text{kg H}_2\text{O}/\text{panel y día}$):

Consumo diario	medio	Orientaciones				Condiciones ext.	
		P1 (Norte)		P2 (Este)		ϑ media (°C)	HR (%)
Nivel de los depósitos		($\text{kg H}_2\text{O}/\text{sm}^2$)	($\text{kg H}_2\text{O}/\text{día}$)	($\text{kg H}_2\text{O}/\text{sm}^2$)	($\text{kg H}_2\text{O}/\text{día}$)		
100%		$2,77 \cdot 10^{-3}$	1,7	$3,67 \cdot 10^{-3}$	2,25	32,5	23,5
entre el 99 y el 30%		$2,87 \cdot 10^{-3}$	1,75	$3 \cdot 10^{-3}$	1,83	30,2	26,2
<30%		$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,83	$1,09 \cdot 10^{-3}$	0,67	30	37

El consumo de agua muestra máximos en el prototipo expuesto a la radiación solar durante las horas en las que esta incide directamente, mientras que en el prototipo no expuesto, este

máximo se alcanza al final de la tarde, cuando la temperatura del entorno es mayor. Se puede concluir por tanto que el consumo está relacionado con la radiación solar y la temperatura del aire.

La mejor relación entre consumo de agua y gradiente térmico se alcanza con los depósitos por debajo del 30% debido al agua embebida en la red capilar de las paredes de los depósitos y la inercia térmica del conjunto.

Eficiencia de los prototipos según la metodología empleada por otros autores:

Condiciones exteriores (verano-seco):

Aplicado la fórmula de eficiencia según (GHIABAKLOU et al. 1996) a los prototipos:

Gráfica de eficiencia de saturación del sistema según (GHIABAKLOU et al. 1996) aplicado a los paneles P1 y P2 en condiciones exteriores con reposición de los niveles de agua de los depósitos.

La capacidad de saturación se mantiene en valores en torno a 0,8 y 0,9 próximos a los valores habituales para los sistemas directos y por encima de los 0,6 a 0,8 enunciados por (WANG 2000) para los sistemas de enfriamiento evaporativo indirecto . El panel 1, protegido de la radiación directa, describe una suave senoide inversa a ϑ . Puede interpretarse como un aporte de agua a un ritmo relativamente constante a un aire cuya humedad relativa oscila por los cambios de temperatura del ciclo diario.

Gráfica de eficiencia de saturación del sistema según (GHIABAKLOU et al. 1996) aplicado a los paneles P1 y P2 en condiciones exteriores sin reposición de los niveles de agua de los depósitos.

La capacidad de saturación del aire por parte de los paneles no disminuye con el agotamiento de los depósitos, sino que se prolonga inalterada alrededor de 24h, a partir de entonces disminuye progresivamente.

Condiciones límites de funcionamiento (Alta humedad):

Ensayo (26/09/2014)

Tª del aire (°C)	HR (%)	t* (°C)	Tª depósitos (°C)	Gradiente térmico agua-aire, (°C)	Potencia refrigerante media diaria. (W/m²).
22,3	87	22,1	22,2	1,6	49

Se comprueba que en un régimen estacionario la temperatura del agua de los depósitos converge con la temperatura de bulbo húmedo.

Existe un límite inferior cuando la atmósfera está saturada y corresponde a la temperatura de bulbo húmedo t^* (IDAE 2007). La *aproximación o acercamiento* $= (T^a \text{ del agua} - T^a \text{ bulbo húmedo})$ Varía en condiciones reales exteriores en torno a 3 a 6°C, el mismo rango de valores estimados en el cálculo de torres de refrigeración (IDAE 2007).

La evaporación es proporcional a la diferencia entre la presión de vapor y la de saturación.

El rendimiento aumenta progresivamente con el descenso de la humedad ambiental.

El máximo rendimiento se produciría en altiplanicies áridas y el mínimo en zonas costeras o muy húmedas.

Eficiencia según: (GHIABAKLOU et al. 1996), (SANTAMOURIS et al. 1996) y (QIU et al 2006).

Eficiencia de saturación en modo evaporativo en condiciones controladas de alta humedad relativa con reposición del nivel de los depósitos: Prototipo 1.

Eficiencia de saturación en modo evaporativo en condiciones controladas de alta humedad relativa sin reposición del nivel de los depósitos: Prototipo 1.

Aplicando la metodología de (GHIABAKLOU et al. 1996), (SANTAMOURIS et al. 1996) y (QIU et al 2006) de forma análoga al caso anterior tenemos que los niveles de eficiencia de saturación son considerables incluso bajo condiciones de alta humedad relativa, reforzando la conclusión de la idoneidad del mortero de cal como pared porosa. Una vez los depósitos dejan de ser sistemáticamente rellenados y se permite su paulatino agotamiento, se observa que la eficiencia aun se mantiene inalterada alrededor de 6 días y a partir de entonces desciende por el agotamiento de las reservas de agua, tanto en los depósitos como la embebida en la estructura capilar. La reducción de la eficiencia se inicia súbita y vigorosamente describiendo una curva que se suaviza progresivamente.

Ahorro energético de un cerramiento suplementado con paneles evaporativos:

Se supone un cerramiento convencional preexistente, suplementado con paneles evaporativos en su cara exterior.

La metodología empleada para definir ahorro energético que podría lograrse es independiente de la transmitancia térmica (U) del cerramiento. Está basada en el gradiente térmico entre ambas caras del cerramiento. De este modo se obtiene un resultado que puede ser aplicado a cualquier envolvente.

Condiciones de contorno:

Para definir el gradiente térmico se fija una temperatura de consigna del espacio habitable, situada dentro de los parámetros de confort en condiciones de verano, igual a 26 °C. Esta será la temperatura de la cara interior del cerramiento existente.

Las condiciones de exteriores: (humedad y temperatura del aire) son las definidas en el experimento del 30/6 al 1/07/2015. Como las temperaturas varían a lo largo del día, para simplificar los cálculos y facilitar la comprensión de los resultados, se tomarán los valores medios diarios: ($\vartheta=33$ °C, H.R.=23%, $*t=16,4$ °C).

La situación de referencia es cualquier cerramiento convencional (No evaporativo) en el que se produce el gradiente térmico entre sus caras exterior e interior. En función de su superficie (S) y de su transmitancia (U) existirá un flujo de calor (Q) que será proporcional a la diferencia de temperatura entre ambas caras (ΔT). En esta situación inicial se considera que el flujo de calor es del 100%.

En un cerramiento convencional, el exterior es habitualmente el foco caliente durante el verano y el calor atraviesa perpendicularmente el cerramiento hacia la cara interior.

Como la cantidad de calor que atraviesa un cerramiento es:

$$Q=S \cdot U \cdot \Delta T$$

Si tenemos que la única variable es ΔT :

El gradiente térmico entre ambas caras sería:

$$(T^{\text{a}} \text{ exterior} - T^{\text{a}} \text{ de consigna}) = (33 - 26)^\circ\text{C} = 7^\circ\text{C}$$

Cerramiento convencional (verano):

Gradiente de temperatura a través de un cerramiento convencional y dirección del flujo energético a través del mismo (condiciones de verano).

Suplemento de un cerramiento con paneles evaporativos:

Al entrar en funcionamiento los paneles evaporativos, se reduce sensiblemente su temperatura. En las condiciones enunciadas, la temperatura de los paneles desciende por debajo de la de consigna. El foco cálido pasa a ser ahora el foco frío y las ganancias térmicas a través del muro no solo se reducen por completo, sino que el flujo energético llega a invertirse. Los prototipos de paneles evaporativos evitan que el calor estival atraviese la envolvente, y si disponen de un suministro de agua suficiente, son capaces de desarrollar una potencia refrigerante que los convierte en "*sumideros de calor*", que les permite absorber energía procedente de las cargas internas (usuarios, iluminación, equipos, etc.).

En este caso, el gradiente térmico entre ambas caras sería:

$$(T^{\text{a}} \text{ de los depósitos de los prototipos} - T^{\text{a}} \text{ de consigna}) = (21 - 26)^\circ\text{C} = -5^\circ\text{C}$$

El signo negativo indica que el flujo se produce en dirección inversa a la situación de referencia.

En relación a la situación inicial:

$$(T^{\text{a}} \text{ de los depósitos de los prototipos} - \vartheta) = (21 - 33)^\circ\text{C} = -12^\circ\text{C}$$

Estableciendo una proporción con el cerramiento de referencia donde ΔT era +7 °C, para ese cerramiento implementado con $\Delta T = -5$ °C, el flujo energético sería del 71% en sentido inverso (El cerramiento absorbe calor del interior en lugar de transmitirlo desde el exterior).

La variación del flujo de calor con los prototipos de paneles evaporativos respecto del cerramiento de referencia sería: $\Delta Q=171\%$.

Cerramiento suplementado con E.E. (Panel prototipo):

Gradiente de temperatura a través de un cerramiento suplementado con prototipos evaporativo e inversión del flujo energético (condiciones de verano).

Por último se calcula el ahorro máximo que podría obtenerse con un sistema evaporativo:

Los paneles patentados, con todas las mejoras geométricas y aislamiento en la hoja exterior, deberían alcanzar temperaturas del agua inferiores a los prototipos. Pero al no disponer de datos empíricos, solo puede suponerse que el ahorro que lograrán estará acotado entre el obtenido por los prototipos (que son su versión simplificada) y el límite teórico. Este límite viene determinado por la temperatura de bulbo húmedo ($t^*=16,4\text{ °C}$), que es la mínima que puede alcanzar el agua de los depósitos por enfriamiento evaporativo ($T_{\text{depósitos}} \geq t^*$). Se ha calculado a partir de las condiciones estivales de humedad y temperatura en las que se desarrolló el experimento (medias diarias).

Para esa temperatura de los depósitos, el flujo de calor en dirección a los paneles es del 137% respecto al cerramiento preexistente.

La variación del flujo de calor con enfriamiento evaporativo respecto al cerramiento de referencia sería: $\Delta Q=237\%$.

Cerramiento suplementado con E.E. (Límite teórico):

Gradiente de temperatura máximo que podría alcanzarse a través de un cerramiento suplementado con E.E y representación del flujo energético (condiciones de verano).

Resumen:

Se ha demostrado la viabilidad de un sistema constructivo para fachada ventilada mediante paneles mini aljibe para enfriamiento evaporativo pasivo estacional.

El mortero de cal hidráulica ha demostrado ser un material viable para la fabricación y ensayo de prototipos para el enfriamiento evaporativo, mostrando una **gran eficiencia** de saturación según la metodología de otros autores.

La incorporación de enfriamiento evaporativo en el interior de una cámara ventilada con una hoja exterior de gran albedo permite optimizar el gradiente térmico.

La orientación influye de forma limitada gracias al albedo del material de acabado de la hoja exterior. La temperatura de los depósitos desciende hasta valores similares pero a costa de una mayor tasa de evaporación en la orientación soleada.

En condiciones reales han llegado a desarrollar una **potencia refrigerante de 479 W/m²**

En condiciones de alta humedad (87% H.R.) han mantenido una media de 49W/m².

El proceso de enfriamiento se inicia con el llenado de agua, si bien la temperatura mínima se alcanza transcurridas varias horas, dependiendo del volumen de los depósitos.

Los paneles presentan una **autonomía de 3 días** aproximadamente, Mientras que las paredes de los depósitos se mantienen más frías que el aire exterior hasta 6 días.

La acumulación de agua en mini-aljibes incrementa la inercia térmica del panel en una proporción de 1,6 veces respecto al hormigón y 2,3 respecto al mortero de cal.

La presión hidrostática es un factor relevante por su relación con la estructura porosa de los depósitos y la potencia evaporativa. Mayor altura de los depósitos implica mayor potencia evaporativa.

El empleo de materiales porosos como depósitos de agua para enfriamiento evaporativo colabora de forma pasiva en la auto-regulación de la potencia evaporativa. A medida que aumenta la temperatura, disminuyen la densidad y viscosidad, aumentando la capilaridad y con ello la evaporación.

Los paneles mini-aljibe experimentados en condiciones reales exteriores estivales ha superado en 5'5 veces la potencia refrigerante media de una cubierta inundada, y en 12 veces la de la vegetación citada por otros autores.

Los paneles evaporativos, empleados como revestimiento de un cerramiento para su rehabilitación energética, pueden impedir las ganancias a través de la envolvente, y dependiendo del cerramiento preexistente, ser capaces de absorber energía del interior. Absorberán más calor cuanto menor sea e la transmitancia del cerramiento. Este tipo de suplemento evaporativo está indicado en climas cálidos-secos, sobre inmuebles con grandes cargas térmicas y mal aislados.

El empleo del enfriamiento evaporativo pasivo puede paliar efectos climáticos antrópicos como el calentamiento global, la isla de calor urbana y el déficit evaporativo producido por la impermeabilización de los espacios urbanos.

CAPÍTULO VII

FUTURAS INVESTIGACIONES

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

FUTURAS INVESTIGACIONES

- Patología y Rehabilitación**
- Aislamiento en la cara exterior**
- Ensayos con otros materiales**
- Disposición en serie de depósitos y alveolos**
- Optimización de la sección de los alveolos**
- Repelente de insectos mediante plantas aromáticas**
- Combinación con otros sistemas**

FUTURAS INVESTIGACIONES:

La patente, de la que solo se ha demostrado en profundidad su funcionamiento evaporativo, incluye otras propuestas con un gran potencial energético y medioambiental que están siendo estudiadas como son:

- La depuración de la contaminación atmosférica mediante fotocatalizadores en su hoja exterior.
- La capacidad de adaptar su tonalidad de forma estacional, oscureciéndose durante el invierno para absorber mayor radiación solar y volver a aclararse en verano para reflejarla.
- Medir las ventajas acústicas de la superficie del panel.
- Comprobar la capacidad del patrón de bandas claroscuros para repeler insectos mediante la luz polarizada.
- Determinar la capacidad de vegetar los paneles mediante especies con propiedades específicas: bactericidas, insecticidas, plaguicidas etc. Que se mantuviesen con la humedad del aire de los alveolos y el nitrógeno procedente de la reacción fotocatalítica.

Germinación de semillas de Ocimum basilicum sobre probeta de mortero de cal. (Octubre 2014).

Asimismo se contemplan una serie de investigaciones derivadas de las conclusiones obtenidas de la síntesis del estado del arte, los experimentos y cálculos realizados:

Patología y Rehabilitación:

Aplicación de la metodología propuesta para determinar el comportamiento de los flujos de humedad de carácter patológico tanto en la rehabilitación de inmuebles como en la industria.

Aislamiento en la cara exterior:

El análisis del flujo energético de los prototipos experimentados señala que la ausencia de aislamiento provoca un gran flujo energético a través de todos los mecanismos de transferencia de calor por lo que la implementación de aislamiento en el sistema apunta a una de las medidas que más pueden colaborar en la mejora de la eficiencia y reducción del consumo de agua.

El perfil de temperaturas en la sección, cuyos datos tienen origen en las mediciones realizadas, indica que el mayor gradiente térmico se produce en la cámara de aire ventilada. En el caso de

disponer de un aislamiento previo, parte de este gradiente se trasladaría al aislamiento y las pérdidas de energía se reducirían al aire de renovación de los alveolos.

Panel mini-aljibe para enfriamiento evaporativo pasivo estacional con aislamiento en la hoja exterior.

Sección constructiva de panel mini-aljibe para enfriamiento evaporativo pasivo estacional con aislamiento en la hoja exterior.

El aislamiento de la cara exterior resulta compatible con la circulación de aire a través de los alveolos, aun cuando este no fuera permeable al vapor de agua.

Los ensayos preliminares apuntan a un gran potencial de esta configuración, que limita la evaporación a través del frente del panel e incrementa el gradiente térmico.

El efecto de la radiación solar queda atenuado. Los paneles parecen comportarse de manera similar independientemente de su orientación y exposición al sol.

Ensayos con otros materiales:

Cualquier material que cumpla los requisitos indicados de durabilidad, impermeabilidad al agua líquida pero permeable al vapor, son susceptibles de ser empleado para la fabricación de los paneles evaporativos. Esto comprende no solo la cerámica y morteros porógenos sino materiales textiles, incluso maderas y sus derivados convenientemente tratados. La manufactura popular cuenta con numerosos ejemplos de cómo materiales tradicionales y sostenibles, con baja energía incorporada, han sido empleados desde la antigüedad para obtener resultados en este sentido. Los *Miyadaikus* empleaban una mezcla de Hollín y grasa vegetal a modo de lasur para proteger la madera. La carbonización de la madera mediante la técnica japonesa "*Shou Sugi-Ban*" se remonta a mil años. Este procedimiento crea un exterior carbonizado, de color negro y plateado.

Arquitectos Japoneses como Shigeru Ban o Terunobu Fujimori emplean el chamuscado la superficie de laminas de cedro. La casa Yakisugi es un ejemplo de esta técnica tradicional que también puede verse en el norte de Europa.

Actualmente la madera termotratada se obtiene de forma industrial en hornos con atmósferas pobres en oxígeno que alteran las cadenas de celulosa impidiendo que se produzca su combustión con llama.

Otros tratamientos son la acetilación, que se remonta a los años 30 del siglo pasado y que recientemente está teniendo un gran auge en el sector de la ingeniería y construcción.

Disposición en serie de depósitos y alveolos:

Una vez demostrada la capacidad del panel de generar una corriente convectiva en los alveolos basada en su propio enfriamiento evaporativo, parece posible plantear una configuración multicapa que alternase dos o más capas de depósitos y conductos ventilados.

Esta disposición podría presentar mayor gradiente térmico en condiciones de alta temperatura exterior y baja humedad relativa, o un menor albedo de la capa exterior y fuerte radiación solar.

Sección de configuración multicapa.

Optimización de la sección de los alveolos:

El régimen laminar o turbulento tienen comportamientos distintos en cuanto a la transferencia de calor y masa. Las pérdidas convectivas aumentarán con la aparición de vórtices pero también puede hacerlo el intercambio de masa y por tanto el enfriamiento evaporativo.

Nuevos experimentos con distintas secciones en combinación con un cálculo preciso del número de Reynolds permitirán determinar la geometría más adecuada para los alveolos, minimizando el espesor de los paneles, el flujo energético y el consumo de agua.

Sección hiperbólica de un alveolo con estrías helicoidales en su interior.

Hipótesis de régimen turbulento completamente desarrollado en el interior de un alveolo.

Repelente de insectos mediante plantas aromáticas:

Desde un enfoque químico-botánico, el estudio tendría por objetivo determinar las especies con mayor potencial de repeler plagas y cruzar estos resultados con su viabilidad para medrar sobre los paneles de fechada.

Desde el enfoque químico-constructivo, se propondrían alternativas en el material de soporte y geometría del panel para optimizar el crecimiento de las plantas anteriormente destacadas.

Combinación con otros sistemas:

Combinación con otros sistemas de acondicionamiento mediante la adición de intercambiadores de calor:

Sistemas todo aire:

El planteamiento consiste en conectar los aerotermos a la cámara de aire, de tal modo que estos intercambien calor con una atmósfera refrescada a menor temperatura que la exterior. Esto facilitaría la disipación de calor, mejorando su rendimiento (COP) a costa de un mayor consumo de agua por parte de los paneles.

Sistemas basados en el agua:

Esta variante supone intercambiar calor con el agua refrescada de los depósitos, recirculándola hacia suelos, techos u otras superficies refrescantes en contacto con el ambiente interior, o bien a otros sistemas de climatización como tratamiento o pre-tratamiento que reduzca su consumo.

Incorporación de intercambiadores de calor con el aire de la cámara ventilada y/o el agua de los depósitos.

CAPÍTULO IIX

ANEXOS

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

APARATOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS

SÍMBOLOS UTILIZADOS

TABLAS DE DATOS

APARATOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS:

[S0] Estación termo-higrométrica *TFA Klimalogg Pro 30.3039.IT*

Rango de humedad: 1-99% precisión: $\pm 3\%rH$

Temperatura: 0-+59 °C precisión: $\pm 0,1$ °C

[S1 y S2] Sonda termo-higrométrica *TFA* para exteriores:

Rango de humedad: 1-99% precisión: $\pm 1\%rH$

Rango de temperaturas: -36,6-+59,9 °C precisión: $\pm 0,1$ °C

Data Logger: Instrumento de medición multifunción modelo *Testo 435-2*

[S3] Sensor de T^a superficial con resorte de banda termopar: *Testo 0602 0393*

Rango de temperatura: -60°C a 300°C (Precisión clase 2)

[S4] Sonda telescópica termo-anemométrica de hilo caliente para m/s y °C, resolución de 0,01m/s. modelo *Testo 0635 1025*

Rango de temperatura: -20°C a 70°C $\pm 0,3$ °C

Rango de velocidad: 0-20m/s $\pm 5\%$

[S5] Termómetro digital de sonda *TFA LT-101 Nr. 03.1033* (Medición de la temperatura del agua)

Rango de temperatura: -40°C a +200°C $\pm 0,5$ °C (entre 0 y 50 °C)

Sensor de humedad y Tª Testo 0636 9736 (Empleado para mediciones redundantes)

Rango de humedad: 0-100% precisión: $\pm 1\%rH$

Rango de temperatura: $-20^{\circ}C$ a $+70^{\circ}C$

[C1]Cámara termográfica: marca *Flir*, modelo *E30bx B 1.1*

Rango de temperaturas: -20 a $+120^{\circ}C$ precisión: $\pm 2^{\circ}C$ o $\pm 2\%$

Rango espectral $7,5$ - $13\mu m$

Resolución IR: 160×120 Pixels

SÍMBOLOS UTILIZADOS:

$\hat{a}$	Albedo.
e	Rugosidad.
e/D	Rugosidad relativa.
h_d	Descenso del nivel de un depósito.
Vol_d	volumen de un depósito.
t	Tiempo (s).
T	Temperatura (°C).
P	Potencia (W).
ρ	Densidad (kg/m ³).
λ	Conductividad térmica aparente (W/m·°C).
φ	Ángulo de contacto líquido-sólido.
τ	Fuerza viscosa (N/m).
μ	(Fluidodinámica) Viscosidad dinámica en Pascal segundo (Pa·s) SI; N·s/m ² o Kg/m·s
μ	(Materiales) Coeficiente de resistencia a la difusión del vapor de agua (adimensional).
ν	Viscosidad cinemática (m ² /s) $\nu=\mu/\rho$.
c_v	Calor latente de vaporización (J/kg).
P_p	Potencia evaporativa de un panel P. (W/m ²).
$m_{evap.}$	Masa de agua evaporada por un panel P en un tiempo t.
S_p	Frente de un panel P (m ²).
ξ	Coeficiente de emisividad (adimensional) dependiente del material.
U	Transmitancia térmica en (W/m ² ·K).
U_u	Coeficiente útil de transmisión de calor de un elemento heterogéneo en (W/m ² ·K).

Psicrometría:

q	Humedad específica. (ASHRAE).
dv	Humedad absoluta. (ASHRAE).
Ws	Humedad de saturación. (kg _w /kg _{as}).
μ	Grado de saturación: (MARDOMINGO).
HR	Humedad relativa.
P_w	Presión parcial de vapor.
P_{ws}	Presión de saturación de aire húmedo (Pa).
ρ_h	Densidad del aire húmedo. (kg/m ³)
T	Temperatura de bulbo seco (K) o (°C) según fórmula.
t^*	Temperatura termodinámica de bulbo húmedo.
h	Entalpía del aire húmedo (kJ/kg).
h_w	Entalpía del agua líquida (kJ/kg).
t_d	Punto de rocío. (K) o (°C) según fórmula. (PEPPERS 1988).
R	Constante universal de los gases ideales.
v	Volumen específico del aire húmedo (MARDOMINGO 1998).
W	Relación de mezcla. (kg _w /kg _{as}) (ASHRAE).

Presión:

p	Presión absoluta (Pa).
Pa	Pascal, equivale a 1N/1m ² =kg/m·s ²
bar	Un Bar equivale a 100.000 Pascales.
$mbar$	100 Pascales=0,75 mmHg (Torr).
atm	Atmósfera de presión, equivale a 101.325 Pa.

Constantes:

σ	Constante de Stefan-Boltzmann=5,67·10 ⁻⁸ (W/m ² ·K ⁴).
----------	--

R Constante universal de los gases ideales: $R=8,314472 \text{ (J/mol}\cdot\text{K)}$.

h Constante de Plank= $6,626\cdot 10^{-34} \text{ (J}\cdot\text{s)}$

Valores:

Calor específico:

C_e Calor específico **morteros de cal** y bastardos: $1.100 \text{ J/kg}\cdot\text{C}$, F:(NEILA 2004 p.376)

Aire seco:

m_{as} Masa molecular del aire seco: $28,9645 \text{ (g/mol)}$ (HARRISON 1965)

R_a Constante del aire seco= $8314,41/28,9645 \text{ (g/mol)}=287,055 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$ (ASHRAE)

ρ_{as} Densidad del aire seco (20°C y 1 atm) $\approx 1.20 \text{ kg/m}^3$ (ASHRAE)

μ_{as} Viscosidad dinámica o absoluta $18\cdot 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ (a 20°C) (ASHRAE)

A T^a ambiente se puede considerar que $\mu_{as}=[1,983+0,00184(T_c-27(^\circ\text{C}))]\cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ (YARKE)

ν_{as} Viscosidad cinemática $16 \text{ mm}^2/\text{s}$ (20°C y 1 atm) (ASHRAE)

λ_{as} Conductividad térmica aparente del aire $\lambda=0,025 \text{ (W/m}\cdot\text{C)}$ (NEILA 2004)

C_{eas} Calor específico: $1.010 \text{ (J/kg}\cdot\text{K)}$ (NEILA 2004)

Agua:

m_a Masa molecular del agua: $18,01528$ (HARRISON 1965)

R_h Constante del vapor de agua $=461,520 \text{ (J/Kg}\cdot\text{K)}$ (ASHRAE)

ρ_a Densidad del agua: $998,2 \text{ kg/m}^3$ (20°C y 1 atm) (ASHRAE)

C_{ea} Calor específico: $4.180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (a 20°C) (ASHRAE)

h_w Entalpía de fusión: $333,8 \text{ KJ/Kg}$ (ASHRAE)

h_{fg}/h_{fg} Entalpía de vaporización: 2257 kJ/Kg (ASHRAE)

Vaporización a T^a ambiente 2424 J/g (a 20°C) (NEILA 2004)

μ_a Viscosidad dinámica o absoluta $10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ (a 20°C) (ASHRAE)

ν_a Viscosidad cinemática $1 \text{ mm}^2/\text{s}$ (20°C y 1 atm) (ASHRAE)

λ_a Conductividad térmica: $\lambda=0,62 \text{ (W/mK)}$ (a 20°C) (ASHRAE)

P_s Presión de vapor: $2,34 \text{ kPa}$ (a 20°C) (ASHRAE)

Emisividades:

Asfalto $\xi=0,967$ (en $6,5\text{-}20\mu\text{m}$) (KERN 1964).

Agua destilada: $\xi=0,96$ (a 20°C) (WOLFE et al. 1985), (BLESÁ 1994)

Ladrillo ordinario $\xi=0,93$ (BLESÁ 1994).

Mortero de cal: $\xi=0,91$ (entre 10 y 90°C) (BRAMSON 1968).

Pintura blanca: $\xi=0,88$ (a 20°C). (ESPULGAS et al. 2005).

Pintura negra: $\xi=0,90$ (ESPULGAS et al. 2005).

Titanio oxidado $\xi=0,4\text{-}0,5$ (NEILA 2004, p.442).

Vegetación $\xi=0,96$ (NEILA 2004, p.442).

TABLAS DE DATOS:

"Experimentos sobre prototipos de panel para fachada ventilada con mini aljibe, para enfriamiento evaporativo pasivo estacional."

Experimento en condiciones exteriores:

Periodos consecutivos:

1. *Con reposición* del nivel de los depósitos: Del 30_06_2015 (00:00h) al 02_07_2015 (01:00h)
2. *Sin reposición* del nivel de los depósitos: del 02_07_2015 (01:00h) al 4_7_2015 (13:00h)

Los datos se muestran sombreados en el periodo *sin reposición* del nivel de los depósitos. Algunos de los gráficos representados en la tesis hacen referencia a datos que no se han incluido en las tablas por carecer de especial relevancia y evitar de este modo un volumen excesivo de datos.

Condiciones de contorno:

1. Toma de datos: ϑ_{ex} , H.R._{ex}, Presión.
2. Valores derivados: td_{ex} , t^*_{ex} , V_{ex} , Pws_{ex} , Pw_{ex} , W_{ex}
3. Valores derivados: ph_{ex} , Ws_{ex} , h_{ex} .

Prototipos:

Prototipo P1:

1. Toma de datos: T^a Alveolo, H.R., td .
2. Toma de datos: T^a del agua de los 4 depósitos, ΔT de la media de la T^a de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, T^a superficie frontal, consumo de agua.
3. Prototipo P1: Evaporación en los depósitos (acumulada y por intervalo), potencia equivalente.
4. Valores derivados: t^*_{p1} , $\Delta T A_{ex-P1}$, V_{p1} , Pws_{p1} , Pw_{p1} , W_{p1} .
5. Valores derivados: ph_{p1} , Ws_{p1} , μ_{p1} , h_{p1} , Δh_{p1} , Eficiencia de saturación.

Prototipo P2:

1. Toma de datos: T^a Alveolo, H.R., td .
2. Toma de datos: T^a del agua de los 4 depósitos, ΔT de la media de la T^a de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, T^a superficie frontal, consumo de agua.
3. Prototipo P2: Evaporación en los depósitos (acumulada y por intervalo), potencia equivalente.
4. Valores derivados: t^*_{p2} , $\Delta T A_{ex-P1}$, V_{p2} , Pws_{p2} , Pw_{p2} , W_{p2} .
5. Valores derivados: ph_{p2} , Ws_{p2} , μ_{p2} , h_{p2} , Δh_{p2} , Eficiencia de saturación.

Experimento en condiciones interiores:

1. Condiciones de contorno: Toma de datos: ϑ , H.R., td .
2. Toma de datos prototipo: T^a alveolo, H.R. Alveolo.
Datos derivados: t^* alveolo.
3. Toma de datos Prototipo: T^a del agua de los 4 depósitos, T^a de los depósitos centrales (A y B), ΔT de la media de la T^a de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, potencia evaporativa.

TABLAS DE DATOS:

Experimento en condiciones exteriores:

Condiciones de contorno: Toma de datos: ϑ_{ex} , H.R._{ex}, Presión.

Día	Hora	ϑ_{ex} (°C)	H.R. _{ex} (%)	Presión (hPa)
30-jun Con reposición. ↓	0:00	32,9	24	940
	0:30	32,4	27	940
	1:00	32,1	26	940,1
	1:30	32	27	940
	2:00	31,7	28	939,9
	2:30	31,3	28	939,8
	3:00	30,8	29	939,6
	3:30	30,2	30	939,6
	4:00	29,8	31	939,7
	4:30	29,4	31	939,6
	5:00	28,9	32	939,5
	5:30	28,4	32	939,6
	6:00	28,2	34	939,6
	6:30	27,6	35	939,8
	7:00	27	37	940,1
	7:30	26,9	38	940,3
	8:00	27,2	37	940,5
	8:30	29,2	34	940,6
	9:00	31,6	30	940,7
	9:30	32,7	28	940,7
	10:00	33,6	27	940,8
	10:30	34,9	25	940,8
	11:00	35	25	940,8
	11:30	35,1	25	940,8
	12:00	36,5	23	940,8
	12:30	36,5	23	940,8
	13:00	36,1	23	940,7
	13:30	35,5	23	940,4
	14:00	35,1	23	940,2
	14:30	35	21	939,3
	15:00	35,2	21	939,3
	15:30	35,4	21	939,3
	16:00	35,4	20	938,4
	16:30	35,3	20	938,6
	17:00	35,6	20	937,7
	17:30	36	18	937,8
	18:00	36,2	15	936,9
	18:30	36,2	16	936,6
	19:00	36	17	936,3
	19:30	35,9	16	936,3

30-jun	20:00	36,1	15	936,2
	20:30	35,9	14	936,3
	21:00	35,4	15	936,5
	21:30	34,9	16	936,6
	22:00	34,3	14	936,8
	22:30	33,8	16	936,5
	23:00	33,2	19	937,3
	23:30	32,7	21	938,2
01-jul	0:00	32,2	24	938,1
	0:30	31,8	23	938,4
	1:00	31,3	23	938,8
	1:30	30,9	23	938,7
	2:00	30,5	25	938,6
	2:30	30,1	25	938,6
	3:00	29,8	26	938,6
	3:30	29,4	26	938,6
	4:00	28,9	27	938,7
	4:30	28,8	27	938,7
	5:00	28,4	28	938,7
	5:30	28	28	938,7
	6:00	27,6	28	938,7
	6:30	27,2	28	938,9
	7:00	26,8	28	939,1
	7:30	26,6	28	939,2
	8:00	26,7	28	939,3
	8:30	29,4	26	939,4
	9:00	31,5	24	939,5
	9:30	33	22	939,6
	10:00	34,1	21	939,8
	10:30	35,4	21	939,8
	11:00	35,2	21	939,8
	11:30	35,1	23	938,7
	12:00	35,5	23	939,6
	12:30	35,5	24	938,6
	13:00	34,7	24	939,5
	13:30	34,1	24	939,4
	14:00	33,8	24	939,2
	14:30	33,6	24	938,8
	15:00	33,6	24	938,3
	15:30	33,9	22	938
	16:00	33,9	22	937,7
	16:30	34	21	937,5
	17:00	34,2	21	937,2
	17:30	34,6	19	936,9
	18:00	34,6	16	936,5

		18:30	34,7	15	936,2
		19:00	34,7	16	935,8
		19:30	34,4	16	935,8
		20:00	34,7	16	935,8
		20:30	34,4	15	936,0
		21:00	33,6	15	936,2
		21:30	33	19	936,5
		22:00	32,4	20	936,7
		22:30	31,9	21	937,2
		23:00	31,6	21	937,7
	01-jul	23:30	31,2	22	938,1
Con reposición ↑	02-jul	0:00	30,8	23	938,4
		0:30	30,6	22	938,7
Sin reposición ↓		1:00	30,2	22	939
		1:30	29,6	24	939,3
		2:00	29	27	939,5
		2:30	28,4	29	939,8
		3:00	28	29	940
		3:30	27,7	25	940,0
		4:00	27,5	23	940
		4:30	27,1	23	940,1
		5:00	26,9	24	940,2
		5:30	26,7	25	940,5
		6:00	26,5	28	940,8
		6:30	26	32	940,9
		7:00	25,7	33	941
		7:30	25,4	36	941,2
		8:00	25,8	36	941,4
		8:30	28,1	33	941,7
		9:00	28,8	32	942
		9:30	29,4	31	942,1
		10:00	31,7	28	942,2
		10:30	32,7	27	942,5
		11:00	32,8	26	942,7
		11:30	32,8	26	942,9
		12:00	33,3	25	943,1
		12:30	33,1	25	943,1
		13:00	32,3	25	943,1
		13:30	32	25	943,0
		14:00	31,5	25	942,9
		14:30	31,4	25	942,7
		15:00	31,5	23	942,4
		15:30	31,5	25	942,3
		16:00	31,8	22	942,1
		16:30	31,9	23	942,1

	02-jul	17:00	32,2	22	942
		17:30	32,2	22	941,9
		18:00	32,2	24	941,8
		18:30	32,1	24	941,6
		19:00	32,2	24	941,4
		19:30	32,2	25	941,3
		20:00	32	25	941,2
		20:30	32	24	941,2
		21:00	31,8	25	941,1
		21:30	31,5	24	941,1
		22:00	31,2	26	941
		22:30	31	26	941,3
		23:00	30,7	27	941,5
		23:30	30,3	29	941,7
	03-jul	0:00	30,1	26	941,9
		0:30	29,6	31	942,2
		1:00	29	35	942,4
		1:30	28,5	37	942,4
		2:00	28	37	942,4
		2:30	27,3	40	942,5
		3:00	27	41	942,6
		3:30	26,7	42	942,7
		4:00	26,3	43	942,8
		4:30	25,8	45	942,5
		5:00	25,4	46	942,1
		5:30	25	47	942,3
		6:00	24,7	49	942,4
		6:30	24,5	50	942,7
		7:00	24,2	53	942,9
		7:30	23,9	55	943,2
		8:00	24,4	56	943,4
		8:30	26,3	52	943,5
		9:00	28,1	48	943,6
		9:30	29,6	44	943,5
		10:00	30,4	42	943,4
		10:30	31,1	41	943,4
		11:00	32,2	38	943,4
		11:30	32,5	38	943,5
		12:00	32,7	38	943,5
		12:30	33,4	36	943,4
		13:00	33,1	35	943,2
		13:30	32,8	34	943,1
		14:00	32,8	33	942,9
		14:30	32,8	31	942,7
		15:00	32,9	29	942,4

		15:30	33,4	28	942,3
		16:00	33,5	26	942,2
		16:30	33,9	26	942,1
		17:00	34	26	941,9
		17:30	34,3	26	941,7
		18:00	34,2	27	941,5
		18:30	34,3	28	941,4
		19:00	34,4	26	941,2
		19:30	34,4	24	941,2
		20:00	34,6	22	941,2
		20:30	34,5	22	941,4
		21:00	34,1	22	941,5
		21:30	33,5	25	941,6
		22:00	32,9	25	941,7
		22:30	32,4	26	942,2
		23:00	32	27	942,6
	03-jul	23:30	31,8	36	942,9
	04-jul	0:00	31,5	37	943,1
		0:30	31	38	943,2
		1:00	30,4	41	943,2
		1:30	29,9	40	943,4
		2:00	29,4	43	943,6
		2:30	28,7	44	943,5
		3:00	28,1	44	943,5
		3:30	27,7	43	943,5
		4:00	27,3	44	943,5
		4:30	26,6	45	943,5
		5:00	26,2	45	943,5
		5:30	26	46	943,5
		6:00	25,6	46	943,4
		6:30	25,2	46	943,4
		7:00	25	47	943,4
		7:30	25	48	943,4
		8:00	24,7	47	943,4
		8:30	27	42	943,4
		9:00	28,7	37	943,4
		9:30	30,3	35	943,4
		10:00	31,2	33	943,4
		10:30	32,6	31	943,4
		11:00	33,8	28	943,3
		11:30	33,6	28	943,3
		12:00	34,5	27	943,3
		12:30	34,5	27	943,3
04-jul		13:00	33,7	27	943,3

Condiciones de contorno: Valores derivados: td_{ex} , t^*_{ex} , V_{ex} , Pws_{ex} , Pw_{ex} , W_{ex}

Día	Hora	Punto de rocío td_{ex} (°C)	T^a bulbo húmedo t^*_{ex} (°C)	Volumen específico V_{ex} (m³/kg a.s.)	Presión de saturación Pws_{ex} (Pa)	Presión de vapor Pw_{ex} (Pa)	Ratio de humedad W_{ex} (kgw/kg a.s.)
30-jun con Rep. ↓	0:00	9,7	16,8	0,95289547	5006,15106	1201,47625	0,00805287
	0:30	11,0	17,4	0,95250537	4867,24117	1314,15512	0,0088188
	1:00	10,2	17,0	0,95075642	4785,51141	1244,23297	0,00834239
	1:30	10,7	17,2	0,9509654	4758,53423	1284,80424	0,00861911
	2:00	11,0	17,3	0,95039684	4678,39335	1309,95014	0,00879113
	2:30	10,7	17,1	0,94895921	4573,3636	1280,54181	0,00859197
	3:00	10,8	17,0	0,94770224	4444,96122	1289,03875	0,00865165
	3:30	10,8	16,9	0,94583826	4295,02288	1288,50686	0,00864803
	4:00	10,9	16,9	0,94462703	4197,52419	1301,2325	0,00873369
	4:30	10,6	16,7	0,94318821	4101,95569	1271,60626	0,00853304
	5:00	10,6	16,6	0,94177836	3985,16058	1275,25139	0,00855876
	5:30	10,2	16,3	0,93975867	3871,2696	1238,80627	0,00831
	6:00	10,9	16,7	0,93976999	3826,51274	1301,01433	0,00873315
	6:30	10,8	16,5	0,93763002	3694,93346	1293,22671	0,00867827
	7:00	11,1	16,6	0,93573826	3567,31184	1319,90538	0,00885698
	7:30	11,4	16,7	0,93550663	3546,41927	1347,63932	0,00904384
	8:00	11,3	16,7	0,93611102	3609,41888	1335,48498	0,00895917
	8:30	11,8	17,3	0,94264056	4054,88522	1378,66098	0,00925213
	9:00	12,0	17,8	0,95014486	4651,94147	1395,58244	0,00936639
	9:30	11,9	17,8	0,95345399	4950,17976	1386,05033	0,00930145
	10:00	12,1	18,1	0,95634127	5206,39789	1405,72743	0,00943449
	10:30	12,0	18,2	0,96030024	5596,76746	1399,19187	0,00938996
	11:00	12,1	18,2	0,96069044	5627,81944	1406,95486	0,00944285
	11:30	12,2	18,3	0,96108108	5659,02057	1414,75514	0,009496
	12:00	12,1	18,3	0,96532385	6111,83507	1405,72207	0,00943445
	12:30	12,1	18,3	0,96532385	6111,83507	1405,72207	0,00943445
	13:00	11,7	18,1	0,96387199	5979,36765	1375,25456	0,00922793
	13:30	11,2	17,8	0,96186212	5785,32866	1330,62559	0,00892706
	14:00	10,9	17,7	0,96052984	5659,02057	1301,57473	0,00873131
	14:30	9,5	17,0	0,95991241	5627,81944	1181,84208	0,00792557
	15:00	9,6	17,1	0,96066747	5690,37146	1194,97801	0,0080148
	15:30	9,8	17,2	0,96142405	5753,52491	1208,24023	0,00810491
	16:00	9,1	16,9	0,9617608	5753,52491	1150,70498	0,00772166
	16:30	9,0	16,8	0,96117806	5721,87271	1144,37454	0,007677
	17:00	9,2	17,0	0,96324016	5817,28456	1163,45691	0,00781421
	17:30	8,0	16,5	0,96340788	5946,64186	1070,39553	0,00718118
	18:00	5,5	15,6	0,96321095	6012,24925	901,837387	0,00604522

30-jun	18:30	6,4	15,9	0,9641474	6012,24925	961,95988	0,0064545
	19:00	7,2	16,2	0,96434959	5946,64186	1010,92912	0,00678886
	19:30	6,2	15,8	0,96336692	5914,07127	946,251403	0,00635008
	20:00	5,4	15,6	0,96357729	5979,36765	896,905147	0,00601638
	20:30	4,3	15,2	0,96213906	5914,07127	827,969978	0,00554924
	21:00	4,9	15,3	0,96074836	5753,52491	863,028736	0,00578515
	21:30	5,4	15,4	0,95943369	5596,76746	895,482794	0,00600415
	22:00	3,0	14,5	0,95595308	5413,55489	757,897685	0,00507304
	22:30	4,5	14,9	0,95558578	5264,87194	842,37951	0,00564548
	23:00	6,5	15,5	0,95419198	5091,13747	967,31612	0,00648592
	23:30	7,6	15,9	0,95246218	4950,17976	1039,53775	0,00696883
01-jul	0:00	9,1	16,5	0,95220314	4812,62126	1155,0291	0,00775355
	0:30	8,2	16,0	0,94990911	4704,97574	1082,14442	0,00725623
	1:00	7,7	15,7	0,94764387	4573,3636	1051,87363	0,00704791
	1:30	7,4	15,5	0,94626744	4470,38808	1028,18926	0,0068882
	2:00	8,3	15,8	0,94578626	4369,43312	1092,35828	0,00732394
	2:30	8,0	15,6	0,94429667	4270,46548	1067,61637	0,00715615
	3:00	8,3	15,7	0,94361003	4197,52419	1091,35629	0,00731715
	3:30	7,9	15,5	0,94211996	4101,95569	1066,50848	0,00714864
	4:00	8,1	15,4	0,94056799	3985,16058	1075,99336	0,00721217
	4:30	8,0	15,4	0,9401957	3962,15201	1069,78104	0,00717005
	5:00	8,2	15,4	0,93910184	3871,2696	1083,95549	0,00726616
	5:30	7,8	15,1	0,93761235	3782,20696	1059,01795	0,00709709
	6:00	7,5	14,9	0,93612872	3694,93346	1034,58137	0,0069315
	6:30	7,2	14,6	0,93444956	3609,41888	1010,63729	0,00676788
	7:00	6,8	14,4	0,93277684	3525,63339	987,177348	0,00660768
	7:30	6,6	14,3	0,93194287	3484,37984	975,626355	0,00652885
	8:00	6,7	14,3	0,9322092	3504,95373	981,387044	0,0065671
	8:30	7,9	15,5	0,94130843	4101,95569	1066,50848	0,00714248
	9:00	8,5	16,1	0,94814258	4625,61958	1110,1487	0,00743743
	9:30	8,5	16,3	0,95265126	5034,34204	1107,55525	0,00741905
	10:00	8,7	16,6	0,95601807	5353,65063	1124,26663	0,00753073
	10:30	9,8	17,2	0,96090589	5753,52491	1208,24023	0,00810054
	11:00	9,6	17,1	0,96014979	5690,37146	1194,97801	0,00801048
	11:30	10,9	17,7	0,9620863	5659,02057	1301,57473	0,00874546
	12:00	11,2	17,8	0,96269284	5785,32866	1330,62559	0,00893477
	12:30	11,9	18,2	0,96433621	5785,32866	1388,47888	0,00933916
	13:00	11,2	17,8	0,96029454	5535,10863	1328,42607	0,00892076
	13:30	10,7	17,4	0,95808796	5353,65063	1284,87615	0,00862518
	14:00	10,5	17,3	0,95714503	5264,87194	1263,56927	0,00848203
	14:30	10,3	17,2	0,95679355	5206,39789	1249,53549	0,00839018
	15:00	10,3	17,2	0,95731029	5206,39789	1249,53549	0,00839471
	15:30	9,2	16,8	0,95767376	5294,32191	1164,75082	0,00782048
	16:00	9,2	16,8	0,95798401	5294,32191	1164,75082	0,00782301
	16:30	8,6	16,5	0,95801747	5323,91462	1118,02207	0,00750699

01-jul	17:00	8,8	16,6	0,95907748	5383,53053	1130,54141	0,00759454
	17:30	7,7	16,2	0,95980254	5504,50058	1045,85511	0,00702188
	18:00	5,2	15,3	0,95845614	5504,50058	880,720093	0,00590487
	18:30	4,3	15,0	0,95860588	5535,10863	830,266294	0,00556567
	19:00	5,2	15,3	0,95954026	5535,10863	885,61738	0,0059425
	19:30	5,0	15,2	0,95846003	5443,7243	870,995888	0,00584347
	20:00	5,2	15,3	0,95954026	5535,10863	885,61738	0,0059425
	20:30	4,1	14,9	0,95769109	5443,7243	816,558645	0,00547386
	21:00	3,4	14,5	0,95464398	5206,39789	780,959684	0,00523208
	21:30	6,3	15,4	0,95433654	5034,34204	956,524988	0,0064187
	22:00	6,6	15,4	0,95239535	4867,24117	973,448234	0,00653169
	22:30	6,9	15,5	0,95054148	4731,68919	993,65473	0,00666513
	23:00	6,7	15,3	0,9489297	4651,94147	976,907709	0,00654809
	23:30	7,0	15,4	0,94757514	4547,42846	1000,43426	0,00670495
02-jul	0:00	7,3	15,4	0,9462044	4444,96122	1022,34108	0,00685081
con Rep ↑	0:30	6,5	15,1	0,94471507	4394,48425	966,786536	0,00647256
sin Rep. ↓	1:00	6,2	14,9	0,94295255	4295,02288	944,905033	0,00632254
	1:30	6,9	15,1	0,94136274	4149,50068	995,880162	0,00666548
	2:00	8,2	15,5	0,94013009	4008,28531	1082,23703	0,00724826
	2:30	8,7	15,6	0,93843142	3871,2696	1122,66819	0,0075203
	3:00	8,4	15,4	0,93668206	3782,20696	1096,84002	0,00734327
	3:30	5,9	14,2	0,93406908	3716,58576	929,146441	0,00620936
	4:00	4,6	13,7	0,93260784	3673,39109	844,87995	0,00564111
	4:30	4,2	13,4	0,93107972	3588,31156	825,311658	0,00550871
	5:00	4,7	13,6	0,9306217	3546,41927	851,140625	0,00568207
	5:30	5,1	13,7	0,92995657	3504,95373	876,238432	0,00584932
	6:00	6,6	14,2	0,92997576	3463,91127	969,895156	0,00647895
	6:30	8,1	14,8	0,92939559	3363,13238	1076,20236	0,00719653
	7:00	8,3	14,8	0,92851052	3303,90011	1090,28704	0,00729103
	7:30	9,3	15,3	0,92816464	3245,57951	1168,40862	0,00781834
	8:00	9,6	15,5	0,92948059	3323,54232	1196,47523	0,00800684
	8:30	10,4	16,4	0,93687588	3804,3037	1255,42022	0,00840392
	9:00	10,5	16,6	0,93886135	3962,15201	1267,88864	0,00848578
	9:30	10,6	16,7	0,94065108	4101,95569	1271,60626	0,00851009
	10:00	11,0	17,3	0,94804412	4678,39335	1309,95014	0,00876937
	10:30	11,3	17,6	0,95115009	4950,17976	1336,54853	0,00894759
	11:00	10,8	17,3	0,95077092	4978,09715	1294,30526	0,00865852
	11:30	10,8	17,3	0,95056645	4978,09715	1294,30526	0,00865666
	12:00	10,7	17,3	0,95175807	5119,74304	1279,93576	0,00855739
	12:30	10,5	17,2	0,9509951	5062,67066	1265,66767	0,0084607
	13:00	9,8	16,8	0,94795948	4839,86433	1209,96608	0,00808351
	13:30	9,6	16,6	0,9469294	4758,53423	1189,63356	0,00794679

02-jul	14:00	9,1	16,4	0,94515213	4625,61958	1156,40489	0,00772289
	14:30	9,1	16,3	0,94503114	4599,42713	1149,85678	0,00768068
	15:00	7,9	15,8	0,9447209	4625,61958	1063,8925	0,00710182
	15:30	9,1	16,4	0,94581223	4625,61958	1156,40489	0,00772829
	16:00	7,5	15,7	0,94565733	4704,97574	1035,09466	0,00690967
	16:30	8,2	16,0	0,9465566	4731,68919	1088,28851	0,0072693
	17:00	7,8	15,9	0,94723208	4812,62126	1058,77668	0,00707032
	17:30	7,8	15,9	0,94733378	4812,62126	1058,77668	0,00707108
	18:00	9,1	16,5	0,94841582	4812,62126	1155,0291	0,00772271
	18:30	9,0	16,4	0,94824479	4785,51141	1148,52274	0,00768032
	19:00	9,1	16,5	0,94882381	4812,62126	1155,0291	0,00772603
	19:30	9,7	16,7	0,9494173	4812,62126	1203,15532	0,00805299
	20:00	9,6	16,6	0,94876354	4758,53423	1189,63356	0,00796218
	20:30	9,0	16,4	0,94832897	4758,53423	1142,04822	0,00764019
	21:00	9,4	16,5	0,94811117	4704,97574	1176,24394	0,00787228
	21:30	8,5	16,1	0,94656225	4625,61958	1110,1487	0,00742504
	22:00	9,5	16,5	0,94642171	4547,42846	1182,3314	0,00791439
	22:30	9,3	16,4	0,94541327	4495,94122	1168,94472	0,00782155
	23:00	9,6	16,4	0,94448038	4419,66012	1193,30823	0,00798451
	23:30	10,3	16,7	0,94364519	4319,70294	1252,71385	0,00838555
03-jul	0:00	8,5	15,8	0,94138205	4270,46548	1110,32102	0,00741942
	0:30	10,7	16,8	0,94136745	4149,50068	1286,34521	0,00860963
	1:00	12,0	17,4	0,9404406	4008,28531	1402,89986	0,009399
	1:30	12,4	17,6	0,93927716	3893,8184	1440,71281	0,00965627
	2:00	12,0	17,2	0,9373134	3782,20696	1399,41658	0,00937531
	2:30	12,6	17,4	0,93558075	3630,63426	1452,2537	0,00973378
	3:00	12,7	17,4	0,93465621	3567,31184	1462,59786	0,00980315
	3:30	12,8	17,5	0,933723	3504,95373	1472,08057	0,00986665
	4:00	12,8	17,4	0,93238452	3423,28827	1472,01396	0,00986513
	4:30	13,0	17,4	0,93142594	3323,54232	1495,59404	0,01002949
	5:00	13,0	17,3	0,93051273	3245,57951	1492,96658	0,01001537
	5:30	12,9	17,2	0,92908959	3169,21647	1489,53174	0,00999034
	6:00	13,3	17,4	0,92836946	3112,97736	1525,3589	0,01023293
	6:30	13,4	17,4	0,92762644	3075,97018	1537,98509	0,01031626
	7:00	14,1	17,8	0,92708005	3021,1793	1601,22503	0,01074488
	7:30	14,3	17,9	0,9262085	2967,2422	1631,98321	0,01095196
	8:00	15,1	18,5	0,92831075	3057,61099	1712,26216	0,01149756
	8:30	15,7	19,3	0,93478268	3423,28827	1780,1099	0,01196061
	9:00	16,1	19,8	0,94072979	3804,3037	1826,06578	0,01227416
	9:30	16,1	20,0	0,94548229	4149,50068	1825,7803	0,01227353
	10:00	16,1	20,1	0,9480556	4344,50618	1824,6926	0,0122674
	10:30	16,3	20,3	0,95052727	4521,62118	1853,86468	0,01246746
	11:00	16,1	20,3	0,95368291	4812,62126	1828,79608	0,01229553
	11:30	16,4	20,5	0,95488432	4894,75232	1860,00588	0,01250891
	12:00	16,6	20,6	0,95567106	4950,17976	1881,06831	0,01265276

03-jul	12:30	16,3	20,5	0,95771346	5148,48792	1853,45565	0,01246532
	13:00	15,6	20,1	0,95609458	5062,67066	1771,93473	0,01190849
	13:30	14,9	19,6	0,95450007	4978,09715	1692,55303	0,01136709
	14:00	14,4	19,3	0,95414174	4978,09715	1642,77206	0,01102862
	14:30	13,5	18,7	0,95337447	4978,09715	1543,21012	0,01035189
	15:00	12,6	18,2	0,95300132	5006,15106	1451,78381	0,00973163
	15:30	12,4	18,2	0,95454602	5148,48792	1441,57662	0,00966319
	16:00	11,4	17,7	0,95397676	5177,37268	1346,1169	0,009015
	16:30	11,7	17,9	0,95568032	5294,32191	1376,5237	0,00922314
	17:00	11,8	18,0	0,95622332	5323,91462	1384,2178	0,00927696
	17:30	12,1	18,1	0,95759809	5413,55489	1407,52427	0,00943757
	18:00	12,6	18,4	0,95797053	5383,53053	1453,55324	0,00975314
	18:30	13,2	18,7	0,95907938	5413,55489	1515,79537	0,01017925
	19:00	12,2	18,2	0,95850524	5443,7243	1415,36832	0,00949608
	19:30	11,0	17,6	0,95738087	5443,7243	1306,49383	0,00875533
	20:00	9,8	17,1	0,95701468	5504,50058	1210,99013	0,00810698
	20:30	9,7	17,0	0,9564823	5474,03934	1204,28865	0,00806024
	21:00	9,4	16,9	0,95482049	5353,65063	1177,80314	0,00787945
	21:30	10,8	17,4	0,95406126	5177,37268	1294,34317	0,00866903
	22:00	10,3	17,1	0,95166548	5006,15106	1251,53776	0,00837758
	22:30	10,5	17,1	0,94980338	4867,24117	1265,4827	0,00846809
	23:00	10,7	17,2	0,94830608	4758,53423	1284,80424	0,00859501
	23:30	14,9	19,5	0,95161877	4704,97574	1693,79127	0,01137802
04-jul	0:00	15,1	19,6	0,95061363	4625,61958	1711,47924	0,01149593
	0:30	15,1	19,5	0,94898142	4495,94122	1708,45767	0,01147464
	1:00	15,7	19,8	0,94781541	4344,50618	1781,24754	0,01197229
	1:30	14,9	19,3	0,9451148	4221,71664	1688,68666	0,01133637
	2:00	15,6	19,6	0,94412772	4101,95569	1763,84095	0,01184794
	2:30	15,3	19,4	0,94174849	3939,25912	1733,27401	0,01164003
	3:00	14,7	18,9	0,93928664	3804,3037	1673,89363	0,01123405
	3:30	14	18,4	0,93728146	3716,58576	1598,13188	0,01071683
	4:00	14	18,3	0,93603693	3630,63426	1597,47907	0,01071238
	4:30	13,7	18,0	0,93357353	3484,37984	1567,97093	0,01051116
	5:00	13,4	17,7	0,93196874	3403,13294	1531,40983	0,01026202
	5:30	13,5	17,8	0,93150708	3363,13238	1547,0409	0,01036851
	6:00	13,2	17,5	0,93000069	3284,3592	1510,80523	0,01012279
	6:30	12,8	17,2	0,928415	3207,19976	1475,31189	0,0098812
	7:00	12,9	17,2	0,92793887	3169,21647	1489,53174	0,00997797
	7:30	13,3	17,4	0,9282557	3169,21647	1521,2239	0,01019374
	8:00	12,7	17,0	0,92674757	3112,97736	1463,09936	0,00979811
	8:30	13	17,7	0,93420996	3567,31184	1498,27097	0,01003745
	9:00	12,6	17,7	0,93905403	3939,25912	1457,52587	0,0097602
	9:30	13,2	18,3	0,94455177	4319,70294	1511,89603	0,01013022
	10:00	13,1	18,3	0,94722012	4547,42846	1500,65139	0,01005366
	10:30	13,3	18,6	0,95180816	4922,39833	1525,94348	0,01022589

04-jul	11:00	12,8	18,5	0,95508959	5264,87194	1474,16414	0,00987445
	11:30	12,6	18,4	0,95430304	5206,39789	1457,79141	0,00976306
	12:00	12,8	18,6	0,95729302	5474,03934	1477,99062	0,00990049
	12:30	12,8	18,6	0,95729302	5474,03934	1477,99062	0,00990049
	13:00	12,1	18,1	0,95415814	5235,56412	1413,60231	0,00946262

Condiciones de contorno: Valores derivados: ph_{ex} , Ws_{ex} , h_{ex} .

Día	Hora	Densidad aire húmedo exterior	Humedad de saturación	Entalpía
		ph_{ex} (kg/m ³)	Ws_{ex} (kgw/kgas)	h_{ex} (kJ/kg)
30-jun con Rep. ↓	0:00	1,057884	0,0349881	53,7158367
	0:30	1,05912138	0,03396424	55,1659673
	1:00	1,06056858	0,03335959	53,6402745
	1:30	1,06062651	0,03316522	54,2462359
	2:00	1,06144201	0,03258106	54,379843
	2:30	1,06284018	0,03181577	53,4617451
	3:00	1,06431283	0,03088506	53,1035455
	3:30	1,06640645	0,02979333	52,481326
	4:00	1,06786453	0,02908214	52,2915434
	4:30	1,06928079	0,02839294	51,3703529
	5:00	1,07090883	0,02755177	50,9253201
	5:30	1,07294568	0,02672756	49,7796864
	6:00	1,07338302	0,02640544	50,6553362
	6:30	1,07577429	0,02545465	49,9022957
	7:00	1,07814014	0,02453263	49,7449639
	7:30	1,07860683	0,02437792	50,1191703
	8:00	1,07781999	0,02482278	50,2099394
	8:30	1,07066487	0,02802127	53,0024132
	9:00	1,06232895	0,03235828	55,7491713
	9:30	1,05857384	0,03454801	56,7081434
	10:00	1,05551702	0,03643686	57,9694383
	10:30	1,05111914	0,03934166	59,1852134
	11:00	1,05074727	0,03957383	59,4231232
	11:30	1,05037548	0,03980727	59,6617264
	12:00	1,04569513	0,04321381	60,9361293
	12:30	1,04569513	0,04321381	60,9361293
	13:00	1,04705598	0,04221842	59,9969552
	13:30	1,04893107	0,04077244	58,6116106
	14:00	1,05018217	0,0398343	57,7007866
	14:30	1,05001827	0,03964105	55,5325518
	15:00	1,04928586	0,04011007	55,9654367

30-jun	15:30	1,04855386	0,04058426	56,4006522
	16:00	1,04778825	0,04062573	55,4176698
	16:30	1,04837704	0,04037856	55,2011347
	17:00	1,04627512	0,04113841	55,8590635
	17:30	1,0454359	0,04211034	54,6427714
	18:00	1,04447029	0,04265049	51,9312949
	18:30	1,04388033	0,04266509	52,9816565
	19:00	1,04400817	0,04218238	53,6360731
	19:30	1,04461764	0,04193576	52,4084384
	20:00	1,04404326	0,04243519	51,7555881
	20:30	1,04511841	0,04193576	50,353638
	21:00	1,04687678	0,04071355	50,4507157
	21:30	1,04853954	0,03952929	50,5040162
	22:00	1,05138323	0,03814726	47,5075432
	22:30	1,0523864	0,03704973	48,4665607
	23:00	1,05480442	0,03572457	50,0091593
	23:30	1,0572271	0,0346452	50,7365802
01-jul	0:00	1,05833882	0,03363418	52,2354741
	0:30	1,06037116	0,0328311	50,5551275
	1:00	1,06268604	0,03185139	49,5128073
	1:30	1,06406303	0,03110183	48,6969795
	2:00	1,06506511	0,03036856	49,4033851
	2:30	1,06656751	0,02964793	48,5669232
	3:00	1,06751425	0,02911782	48,6725661
	3:30	1,06902378	0,02842458	47,8344967
	4:00	1,07085525	0,02757629	47,4872618
	4:30	1,07123448	0,02741006	47,2778285
	5:00	1,07258459	0,02675429	47,1155548
	5:30	1,07410817	0,02611294	46,2765115
	6:00	1,0756336	0,0254857	45,4466009
	6:30	1,07739136	0,02486677	44,6219382
	7:00	1,07915166	0,02426165	43,8062556
	7:30	1,08003278	0,02396417	43,4017292
	8:00	1,07976526	0,02410849	43,6010162
	8:30	1,06993887	0,02839926	47,8187694
	9:00	1,06253791	0,03220893	50,7128969
	9:30	1,05748987	0,03521211	52,1949676
	10:00	1,05388252	0,03757194	53,6024733
	10:30	1,04911475	0,04056126	56,3894482
	11:00	1,04984711	0,04008735	55,9543604
	11:30	1,04849789	0,03990204	57,7370682
	12:00	1,04803394	0,04080944	58,6313872
	12:30	1,04666728	0,04085577	59,6686626
	13:00	1,05063677	0,03893831	57,7777485

01-jul	13:30	1,052748	0,0375889	56,4070634
	14:00	1,05363555	0,03693689	55,7338424
	14:30	1,0539266	0,03651905	55,2942827
	15:00	1,05336245	0,03653965	55,3058903
	15:30	1,05236304	0,03720623	54,1409407
	16:00	1,05202488	0,03721884	54,147432
	16:30	1,05165826	0,03744787	53,4396869
	17:00	1,05058722	0,03790562	53,8679576
	17:30	1,04919694	0,03882592	52,8078594
	18:00	1,04950537	0,03884134	49,9444497
	18:30	1,04898758	0,03908641	49,1765331
	19:00	1,04835883	0,03910195	50,1425901
	19:30	1,04943705	0,0384165	49,583744
	20:00	1,04835883	0,03910195	50,1425901
	20:30	1,04989371	0,03840779	48,6363951
	21:00	1,05299158	0,03662644	47,2043478
	21:30	1,05457421	0,03533728	49,6334957
	22:00	1,0568423	0,03409046	49,3121483
	22:30	1,05904387	0,03307194	49,1446711
	23:00	1,06071934	0,03246721	48,5398503
	23:30	1,06240119	0,03168818	48,5338795
02-jul	0:00	1,0640944	0,03092651	48,4995276
con Rep ↑	0:30	1,06537155	0,03054781	47,3289788
sin Rep. ↓	1:00	1,06720379	0,02981328	46,538513
	1:30	1,06937043	0,02874845	46,8040985
	2:00	1,07139243	0,02771877	47,6813111
	2:30	1,07362166	0,02672311	47,7641695
	3:00	1,07543777	0,02607531	46,9046353
	3:30	1,07723227	0,02560428	43,7062699
	4:00	1,0783108	0,0252946	42,0534309
	4:30	1,07993836	0,02468277	41,3093428
	5:00	1,08065616	0,02438062	41,5481599
	5:30	1,08160891	0,02407654	41,7712385
	6:00	1,08226363	0,02377595	43,1727494
	6:30	1,08371133	0,02305603	44,4922481
	7:00	1,08484612	0,02263269	44,4272894
	7:30	1,0858185	0,02221401	45,4645062
	8:00	1,08448401	0,02276214	46,3527701
	8:30	1,0763474	0,02618472	49,7130432
	9:00	1,07415838	0,02730982	50,6368586
	9:30	1,07214047	0,02831417	51,3117282

	10:00	1,06405319	0,03249737	54,3241696
	10:30	1,06076591	0,03448031	55,8022331
	11:00	1,0608849	0,0346759	55,1643795
	11:30	1,06111115	0,03466813	55,1596121
	12:00	1,05967831	0,0357032	55,4161845
	12:30	1,06042681	0,03528262	54,9642937
	13:00	1,06342468	0,03364585	53,1819296
	13:30	1,06443711	0,03305411	52,5259216
	14:00	1,06620179	0,0320868	51,4430578
	14:30	1,06629362	0,03190468	51,2331069
	15:00	1,06603106	0,0321047	49,8544412
	15:30	1,06546337	0,03211008	51,4568542
	16:00	1,06477224	0,03269538	49,6685019
	16:30	1,0641406	0,03289267	50,6904924
	17:00	1,06317168	0,03348744	50,4869951
	17:30	1,06305833	0,03349118	50,488938
	18:00	1,06253258	0,03349493	52,1565529
	18:30	1,06267952	0,0333036	51,9460892
	19:00	1,0620792	0,03350993	52,1650546
	19:30	1,06175965	0,03351368	53,0017646
	20:00	1,06239557	0,03312069	52,565307
	20:30	1,06254288	0,03312254	51,7414162
	21:00	1,06303175	0,03273195	52,1312237
	21:30	1,06429877	0,03215314	50,6811887
	22:00	1,06497386	0,03158379	51,6267911
	22:30	1,06601164	0,03119954	51,1853459
	23:00	1,06723711	0,03063557	51,2959152
02-jul	23:30	1,06860669	0,02990273	51,9126902
03-jul	0:00	1,07014939	0,02953912	49,2396768
	0:30	1,07143031	0,02865588	51,7702706
	1:00	1,07332563	0,02762968	53,1728828
	1:30	1,07492901	0,02680664	53,3180624
	2:00	1,07688133	0,02600613	52,089475
	2:30	1,07925883	0,02491942	52,287628
	3:00	1,08040062	0,024465	52,1574281
	3:30	1,08154844	0,02401818	52,0122022
	4:00	1,08309942	0,02343489	51,5988135
	4:30	1,08439056	0,02273585	51,5056272
	5:00	1,0854396	0,02219203	51,0600138
	5:30	1,0870753	0,02164815	50,586657
	6:00	1,08817984	0,02124737	50,896986
	6:30	1,08914129	0,02098051	50,9041763
	7:00	1,09024553	0,02058877	51,6874969
	7:30	1,09149502	0,02020373	51,9067202
	8:00	1,08961094	0,02083395	53,8081688

03-jul	8:30	1,08256244	0,02341685	56,9390848
	9:00	1,07605199	0,02612978	59,5888278
	9:30	1,07064251	0,02861299	61,1294499
	10:00	1,06772999	0,0300259	61,9363047
	10:30	1,06516403	0,03131161	63,1675725
	11:00	1,06145924	0,03343507	63,8589574
	11:30	1,06034719	0,03403499	64,7135876
	12:00	1,0596248	0,03443981	65,2875537
	12:30	1,05716935	0,03590517	65,5276704
	13:00	1,05837698	0,03527867	63,7932192
	13:30	1,05957781	0,03466231	62,0988724
	14:00	1,059621	0,03466813	61,2323252
	14:30	1,05976395	0,03467784	59,4997518
	15:00	1,05952805	0,034894	58,014112
	15:30	1,05774176	0,03594749	58,3505935
	16:00	1,05769348	0,03616495	56,7926221
	16:30	1,05602587	0,03703675	57,7348373
	17:00	1,05548248	0,03726245	57,9750111
	17:30	1,0541349	0,03793666	58,6934453
	18:00	1,05405449	0,037722	59,3998638
	18:30	1,05328013	0,03795162	60,594327
	19:00	1,05319829	0,03818256	58,9457319
	19:30	1,05366147	0,03818256	57,0471207
	20:00	1,05338717	0,03863533	55,5894665
	20:30	1,05392461	0,03840183	55,3675811
	21:00	1,05556957	0,03750001	54,4960946
	21:30	1,05723718	0,03618934	55,9064496
	22:00	1,05959247	0,03492139	54,5472152
	22:30	1,06176512	0,03388251	54,2683254
	23:00	1,06357539	0,03306888	54,1845624
03-jul	23:30	1,06279746	0,03266801	61,1003058
04-jul	0:00	1,06404526	0,03207964	61,0939438
	0:30	1,06585294	0,03113354	60,5261316
	1:00	1,06768921	0,03003258	61,1820287
	1:30	1,07006722	0,02913752	59,0434729
	2:00	1,07172782	0,02826711	59,8368341
	2:30	1,07421466	0,0271001	58,5869176
	3:00	1,07659793	0,02613267	56,9347652
	3:30	1,07834932	0,02550541	55,204819
	4:00	1,07977832	0,02489195	54,7833251
	4:30	1,08241197	0,02385077	53,5526781
	5:00	1,08400849	0,02327382	52,5078147
	5:30	1,08466005	0,02299014	52,5742401
	6:00	1,08614549	0,0224347	51,538457
	6:30	1,08774761	0,02188909	50,5135356

04-jul	7:00	1,08841003	0,02162084	50,5551524
	7:30	1,08827098	0,02162084	51,1045465
	8:00	1,08961507	0,02122408	49,7901195
	8:30	1,0811675	0,02444344	52,7548477
	9:00	1,07529511	0,0271031	53,7880842
	9:30	1,06942812	0,02984626	56,3715165
	10:00	1,06633467	0,03149937	57,097583
	10:30	1,06137553	0,03423972	58,9722728
	11:00	1,05736097	0,03676686	59,3012382
	11:30	1,05811573	0,03633466	58,8111274
	12:00	1,05495441	0,03831755	60,0846597
	12:30	1,05495441	0,03831755	60,0846597
	13:00	1,05796155	0,03655016	58,1438042

Prototipo P1: Toma de datos: $\varnothing$ Alveolo, H.R., td.

Día	Hora	P1 Tª Alveolo (°C)	P1 H.R. (%)	P1 td (°C)
30-jun Con reposición. ↓	0:00	22,8	76	18,4
	0:30	22,9	76	18,5
	1:00	22,5	78	18,5
	1:30	22,4	77	18,2
	2:00	22,2	79	18,4
	2:30	22,1	80	18,5
	3:00	21,9	80	18,3
	3:30	21,7	80	18,1
	4:00	21,6	81	18,2
	4:30	21,5	81	18,1
	5:00	21,2	83	18,2
	5:30	21,1	83	18,1
	6:00	20,9	84	18,1
	6:30	20,8	84	18
	7:00	20,6	85	18
	7:30	20,4	86	18
	8:00	20,4	86	18
	8:30	20,8	84	18
	9:00	21,4	82	18,2
	9:30	21,7	81	18,3
	10:00	22,2	80	18,6
	10:30	22,6	81	19,2
	11:00	22,9	80	19,3
	11:30	23,2	80	19,6
	12:00	23,6	78	19,6
	12:30	23,8	78	19,8

30-jun	13:00	23,7	78	19,7
	13:30	23,9	76	19,4
	14:00	23,7	76	19,2
	14:30	23,8	74	18,9
	15:00	23,8	75	19,1
	15:30	23,6	75	18,9
	16:00	23,8	74	18,9
	16:30	23,8	72	18,5
	17:00	23,9	72	18,6
	17:30	23,7	72	18,4
	18:00	23,6	70	17,8
	18:30	23,7	70	17,9
	19:00	23,9	69	17,9
	19:30	23,6	70	17,8
	20:00	24	67	17,5
	20:30	23,7	66	17
	21:00	23,2	66	16,5
	21:30	23	68	16,8
	22:00	22,7	66	16
	22:30	22,3	69	16,4
	23:00	22,1	70	16,4
	23:30	21,8	71	16,3
01-jul	0:00	21,9	72	16,6
	0:30	21,6	74	16,8
	1:00	21,2	76	16,8
	1:30	21,2	75	16,6
	2:00	21	76	16,6
	2:30	20,7	77	16,5
	3:00	20,6	77	16,5
	3:30	20,4	77	16,3
	4:00	20,1	80	16,6
	4:30	20,1	79	16,4
	5:00	19,9	80	16,4
	5:30	19,7	81	16,4
	6:00	19,6	82	16,5
	6:30	19,4	83	16,5
	7:00	19,1	83	16,2
	7:30	18,8	83	15,9
	8:00	18,8	83	15,9
	8:30	19,3	81	16
	9:00	19,9	80	16,4
	9:30	20,4	79	16,7
	10:00	20,9	78	16,9
	10:30	21,4	78	17,4
	11:00	21,9	77	17,7

01-jul	11:30	22,2	78	18,2
	12:00	22,6	79	18,8
	12:30	22,9	77	18,7
	13:00	22,7	78	18,7
	13:30	23	77	18,8
	14:00	22,8	78	18,8
	14:30	23,1	75	18,5
	15:00	23	75	18,4
	15:30	22,8	76	18,4
	16:00	22,9	75	18,3
	16:30	23,1	74	18,2
	17:00	22,8	75	18,2
	17:30	23,2	72	17,9
	18:00	23	71	17,5
	18:30	23,1	69	17,1
	19:00	22,8	69	16,8
	19:30	22,8	70	17,1
	20:00	22,8	68	16,6
	20:30	22,5	69	16,6
	21:00	22,1	70	16,4
	21:30	21,9	70	16,2
	22:00	21,7	72	16,5
	22:30	21,5	73	16,5
	23:00	21,5	73	16,5
	23:30	21,2	74	16,4
02-jul	0:00	21,1	74	16,3
Con reposición ↑				
	0:30	20,9	74	16,1
Sin reposición ↓				
	1:00	20,7	74	15,9
	1:30	20,4	77	16,3
	2:00	20	80	16,5
	2:30	19,9	80	16,4
	3:00	19,7	80	16,2
	3:30	19,4	79	15,7
	4:00	19,2	76	14,9
	4:30	18,8	76	14,5
	5:00	18,4	78	14,5
	5:30	18,3	79	14,6
	6:00	18,2	80	14,7
	6:30	18	82	14,9
	7:00	18	82	14,9
	7:30	18	83	15,1

02-jul	8:00	18,2	83	15,3
	8:30	18,8	81	15,5
	9:00	19	82	15,9
	9:30	19,2	81	15,9
	10:00	19,8	80	16,3
	10:30	20,3	78	16,4
	11:00	20,7	78	16,8
	11:30	21,1	77	16,9
	12:00	21,2	77	17
	12:30	21,4	77	17,2
	13:00	21,4	77	17,2
	13:30	21,4	77	17,2
	14:00	21,4	77	17,2
	14:30	21,4	76	17
	15:00	21,4	75	16,8
	15:30	21,3	77	17,1
	16:00	21,5	74	16,7
	16:30	21,3	76	16,9
	17:00	21,6	73	16,6
	17:30	21,6	73	16,6
	18:00	21,6	74	16,8
	18:30	21,3	75	16,7
	19:00	21,9	72	16,6
	19:30	21,6	74	16,8
	20:00	21,6	75	17
	20:30	21,8	74	17
	21:00	21,6	76	17,2
	21:30	21,7	76	17,3
	22:00	21,6	76	17,2
	22:30	21,5	77	17,3
	23:00	21,3	78	17,3
	23:30	21,4	77	17,2
03-jul	0:00	21,1	80	17,5
	0:30	21	81	17,6
	1:00	21,1	81	17,7
	1:30	20,8	83	17,8
	2:00	20,8	84	18
	2:30	20,7	84	17,9
	3:00	20,6	84	17,8
	3:30	20,5	85	17,9
	4:00	20,4	86	18
	4:30	20,2	86	17,8
	5:00	20,1	86	17,7
	5:30	20	87	17,8
	6:00	19,9	88	17,9

03-jul	6:30	19,9	88	17,9
	7:00	19,8	88	17,8
	7:30	19,8	88	17,8
	8:00	19,8	89	18
	8:30	20,2	89	18,4
	9:00	20,8	88	18,8
	9:30	21,4	88	19,4
	10:00	21,9	87	19,7
	10:30	22,4	87	20,2
	11:00	23	87	20,7
	11:30	23,2	87	20,9
	12:00	23,4	86	21
	12:30	23,8	85	21,2
	13:00	23,9	85	21,3
	13:30	23,9	84	21,1
	14:00	23,9	82	20,7
	14:30	23,9	81	20,5
	15:00	23,7	79	19,9
	15:30	23,8	80	20,2
	16:00	24	76	19,5
	16:30	23,6	78	19,6
	17:00	23,8	76	19,3
	17:30	23,7	77	19,5
	18:00	23,7	78	19,7
	18:30	23,7	79	19,9
	19:00	24	77	19,7
	19:30	24,1	75	19,4
	20:00	24,1	73	19
	20:30	23,7	72	18,4
	21:00	23,4	73	18,3
	21:30	23,1	75	18,5
	22:00	23	76	18,6
	22:30	22,8	77	18,6
	23:00	22,7	77	18,5
03-jul	23:30	22,6	80	19
04-jul	0:00	22,8	82	19,6
	0:30	22,9	83	19,9
	1:00	22,9	84	20,1
	1:30	22,8	85	20,2
	2:00	22,7	84	19,9
	2:30	22,5	85	19,9
	3:00	22,3	86	19,9
	3:30	22,1	86	19,7
	4:00	21,9	87	19,7
	4:30	21,7	87	19,5

04-jul	5:00	21,4	88	19,4
	5:30	21,2	88	19,2
	6:00	21	89	19,1
	6:30	20,8	89	18,9
	7:00	20,6	88	18,6
	7:30	20,5	88	18,5
	8:00	20,3	87	18,1
	8:30	20,4	87	18,2
	9:00	20,9	86	18,5
	9:30	21,3	85	18,7
	10:00	21,8	84	19
	10:30	22,3	83	19,3
	11:00	22,8	83	19,8
	11:30	23	83	20
	12:00	23,3	82	20,1
	12:30	23,5	82	20,3
	13:00	23,5	81	20,1

Prototipo P1: Toma de datos: Tª del agua de los 4 depósitos, ΔT de la media de la Tª de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, Tª superficie frontal, consumo de agua.

Día	Hora	Tª Depósitos (°C)					gradiente térmico Agua- aire	Consumo instantáneo P1 (kg H ² O/sm ²)
		1 C	1 A	1 B	1 D	P1 Tª Media AB	ΔT P1 (Sombreado)	
30-jun con Rep. ↓	0:00	23,9	21,4	21,4	23,6	21,4	11,5	28
	6:00							26,2
	7:30	20,2	18,6	19,4	20,5	19	7,9	7,41E-05
	11:00	24,3	21,6	21,7	23,7	21,65	13,35	6,44E-05
	13:00	25,5	23,1	22,7	25,2	22,9	13,2	9,64E-05
	16:00	25,2	22,4	22,3	24,7	22,35	13,05	1,45E-04
	19:00	25,2	22	22	24,7	22	14	1,55E-04
30-jun	23:00	24,1	20,7	20,6	23,4	20,65	12,55	1,85E-04
01-jul	6:00							26,2
	7:30	20,3	18,5	18,6	19,7	18,55	8,05	1,03E-04
	11:00	23,7	20,6	20,9	23	20,75	14,45	7,84E-05
	13:00	24,8	21,8	21,9	24	21,85	12,85	9,40E-05
	16:00	24,6	21,7	21,4	23,6	21,55	12,35	1,27E-04
01-jul	19:00	24,7	21,5	21,2	24,1	21,35	13,35	1,74E-04
02-jul con Rep ↑	0:30	22,7	20,2	19,8	22,1	20	10,6	1,42E-04
sin Rep. ↓	7:30	19,6	17,7	17,5	18,9	17,6	7,8	1,35E-04
	11:00							1,03E-04

	13:00							29,3	1,07E-04
	16:00							29,2	9,68E-05
	19:00							30	1,13E-04
03-jul	0:00							28,2	1,32E-04
	7:30							23	6,19E-05
	11:00							29,7	5,42E-05
	13:00							30,8	1,11E-04
	16:00							30,6	1,02E-04
03-jul	19:00							31,7	7,84E-05
	23:00							30,1	9,97E-05
04-jul	7:30							23,8	3,06E-05
	11:30							31,2	6,25E-06
	13:00							31,5	1,54E-05

Prototipo P1: Evaporación en los depósitos (acumulada y por intervalo), potencia equivalente.

Día	Hora	Evaporación Acumulada (ml H ² O)	Evaporación por intervalo de tiempo (ml H ² O)	P1 P (W/m ²)
30-jun con Rep. ↓	0:00	0	0	
	7:30	363	363	179,72
	11:00	501	138	156,17
	13:00	619	118	233,69
	16:00	885	266	351,19
	19:00	1169	284	374,95
	23:00	1622	453	448,56
01-jul	7:30	2127	505	250,02
	11:00	2295	168	190,12
	13:00	2410	115	227,75
	16:00	2643	233	307,62
	19:00	2963	320	422,48
02-jul con Rep. ↑ sin Rep. ↓	0:30	3441	478	344,23
	7:30	4021	580	328,29
	11:00	4242	221	249,87
	13:00	4374	132	260,42
	16:00	4551	178	234,61
	19:00	4758	207	273,43
03-jul	0:00	5163	404	320,27
	7:30	5447	284	149,98
	11:00	5563	116	131,27

	13:00	5698	136	268,94
	16:00	5885	187	246,36
	19:00	6029	144	190,12
	23:00	6273	244	241,61
04-jul	7:30	6432	159	74,14
	11:30	6447	15	15,15
	13:00	6446	14	37,23

Prototipo P1: Valores derivados: t^*_{P1} , $\Delta T A_{ex-P1}$, V_{P1} , Pws_{P1} , Pw_{P1} , W_{P1} .

Día	Hora	Bulbo húmedo	Gradiente T aire-aire	Volumen específico	Presión de saturación	Presión de vapor	Ratio de humedad
		t^*_{P1} (°C)	$\Delta T A_{ex-P1}$ (°C)	V_{P1} (m³/kgas)	Pws_{P1} (Pa)	Pw_{P1} (Pa)	W_{P1} (kgw/kgas)
30-jun con Rep. ↓	0:00	20,7	10,1	0,9308	2777	2110	0,0143
	0:30	20,8	9,5	0,9312	2793	2123	0,0144
	1:00	20,8	9,6	0,9299	2726	2127	0,0144
	1:30	20,5	9,6	0,9293	2710	2087	0,0141
	2:00	20,6	9,5	0,9290	2677	2115	0,0143
	2:30	20,7	9,2	0,9290	2661	2129	0,0144
	3:00	20,5	8,9	0,9283	2629	2103	0,0142
	3:30	20,3	8,5	0,9274	2597	2077	0,0141
	4:00	20,4	8,2	0,9271	2581	2091	0,0142
	4:30	20,3	7,9	0,9268	2565	2078	0,0141
	5:00	20,3	7,7	0,9261	2518	2090	0,0142
	5:30	20,2	7,3	0,9255	2503	2077	0,0141
	6:00	20,1	7,3	0,9249	2472	2077	0,0141
	6:30	20,0	6,8	0,9243	2457	2064	0,0140
	7:00	20,0	6,4	0,9233	2427	2063	0,0140
	7:30	19,9	6,5	0,9225	2397	2062	0,0139
	8:00	19,9	6,8	0,9223	2397	2062	0,0139
	8:30	20,0	8,4	0,9235	2457	2064	0,0140
	9:00	20,3	10,2	0,9255	2549	2091	0,0141
	9:30	20,5	11,0	0,9266	2597	2103	0,0142
	10:00	20,8	11,4	0,9284	2677	2142	0,0145
	10:30	21,4	12,3	0,9305	2743	2222	0,0150
	11:00	21,5	12,1	0,9315	2793	2235	0,0151
	11:30	21,8	11,9	0,9329	2845	2276	0,0154
	12:00	21,9	12,9	0,9341	2914	2273	0,0154
	12:30	22,1	12,7	0,9350	2949	2301	0,0156
	13:00	22,0	12,4	0,9347	2932	2287	0,0155
	13:30	21,8	11,6	0,9353	2967	2255	0,0153
	14:00	21,6	11,4	0,9346	2932	2228	0,0151
	14:30	21,4	11,2	0,9353	2949	2183	0,0148

30-jun	15:00	21,5	11,4	0,9356	2949	2212	0,0150
	15:30	21,3	11,8	0,9347	2914	2186	0,0148
	16:00	21,4	11,6	0,9363	2949	2183	0,0148
	16:30	21,0	11,5	0,9355	2949	2124	0,0144
	17:00	21,1	11,7	0,9368	2967	2136	0,0145
	17:30	20,9	12,3	0,9358	2932	2111	0,0143
	18:00	20,4	12,6	0,9357	2914	2040	0,0138
	18:30	20,5	12,5	0,9365	2932	2052	0,0139
	19:00	20,5	12,1	0,9373	2967	2047	0,0139
	19:30	20,4	12,3	0,9363	2914	2040	0,0139
	20:00	20,3	12,1	0,9373	2985	2000	0,0136
	20:30	19,8	12,2	0,9356	2932	1935	0,0131
	21:00	19,3	12,2	0,9332	2845	1877	0,0127
	21:30	19,5	11,9	0,9328	2810	1911	0,0130
	22:00	18,9	11,6	0,9308	2760	1821	0,0123
	22:30	19,0	11,5	0,9302	2694	1859	0,0126
	23:00	19,0	11,1	0,9288	2661	1863	0,0126
	23:30	18,9	10,9	0,9269	2613	1855	0,0125
01-jul	0:00	19,2	10,3	0,9277	2629	1893	0,0128
	0:30	19,2	10,2	0,9266	2581	1910	0,0129
	1:00	19,1	10,1	0,9250	2518	1914	0,0129
	1:30	19,0	9,7	0,9248	2518	1889	0,0128
	2:00	18,9	9,5	0,9243	2488	1891	0,0128
	2:30	18,8	9,4	0,9233	2442	1880	0,0127
	3:00	18,7	9,2	0,9229	2427	1869	0,0126
	3:30	18,5	9,0	0,9220	2397	1846	0,0125
	4:00	18,7	8,8	0,9214	2353	1883	0,0127
	4:30	18,5	8,7	0,9211	2353	1859	0,0126
	5:00	18,5	8,5	0,9205	2324	1859	0,0126
	5:30	18,4	8,3	0,9199	2296	1860	0,0126
	6:00	18,5	8,0	0,9197	2281	1871	0,0126
	6:30	18,4	7,8	0,9188	2253	1870	0,0126
	7:00	18,1	7,7	0,9174	2212	1836	0,0124
	7:30	17,8	7,8	0,9160	2171	1802	0,0122
	8:00	17,8	7,9	0,9159	2171	1802	0,0122
	8:30	18,0	10,1	0,9175	2239	1814	0,0122
	9:00	18,5	11,6	0,9197	2324	1859	0,0126
	9:30	18,8	12,6	0,9215	2397	1894	0,0128
	10:00	19,2	13,2	0,9232	2472	1928	0,0130
	10:30	19,7	14,0	0,9254	2549	1989	0,0134
	11:00	20,0	13,3	0,9273	2629	2024	0,0137
	11:30	20,5	12,9	0,9300	2677	2088	0,0142
	12:00	21,0	12,9	0,9311	2743	2167	0,0147
	12:30	21,0	12,6	0,9329	2793	2151	0,0146
	13:00	21,0	12,0	0,9314	2760	2153	0,0146

01-jul	13:30	21,1	11,1	0,9325	2810	2164	0,0147
	14:00	21,1	11,0	0,9321	2777	2166	0,0147
	14:30	20,8	10,5	0,9330	2827	2121	0,0144
	15:00	20,7	10,6	0,9331	2810	2108	0,0143
	15:30	20,7	11,1	0,9328	2777	2110	0,0143
	16:00	20,7	11,0	0,9333	2793	2095	0,0142
	16:30	20,7	10,9	0,9341	2827	2092	0,0142
	17:00	20,6	11,4	0,9333	2777	2082	0,0141
	17:30	20,4	11,4	0,9346	2845	2048	0,0139
	18:00	20,0	11,6	0,9338	2810	1995	0,0135
	18:30	19,8	11,6	0,9340	2827	1951	0,0132
	19:00	19,5	11,9	0,9331	2777	1916	0,0130
	19:30	19,7	11,6	0,9333	2777	1944	0,0132
	20:00	19,3	11,9	0,9328	2777	1888	0,0128
	20:30	19,2	11,9	0,9316	2726	1881	0,0128
	21:00	19,0	11,5	0,9299	2661	1863	0,0126
	21:30	18,8	11,1	0,9288	2629	1840	0,0125
	22:00	19,0	10,7	0,9282	2597	1870	0,0127
	22:30	18,9	10,4	0,9271	2565	1873	0,0127
	23:00	18,9	10,1	0,9266	2565	1873	0,0127
	23:30	18,8	10,0	0,9252	2518	1864	0,0126
02-jul	0:00	18,7	9,7	0,9245	2503	1852	0,0125
con Rep ↑	0:30	18,5	9,7	0,9233	2472	1830	0,0124
	1:00	18,3	9,5	0,9222	2442	1807	0,0122
sin Rep. ↓	1:30	18,5	9,2	0,9214	2397	1846	0,0125
	2:00	18,6	9,0	0,9201	2339	1871	0,0126
	2:30	18,5	8,5	0,9194	2324	1859	0,0126
	3:00	18,3	8,3	0,9183	2296	1837	0,0124
	3:30	17,8	8,3	0,9169	2253	1780	0,0120
	4:00	17,2	8,3	0,9153	2225	1691	0,0114
	4:30	16,8	8,3	0,9136	2171	1650	0,0111
	5:00	16,7	8,5	0,9123	2117	1651	0,0111
	5:30	16,7	8,4	0,9118	2104	1662	0,0112
	6:00	16,8	8,3	0,9113	2090	1672	0,0113
	6:30	16,8	8,0	0,9107	2064	1693	0,0114
	7:00	16,8	7,7	0,9106	2064	1693	0,0114
	7:30	17,0	7,4	0,9107	2064	1713	0,0115
	8:00	17,2	7,6	0,9113	2090	1735	0,0117
	8:30	17,5	9,3	0,9131	2171	1758	0,0118
	9:00	17,9	9,8	0,9138	2198	1802	0,0121
	9:30	17,9	10,2	0,9144	2225	1803	0,0121
	10:00	18,4	11,9	0,9166	2310	1848	0,0124
	10:30	18,6	12,4	0,9180	2383	1858	0,0125

02-jul	11:00	19,0	12,1	0,9195	2442	1905	0,0128
	11:30	19,2	11,7	0,9207	2503	1927	0,0130
	12:00	19,3	12,1	0,9209	2518	1939	0,0131
	12:30	19,5	11,7	0,9218	2549	1963	0,0132
	13:00	19,5	10,9	0,9218	2549	1963	0,0132
	13:30	19,5	10,6	0,9219	2549	1963	0,0132
	14:00	19,5	10,1	0,9220	2549	1963	0,0132
	14:30	19,3	10,0	0,9220	2549	1938	0,0131
	15:00	19,2	10,1	0,9220	2549	1912	0,0129
	15:30	19,4	10,2	0,9222	2534	1951	0,0132
	16:00	19,1	10,3	0,9225	2565	1898	0,0128
	16:30	19,2	10,6	0,9222	2534	1926	0,0130
	17:00	19,0	10,6	0,9227	2581	1884	0,0127
	17:30	19,0	10,6	0,9228	2581	1884	0,0127
	18:00	19,2	10,6	0,9232	2581	1910	0,0129
	18:30	19,1	10,8	0,9224	2534	1900	0,0128
	19:00	19,2	10,3	0,9244	2629	1893	0,0128
	19:30	19,2	10,6	0,9237	2581	1910	0,0129
	20:00	19,4	10,4	0,9241	2581	1936	0,0131
	20:30	19,4	10,2	0,9247	2613	1933	0,0130
	21:00	19,5	10,2	0,9244	2581	1961	0,0132
	21:30	19,6	9,8	0,9249	2597	1974	0,0133
	22:00	19,5	9,6	0,9245	2581	1961	0,0132
	22:30	19,6	9,5	0,9241	2565	1975	0,0133
	23:00	19,6	9,4	0,9232	2534	1976	0,0133
	23:30	19,5	8,9	0,9232	2549	1963	0,0132
03-jul	0:00	19,7	9,0	0,9225	2503	2002	0,0135
	0:30	19,7	8,6	0,9220	2488	2015	0,0136
	1:00	19,8	7,9	0,9222	2503	2027	0,0137
	1:30	19,9	7,7	0,9214	2457	2040	0,0138
	2:00	20,0	7,2	0,9216	2457	2064	0,0139
	2:30	19,9	6,6	0,9211	2442	2051	0,0138
	3:00	19,8	6,4	0,9206	2427	2039	0,0138
	3:30	19,9	6,2	0,9203	2412	2050	0,0138
	4:00	19,9	5,9	0,9200	2397	2062	0,0139
	4:30	19,7	5,6	0,9195	2368	2036	0,0137
	5:00	19,6	5,3	0,9194	2353	2024	0,0137
	5:30	19,6	5,0	0,9190	2339	2035	0,0137
	6:00	19,7	4,8	0,9187	2324	2045	0,0138
	6:30	19,7	4,6	0,9184	2324	2045	0,0138
	7:00	19,6	4,4	0,9177	2310	2033	0,0137
	7:30	19,6	4,1	0,9175	2310	2033	0,0137
	8:00	19,7	4,6	0,9175	2310	2056	0,0139
	8:30	20,2	6,1	0,9191	2368	2107	0,0142
	9:00	20,6	7,3	0,9214	2457	2162	0,0146

03-jul	9:30	21,3	8,2	0,9242	2549	2244	0,0152
	10:00	21,7	8,5	0,9263	2629	2287	0,0155
	10:30	22,2	8,7	0,9286	2710	2358	0,0159
	11:00	22,8	9,2	0,9313	2810	2445	0,0165
	11:30	23,0	9,3	0,9322	2845	2475	0,0168
	12:00	23,1	9,3	0,9328	2879	2476	0,0168
	12:30	23,3	9,6	0,9345	2949	2507	0,0170
	13:00	23,4	9,2	0,9351	2967	2522	0,0171
	13:30	23,3	8,9	0,9350	2967	2492	0,0169
	14:00	22,9	8,9	0,9345	2967	2433	0,0165
	14:30	22,7	8,9	0,9345	2967	2403	0,0163
	15:00	22,2	9,2	0,9332	2932	2316	0,0157
	15:30	22,4	9,6	0,9341	2949	2360	0,0160
	16:00	21,9	9,5	0,9339	2985	2269	0,0153
	16:30	21,9	10,3	0,9328	2914	2273	0,0154
	17:00	21,7	10,2	0,9333	2949	2242	0,0152
	17:30	21,8	10,6	0,9333	2932	2257	0,0153
	18:00	22,0	10,5	0,9338	2932	2287	0,0155
	18:30	22,2	10,6	0,9343	2932	2316	0,0157
	19:00	22,1	10,4	0,9352	2985	2299	0,0156
	19:30	21,8	10,3	0,9351	3003	2252	0,0152
	20:00	21,5	10,5	0,9344	3003	2192	0,0148
	20:30	20,9	10,8	0,9322	2932	2111	0,0143
	21:00	20,8	10,7	0,9310	2879	2102	0,0142
	21:30	20,8	10,4	0,9302	2827	2121	0,0143
	22:00	20,9	9,9	0,9299	2810	2136	0,0144
	22:30	20,9	9,6	0,9289	2777	2138	0,0144
	23:00	20,8	9,3	0,9280	2760	2125	0,0143
	23:30	21,2	9,2	0,9281	2743	2194	0,0148
04-jul	0:00	21,8	8,7	0,9293	2777	2277	0,0154
	0:30	22,0	8,1	0,9300	2793	2319	0,0157
	1:00	22,2	7,5	0,9302	2793	2347	0,0159
	1:30	22,3	7,1	0,9299	2777	2360	0,0160
	2:00	22,0	6,7	0,9289	2760	2318	0,0157
	2:30	22,0	6,2	0,9284	2726	2318	0,0157
	3:00	21,9	5,8	0,9278	2694	2316	0,0157
	3:30	21,7	5,6	0,9268	2661	2288	0,0155
	4:00	21,7	5,4	0,9262	2629	2287	0,0155
	4:30	21,4	4,9	0,9253	2597	2259	0,0153
	5:00	21,3	4,8	0,9242	2549	2244	0,0152
	5:30	21,1	4,8	0,9233	2518	2216	0,0150
	6:00	21,0	4,6	0,9228	2488	2214	0,0149
	6:30	20,8	4,4	0,9219	2457	2187	0,0148
	7:00	20,4	4,4	0,9207	2427	2136	0,0144
	7:30	20,3	4,5	0,9203	2412	2123	0,0143

	8:00	20,0	4,4	0,9192	2383	2073	0,0140
	8:30	20,1	6,6	0,9196	2397	2086	0,0141
	9:00	20,4	7,8	0,9216	2472	2126	0,0143
	9:30	20,7	9,0	0,9231	2534	2154	0,0145
	10:00	21,1	9,4	0,9251	2613	2195	0,0148
	10:30	21,4	10,3	0,9270	2694	2236	0,0151
	11:00	21,9	11,0	0,9294	2777	2305	0,0156
	11:30	22,1	10,6	0,9303	2810	2333	0,0158
	12:00	22,3	11,2	0,9314	2862	2347	0,0159
	12:30	22,5	11,0	0,9323	2897	2375	0,0161
	13:00	22,3	10,2	0,9320	2897	2346	0,0159

Prototipo P1: Valores derivados: ph P1, Ws P1, μ P1, h P1, Δh P1, Eficiencia de saturación.

Día	Hora	Densidad	Humedad de saturación	Grado de saturación	Entalpía	Δ Entalpía	Eficiencia
		ph P1 (kg/m ³)	Ws P1 (kgw/kgas)	μ P1	h P1 (kJ/kg)	Δh P1 (kJ/kg)	Esat P1
30-jun con Rep. ↓	0:00	1,089728	0,019	0,754	59,248	5,532	0,83
	0:30	1,08930571	0,019	0,754	59,577	4,411	0,82
	1:00	1,09087057	0,019	0,775	59,224	5,584	0,85
	1:30	1,09129709	0,018	0,765	58,421	4,175	0,83
	2:00	1,09178861	0,018	0,785	58,717	4,337	0,86
	2:30	1,09197774	0,018	0,795	58,860	5,398	0,87
	3:00	1,09259284	0,018	0,795	58,207	5,103	0,86
	3:30	1,09344225	0,018	0,795	57,551	5,070	0,86
	4:00	1,0938698	0,018	0,806	57,675	5,384	0,87
	4:30	1,09417773	0,017	0,806	57,352	5,981	0,86
	5:00	1,09511227	0,017	0,826	57,266	6,341	0,89
	5:30	1,09565639	0,017	0,826	56,934	7,154	0,89
	6:00	1,09639951	0,017	0,836	56,716	6,061	0,90
	6:30	1,09706209	0,017	0,836	56,382	6,479	0,90
	7:00	1,09816183	0,016	0,847	56,146	6,401	0,91
	7:30	1,09914663	0,016	0,857	55,909	5,790	0,93
	8:00	1,09938237	0,016	0,857	55,901	5,691	0,93
	8:30	1,09800378	0,017	0,836	56,351	3,348	0,91
	9:00	1,09578203	0,017	0,816	57,431	1,682	0,90
	9:30	1,09461795	0,018	0,806	57,965	1,257	0,90
	10:00	1,09272446	0,018	0,795	59,152	1,182	0,89
	10:30	1,09090192	0,019	0,805	60,976	1,791	0,91
	11:00	1,08974706	0,019	0,795	61,513	2,090	0,90
	11:30	1,08847059	0,019	0,795	62,546	2,884	0,90
	12:00	1,08702504	0,020	0,775	62,912	1,976	0,88
	12:30	1,08617652	0,020	0,774	63,605	2,669	0,88

30-jun	13:00	1,08648423	0,020	0,775	63,262	3,265	0,88
	13:30	1,08554756	0,020	0,754	62,922	4,311	0,85
	14:00	1,08615976	0,020	0,754	62,248	4,547	0,85
	14:30	1,08494827	0,020	0,734	61,584	6,052	0,82
	15:00	1,08481835	0,020	0,744	62,105	6,140	0,83
	15:30	1,0856613	0,020	0,744	61,431	5,030	0,84
	16:00	1,0838995	0,020	0,734	61,621	6,203	0,83
	16:30	1,08439241	0,020	0,714	60,571	5,370	0,80
	17:00	1,08292498	0,020	0,713	60,937	5,078	0,81
	17:30	1,08387887	0,020	0,714	60,275	5,632	0,81
	18:00	1,08350499	0,020	0,693	58,954	7,023	0,80
	18:30	1,08273842	0,020	0,693	59,287	6,305	0,80
	19:00	1,0816861	0,020	0,683	59,419	5,783	0,78
	19:30	1,08280535	0,020	0,693	58,978	6,569	0,80
	20:00	1,08141656	0,020	0,663	58,690	6,934	0,76
	20:30	1,08290547	0,020	0,653	57,229	6,876	0,76
	21:00	1,08520758	0,019	0,653	55,696	5,245	0,76
	21:30	1,08590383	0,019	0,673	56,078	5,574	0,77
	22:00	1,08762776	0,019	0,653	54,187	6,680	0,75
	22:30	1,0885749	0,018	0,684	54,437	5,970	0,78
	23:00	1,0902267	0,018	0,694	54,276	4,266	0,78
	23:30	1,09241793	0,018	0,704	53,801	3,065	0,79
01-jul	0:00	1,09176599	0,018	0,714	54,568	2,332	0,79
	0:30	1,09314541	0,018	0,735	54,551	3,996	0,81
	1:00	1,09507278	0,017	0,755	54,197	4,684	0,83
	1:30	1,09506714	0,017	0,745	53,759	5,062	0,81
	2:00	1,09568097	0,017	0,755	53,589	4,185	0,82
	2:30	1,09683725	0,017	0,765	53,102	4,535	0,83
	3:00	1,09725957	0,017	0,765	52,797	4,124	0,83
	3:30	1,09810422	0,016	0,765	52,190	4,355	0,83
	4:00	1,0991744	0,016	0,796	52,520	5,032	0,86
	4:30	1,09927936	0,016	0,786	52,108	4,830	0,85
	5:00	1,10002293	0,016	0,796	51,908	4,793	0,86
	5:30	1,10076897	0,016	0,806	51,703	5,426	0,87
	6:00	1,10109194	0,015	0,816	51,798	6,351	0,88
	6:30	1,10207876	0,015	0,827	51,575	6,953	0,89
	7:00	1,10359415	0,015	0,827	50,654	6,848	0,89
	7:30	1,1049916	0,015	0,827	49,747	6,345	0,89
	8:00	1,10511011	0,015	0,827	49,744	6,143	0,89
	8:30	1,10329681	0,015	0,806	50,469	2,651	0,89
	9:00	1,10096749	0,016	0,796	51,880	1,168	0,89
	9:30	1,09906928	0,016	0,786	52,994	0,799	0,89
	10:00	1,09729472	0,017	0,775	54,106	0,504	0,88
	10:30	1,09517764	0,017	0,775	55,675	-0,714	0,89
	11:00	1,09317699	0,018	0,765	56,813	0,858	0,88

01-jul	11:30	1,0905013	0,018	0,775	58,292	0,555	0,88
	12:00	1,08974057	0,019	0,785	60,059	1,427	0,89
	12:30	1,08754594	0,019	0,765	60,125	0,457	0,87
	13:00	1,08932144	0,019	0,775	59,912	2,134	0,87
	13:30	1,08805821	0,019	0,765	60,427	4,020	0,85
	14:00	1,08854719	0,019	0,775	60,258	4,524	0,86
	14:30	1,08718427	0,019	0,744	59,788	4,494	0,82
	15:00	1,08702121	0,019	0,744	59,479	4,173	0,82
	15:30	1,08738959	0,019	0,754	59,327	5,186	0,84
	16:00	1,08674086	0,019	0,744	59,175	5,028	0,83
	16:30	1,08579068	0,019	0,734	59,341	5,901	0,82
	17:00	1,08657694	0,019	0,744	58,869	5,001	0,84
	17:30	1,08486289	0,019	0,714	58,689	5,882	0,80
	18:00	1,08541458	0,019	0,704	57,567	7,622	0,80
	18:30	1,08483806	0,019	0,683	56,899	7,723	0,78
	19:00	1,08567638	0,019	0,684	55,984	5,842	0,78
	19:30	1,08555366	0,019	0,694	56,474	6,890	0,79
	20:00	1,0857991	0,019	0,673	55,496	5,353	0,77
	20:30	1,08715764	0,019	0,684	55,060	6,424	0,78
	21:00	1,08893754	0,018	0,694	54,314	7,110	0,79
	21:30	1,09006402	0,018	0,694	53,703	4,069	0,78
	22:00	1,09096056	0,018	0,714	54,008	4,696	0,80
	22:30	1,09227032	0,018	0,724	53,836	4,691	0,80
	23:00	1,09285749	0,017	0,724	53,818	5,278	0,80
	23:30	1,09441496	0,017	0,735	53,341	4,807	0,81
02-jul	0:00	1,09524666	0,017	0,735	53,026	4,526	0,80
con Rep ↑	0:30	1,09644025	0,017	0,735	52,414	5,085	0,80
	1:00	1,09763437	0,017	0,735	51,806	5,268	0,80
sin Rep. ↓	1:30	1,09887038	0,016	0,765	52,167	5,363	0,83
	2:00	1,1005429	0,016	0,796	52,185	4,504	0,86
	2:30	1,10126267	0,016	0,796	51,872	4,108	0,86
	3:00	1,10240745	0,016	0,796	51,257	4,352	0,85
	3:30	1,1037827	0,015	0,786	49,964	6,257	0,84
	4:00	1,10492995	0,015	0,756	48,212	6,158	0,80
	4:30	1,10673887	0,015	0,756	47,073	5,763	0,80
	5:00	1,10835875	0,014	0,776	46,686	5,138	0,83
	5:30	1,10904454	0,014	0,786	46,760	4,989	0,84
	6:00	1,10973172	0,014	0,796	46,831	3,658	0,85
	6:30	1,11051605	0,014	0,817	46,976	2,484	0,87
	7:00	1,11063489	0,014	0,817	46,973	2,546	0,87
	7:30	1,11077983	0,014	0,827	47,325	1,861	0,88
	8:00	1,11016272	0,014	0,827	47,901	1,548	0,88
	8:30	1,10814887	0,015	0,806	48,909	-0,804	0,88

02-jul	9:00	1,10755335	0,015	0,816	49,871	-0,766	0,90
	9:30	1,1069175	0,015	0,806	50,080	-1,232	0,89
	10:00	1,10458106	0,016	0,796	51,484	-2,840	0,89
	10:30	1,10295991	0,016	0,776	52,172	-3,630	0,88
	11:00	1,10155632	0,017	0,775	53,385	-1,780	0,87
	11:30	1,1002045	0,017	0,765	54,181	-0,979	0,86
	12:00	1,1000156	0,017	0,765	54,484	-0,933	0,86
	12:30	1,09916746	0,017	0,765	55,107	0,143	0,86
	13:00	1,09916746	0,017	0,765	55,107	1,926	0,85
	13:30	1,09904998	0,017	0,765	55,111	2,585	0,85
	14:00	1,09893251	0,017	0,765	55,115	3,672	0,84
	14:30	1,09875204	0,017	0,755	54,678	3,445	0,83
	15:00	1,09857158	0,017	0,745	54,242	4,388	0,82
	15:30	1,09859267	0,017	0,765	54,826	3,369	0,84
	16:00	1,09791067	0,017	0,735	54,113	4,444	0,81
	16:30	1,09847021	0,017	0,755	54,390	3,700	0,84
	17:00	1,09748611	0,018	0,724	53,972	3,485	0,81
	17:30	1,09736872	0,018	0,724	53,975	3,487	0,81
	18:00	1,09713679	0,018	0,735	54,430	2,273	0,82
	18:30	1,09805397	0,017	0,745	53,963	2,017	0,83
	19:00	1,09563606	0,018	0,714	54,451	2,286	0,79
	19:30	1,09654983	0,018	0,735	54,448	1,446	0,82
	20:00	1,0963179	0,018	0,745	54,903	2,337	0,82
	20:30	1,09553111	0,018	0,735	55,070	3,328	0,81
	21:00	1,09608597	0,018	0,755	55,358	3,227	0,83
	21:30	1,09560467	0,018	0,755	55,674	4,992	0,83
	22:00	1,09596858	0,018	0,755	55,362	3,735	0,82
	22:30	1,09657087	0,017	0,765	55,489	4,304	0,83
	23:00	1,09759877	0,017	0,775	55,296	4,000	0,84
	23:30	1,09752284	0,017	0,765	55,158	3,246	0,82
03-jul	0:00	1,09869479	0,017	0,796	55,530	6,290	0,86
	0:30	1,09930378	0,017	0,806	55,638	3,868	0,87
	1:00	1,09917148	0,017	0,806	55,949	2,776	0,86
	1:30	1,10023191	0,017	0,826	55,851	2,533	0,89
	2:00	1,10012257	0,017	0,836	56,282	4,192	0,90
	2:30	1,10066859	0,017	0,836	55,953	3,665	0,89
	3:00	1,10121466	0,016	0,836	55,625	3,468	0,89
	3:30	1,10165336	0,016	0,847	55,721	3,709	0,91
	4:00	1,10209338	0,016	0,857	55,813	4,214	0,92
	4:30	1,10253978	0,016	0,857	55,177	3,671	0,92
	5:00	1,10255627	0,016	0,857	54,867	3,807	0,91
	5:30	1,10305826	0,016	0,867	54,949	4,362	0,93
	6:00	1,10356158	0,016	0,877	55,027	4,130	0,96
	6:30	1,10385675	0,016	0,877	55,018	4,113	0,95
	7:00	1,10458274	0,016	0,877	54,684	2,996	0,95

03-jul	7:30	1,10487802	0,016	0,877	54,675	2,768	0,95	
	8:00	1,10507016	0,016	0,888	55,069	1,261	0,98	
	8:30	1,10346151	0,016	0,887	56,379	-0,560	0,99	
	9:00	1,10109774	0,017	0,877	57,956	-1,632	0,98	
	9:30	1,09839198	0,017	0,877	60,005	-1,125	0,99	
	10:00	1,09623354	0,018	0,867	61,288	-0,648	0,97	
	10:30	1,09407836	0,018	0,867	63,051	-0,116	0,98	
	11:00	1,09149056	0,019	0,867	65,215	1,356	0,98	
	11:30	1,09068591	0,019	0,866	65,946	1,232	0,98	
	12:00	1,09000795	0,020	0,856	66,173	0,886	0,97	
	12:30	1,08823855	0,020	0,846	67,142	1,614	0,95	
	13:00	1,08763332	0,020	0,846	67,520	3,727	0,95	
	13:30	1,08758925	0,020	0,836	67,002	4,903	0,93	
	14:00	1,08767584	0,020	0,815	65,959	4,726	0,90	
	14:30	1,08751528	0,020	0,805	65,445	5,946	0,88	
	15:00	1,08833671	0,020	0,785	63,706	5,692	0,86	
	15:30	1,08766461	0,020	0,795	64,582	6,231	0,88	
	16:00	1,08722098	0,020	0,754	63,189	6,396	0,82	
	16:30	1,08848264	0,020	0,775	62,859	5,124	0,86	
	17:00	1,08771819	0,020	0,754	62,517	4,542	0,83	
	17:30	1,0877791	0,020	0,764	62,702	4,008	0,85	
	18:00	1,08741678	0,020	0,775	63,228	3,828	0,86	
	18:30	1,08711274	0,020	0,785	63,752	3,158	0,87	
	19:00	1,08592506	0,020	0,764	63,759	4,813	0,85	
	19:30	1,08576556	0,020	0,744	63,046	5,999	0,82	
	20:00	1,08602988	0,020	0,724	61,987	6,397	0,80	
	20:30	1,08801706	0,020	0,714	60,134	4,767	0,79	
	21:00	1,08932524	0,020	0,724	59,660	5,164	0,80	
	21:30	1,09045476	0,019	0,744	59,677	3,771	0,82	
	22:00	1,09086971	0,019	0,754	59,839	5,292	0,83	
	22:30	1,09211907	0,019	0,765	59,651	5,382	0,83	
	23:00	1,09306922	0,019	0,765	59,303	5,118	0,83	
	23:30	1,09342173	0,019	0,795	60,409	-0,691	0,87	
	04-jul	0:00	1,09261622	0,019	0,816	62,053	0,959	0,89
		0:30	1,09212349	0,019	0,826	62,890	2,364	0,90
		1:00	1,09205851	0,019	0,836	63,381	2,199	0,92
		1:30	1,09259881	0,019	0,846	63,508	4,464	0,93
		2:00	1,09338468	0,019	0,836	62,658	2,821	0,90
		2:30	1,09400548	0,019	0,846	62,443	3,856	0,92
		3:00	1,09474585	0,018	0,856	62,217	5,282	0,94
		3:30	1,09560668	0,018	0,857	61,517	6,312	0,93
		4:00	1,09635082	0,018	0,867	61,284	6,501	0,96
		4:30	1,09721268	0,018	0,867	60,589	7,036	0,95
		5:00	1,09839198	0,017	0,877	60,005	7,497	0,98
		5:30	1,09925479	0,017	0,877	59,318	6,744	0,97

	6:00	1,09988922	0,017	0,887	59,077	7,539	1,00
	6:30	1,10075298	0,017	0,887	58,395	7,882	1,00
	7:00	1,10172469	0,016	0,877	57,294	6,739	0,96
	7:30	1,10215584	0,016	0,877	56,961	5,856	0,96
	8:00	1,10312426	0,016	0,867	55,881	6,091	0,93
	8:30	1,10269378	0,016	0,867	56,209	3,454	0,95
	9:00	1,10065105	0,017	0,857	57,435	3,647	0,94
	9:30	1,09904357	0,017	0,846	58,331	1,959	0,94
	10:00	1,09701205	0,018	0,836	59,563	2,465	0,93
	10:30	1,09498649	0,018	0,826	60,800	1,827	0,92
	11:00	1,09272734	0,019	0,826	62,534	3,232	0,93
	11:30	1,09187026	0,019	0,826	63,236	4,424	0,92
	12:00	1,09071059	0,019	0,815	63,794	3,709	0,92
	12:30	1,08985452	0,020	0,815	64,504	4,419	0,92
	13:00	1,08998224	0,020	0,805	63,993	5,849	0,90

Prototipo P2: Toma de datos: Ø Alveolo, H.R., td.

Día	Hora	P2 Tª Alveolo (°C)	P2 H.R. (%)	P2 td (°C)
30-jun con Rep. ↓				
	0:00	24	75	19,3
	0:30	23,7	76	19,2
	1:00	23,2	78	19,2
	1:30	23	78	19
	2:00	22,9	79	19,1
	2:30	22,7	79	18,9
	3:00	22,4	78	18,4
	3:30	22,1	79	18,3
	4:00	21,9	79	18,1
	4:30	21,6	79	17,8
	5:00	21,2	80	17,6
	5:30	21,1	80	17,5
	6:00	20,8	80	17,2
	6:30	20,6	80	17,1
	7:00	20,4	81	17,1
	7:30	20,2	81	16,9
	8:00	20,2	81	16,9
	8:30	20,4	81	17,1
	9:00	21	80	17,4
	9:30	21,6	79	17,8
	10:00	22,3	78	18,3
	10:30	22,8	79	19
	11:00	23,6	78	19,6
	11:30	24,4	78	20,3

		12:00	25,2	77	20,9
		12:30	25,9	78	21,8
		13:00	26	78	21,9
		13:30	25,9	79	22
		14:00	25,6	80	21,9
		14:30	25,4	79	21,5
		15:00	25,2	79	21,3
		15:30	25,5	78	21,4
		16:00	25,1	78	21
		16:30	24,6	79	20,7
		17:00	24,6	79	20,7
		17:30	25,2	77	20,9
		18:00	25	77	20,7
		18:30	24,6	78	20,5
		19:00	24,4	78	20,3
		19:30	24,7	77	20,4
		20:00	24,4	76	19,9
		20:30	24,1	71	18,5
		21:00	23,8	79	20
		21:30	23,8	80	20,2
		22:00	23,5	77	19,3
		22:30	23,3	81	19,9
		23:00	23,2	82	20
	30-jun	23:30	23,3	81	19,9
	01-jul	0:00	23,1	80	19,5
		0:30	22,7	82	19,5
		1:00	22,8	81	19,4
		1:30	22,3	82	19,1
		2:00	22,1	83	19,1
		2:30	22	82	18,8
		3:00	21,6	83	18,6
		3:30	21,4	83	18,4
		4:00	21,3	82	18,1
		4:30	20,8	84	18
		5:00	20,9	82	17,7
		5:30	20,5	82	17,3
		6:00	20,3	82	17,2
		6:30	20,1	81	16,8
		7:00	19,6	82	16,5
		7:30	19,1	82	16
		8:00	19,4	81	16,1
		8:30	19,6	81	16,3
		9:00	20,4	80	16,9
		9:30	20,9	79	17,1
		10:00	21,6	78	17,6

		10:30	22,4	78	18,4
		11:00	23,1	80	19,5
		11:30	24,3	78	20,2
		12:00	25	78	20,9
		12:30	25,6	80	21,9
		13:00	25,8	79	21,9
		13:30	25,3	81	21,8
		14:00	25,2	80	21,5
		14:30	24,8	81	21,3
		15:00	24,6	81	21,1
		15:30	24,7	80	21
		16:00	24,5	80	20,9
		16:30	24,4	81	21
		17:00	24,6	78	20,5
		17:30	24,1	80	20,5
		18:00	24	80	20,4
		18:30	24	77	19,7
		19:00	23,7	79	19,9
		19:30	23,9	78	19,9
		20:00	23,6	81	20,2
		20:30	23,8	80	20,2
		21:00	23,6	80	20
		21:30	23,2	81	19,8
		22:00	23,1	81	19,7
		22:30	22,8	80	19,2
		23:00	22,5	81	19,1
	01-jul	23:30	22,3	81	18,9
	02-jul	0:00	22,1	80	18,5
	con Rep. ↑	0:30	22	81	18,6
	sin Rep. ↓	1:00	21,7	82	18,5
		1:30	21,5	82	18,3
		2:00	21,3	83	18,3
		2:30	21	84	18,2
		3:00	20,8	85	18,2
		3:30	20,5	84	17,7
		4:00	20,3	82	17,2
		4:30	20	81	16,7
		5:00	19,8	84	17
		5:30	19,7	84	16,9
		6:00	19,6	84	16,8
		6:30	19,6	85	17
		7:00	19,4	85	16,8
		7:30	19,2	86	16,8

		8:00	19,2	85	16,6
		8:30	19,6	86	17,2
		9:00	20,1	85	17,5
		9:30	20,7	85	18,1
		10:00	21,8	84	19
		10:30	22,6	84	19,8
		11:00	23,6	85	21
		11:30	25,1	81	21,6
		12:00	25,9	81	22,4
		12:30	26,7	81	23,2
		13:00	26,5	81	23
		13:30	25,7	83	22,6
		14:00	25,2	83	22,1
		14:30	24,8	83	21,7
		15:00	24,5	83	21,4
		15:30	24,5	81	21,1
		16:00	23,9	81	20,5
		16:30	24,2	80	20,6
		17:00	23,5	83	20,5
		17:30	23,5	83	20,5
		18:00	23,6	81	20,2
		18:30	23,8	79	20
		19:00	23,4	82	20,2
		19:30	23,5	80	19,9
		20:00	23,6	79	19,8
		20:30	23,3	80	19,7
		21:00	23,4	78	19,4
		21:30	23	79	19,2
		22:00	22,8	78	18,8
		22:30	22,8	78	18,8
		23:00	22,4	77	18,2
	02-jul	23:30	22,1	78	18,1
03-jul		0:00	22,2	77	18
		0:30	22,3	78	18,3
		1:00	22,3	79	18,5
		1:30	21,7	80	18,1
		2:00	21,5	81	18,1
		2:30	21,5	81	18,1
		3:00	21	82	17,8
		3:30	20,7	83	17,7
		4:00	20,7	83	17,7
		4:30	20,6	84	17,8
		5:00	20,3	84	17,5
		5:30	20,1	84	17,3
		6:00	20	84	17,2

	6:30	19,9	84	17,1
	7:00	19,9	85	17,3
	7:30	19,9	85	17,3
	8:00	19,9	86	17,5
	8:30	20,4	85	17,8
	9:00	21,2	84	18,4
	9:30	21,9	83	18,9
	10:00	22,4	83	19,4
	10:30	23,2	83	20,2
	11:00	24,2	83	21,2
	11:30	25,1	82	21,8
	12:00	25,8	81	22,3
	12:30	26,8	80	23,1
	13:00	27	80	23,3
	13:30	26,2	82	22,9
	14:00	25,8	81	22,3
	14:30	26,1	78	22
	15:00	25,2	81	21,7
	15:30	25,3	80	21,6
	16:00	25,2	78	21,1
	16:30	25,5	68	19,2
	17:00	25,2	74	20,3
	17:30	25,6	72	20,2
	18:00	25,3	76	20,8
	18:30	25,7	67	19,1
	19:00	25,2	71	19,6
	19:30	25,1	77	20,8
	20:00	25,2	77	20,9
	20:30	25	78	20,9
	21:00	24,8	80	21,1
	21:30	24,8	78	20,7
	22:00	24,5	77	20,2
	22:30	24,4	75	19,7
	23:00	23,9	78	19,9
03-jul	23:30	24,3	76	19,8
04-jul	0:00	24,1	79	20,3
	0:30	24,1	80	20,5
	1:00	24	78	20
	1:30	23,6	80	20
	2:00	23,3	80	19,7
	2:30	23,2	79	19,4
	3:00	22,7	82	19,5
	3:30	22,5	80	18,9
	4:00	22	82	18,8
	4:30	21,9	78	17,9

04-jul	5:00	21,4	80	17,8
	5:30	21	82	17,8
	6:00	20,8	80	17,2
	6:30	20,6	80	17,1
	7:00	20,6	77	16,5
	7:30	20,5	76	16,1
	8:00	20,5	73	15,5
	8:30	20,5	79	16,8
	9:00	21,2	76	16,8
	9:30	21,8	76	17,4
	10:00	22,6	73	17,5
	10:30	23,5	77	19,3
	11:00	24,4	76	19,9
	11:30	25,6	75	20,9
	12:00	26,4	75	21,6
	12:30	27	72	21,6
	13:00	26,5	72	21,1

Prototipo P2: Toma de datos: Tª del agua de los 4 depósitos, ΔT de la media de la Tª de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, Tª superficie frontal, consumo de agua.

Día	Hora	Tª Depósitos (°C)					gradiente térmico Agua- aire	Frontal (°C)	Consumo instantáneo P2 (kg H ² O/sm ²)
		2 C	2 A	2 B	2 D	P2 Tª Media AB	ΔT P2 (Expuesto)		
30-jun con Rep. ↓	0:00	23,4	22	21,6	23,7	21,8	11,1	28,5	
	6:00							25,5	
	7:30	21,1	20,1	20,1	21,5	20,1	6,8	25,5	1,38E-04
	11:00	23,8	21,2	22,2	25,3	21,7	13,3	33	1,49E-04
	13:00	27,2	24,6	24,5	27,7	24,55	11,55	31	1,98E-04
	16:00	25,7	22,9	23	25,7	22,95	12,45	29	1,76E-04
	19:00	25,2	22,3	22,3	25	22,3	13,7	29,6	1,74E-04
30-jun	23:00	24,2	22,2	22,1	24,2	22,15	11,05	29,1	1,53E-04
01-jul	6:00							25,5	
	7:30	20,1	18,3	17,5	19,3	17,9	8,7	23,5	1,50E-04
	11:00	24	21,1	21,7	25,2	21,4	13,8	33,7	1,37E-04
	13:00	27,1	24,3	24,8	28	24,55	10,15	30,9	1,97E-04
	16:00	25,1	22,8	22,9	25,1	22,85	11,05	30,1	1,63E-04
01-jul	19:00	25	22,3	22,2	24,6	22,25	12,45	31	1,55E-04
02-jul con Rep. ↑	0:30	22,8	20,9	20,7	22,2	20,8	9,8	26,7	1,30E-04
	sin Rep.	7:30	20,1	18,6	18,3	19,3	18,45	24,5	1,16E-04

↓									
	11:00							31,6	8,47E-05
	13:00							30,3	1,95E-04
	16:00							28,8	1,63E-04
02-jul	19:00							29,2	1,09E-04
03-jul	0:00							26,8	1,25E-04
	7:30							23,5	6,72E-05
	11:00							31	5,18E-05
	13:00							30,8	1,04E-04
	16:00							30,6	7,69E-05
	19:00							30,6	1,02E-04
03-jul	23:00							28,9	5,29E-05
04-jul	7:30							23,8	6,15E-06
	11:30							23,8	0
04-jul	13:00							30,7	0

Prototipo P2: Evaporación en los depósitos (acumulada y por intervalo), potencia equivalente.

Día	Hora	Evaporación Acumulada (ml H ² O)	Evaporación por intervalo de tiempo (ml H ² O)	P2 P (W/m ²)
30-jun con Rep. ↓	0:00	0	0	
	7:30	674	674	333,70
	11:00	994	320	362,13
	13:00	1236	242	479,25
	16:00	1560	324	427,76
	19:00	1880	320	422,48
30-jun	23:00	2255	375	371,32
01-jul	7:30	2989	734	363,40
	11:00	3282	293	331,57
	13:00	3523	241	477,27
	16:00	3822	299	394,76
01-jul	19:00	4107	285	376,27
02-jul con Rep. ↑	0:30	4546	439	316,14
sin Rep. ↓	7:30	5041	495	280,31
	11:00	5223	181	205,28
	13:00	5462	239	473,31
	16:00	5761	299	394,49
02-jul	19:00	5960	200	263,39
03-jul	0:00	6344	383	303,71

03-jul	7:30	6652	308	162,81
	11:00	6763	111	125,50
	13:00	6891	128	253,09
	16:00	7032	141	186,42
	19:00	7218	186	246,10
	23:00	7348	130	128,33
04-jul	7:30	7380	32	14,91
	11:30	7380	0	0,00
04-jul	13:00	7380	0	0,00

Prototipo P2: Valores derivados: t^*_{P2} , $\Delta T_{A_{ex}-P1}$, V_{P2} , Pws_{P2} , Pw_{P2} , W_{P2} .

Día	Hora	Bulbo húmedo	Gradiente T aire-aire	Volumen específico	Presión de saturación	Presión de vapor	Ratio de humedad
		t^*_{P2} (°C)	$\Delta T_{A_{ex}-P2}$ (°C)	V_{P2} (m³/kgas)	Pws_{P2} (Pa)	Pw_{P2} (Pa)	W_{P2} (kgw/kgas)
30-jun con Rep. ↓	0:00	21,7	8,9	0,93582631	2985,13	2238,85	0,01517545
	0:30	21,6	8,7	0,93477869	2931,75	2228,13	0,01510107
	1:00	21,5	8,9	0,93301844	2844,65	2218,82	0,01503482
	1:30	21,3	9,0	0,93222359	2810,44	2192,14	0,01485135
	2:00	21,3	8,8	0,93216171	2793,47	2206,85	0,01495496
	2:30	21,1	8,6	0,9313678	2759,81	2180,25	0,01477206
	3:00	20,7	8,4	0,92995896	2709,97	2113,78	0,01431446
	3:30	20,5	8,1	0,92890356	2660,93	2102,13	0,01423378
	4:00	20,3	7,9	0,92792006	2628,66	2076,64	0,01405576
	4:30	20,0	7,8	0,92670331	2580,91	2038,92	0,01379625
	5:00	19,8	7,7	0,92531137	2518,41	2014,73	0,01363049
	5:30	19,7	7,3	0,9247745	2503,00	2002,40	0,01354377
	6:00	19,4	7,4	0,92347046	2457,25	1965,80	0,01329092
	6:30	19,2	7,0	0,92240447	2427,16	1941,72	0,01312187
	7:00	19,1	6,6	0,92148192	2397,39	1941,88	0,01311868
	7:30	18,9	6,7	0,92041993	2367,94	1918,03	0,01295136
	8:00	18,9	7,0	0,92022012	2367,94	1918,03	0,01294855
	8:30	19,1	8,8	0,92098175	2397,39	1941,88	0,01311156
	9:00	19,6	10,6	0,92323481	2487,67	1990,13	0,01344293
	9:30	20,0	11,1	0,92559567	2580,91	2038,92	0,01377976
	10:00	20,6	11,3	0,92830399	2693,54	2100,96	0,0142071
	10:30	21,2	12,1	0,93080102	2776,60	2193,51	0,01484789
	11:00	21,9	11,4	0,93410866	2914,15	2273,04	0,01539951
	11:30	22,7	10,7	0,93775305	3057,61	2384,94	0,01617735
	12:00	23,3	11,3	0,94112586	3207,20	2469,54	0,01676672
	12:30	24,2	10,6	0,94474467	3343,29	2607,76	0,0177319
	13:00	24,3	10,1	0,94532181	3363,13	2623,24	0,01784213
	13:30	24,4	9,6	0,94550371	3343,29	2641,20	0,01797366
	14:00	24,3	9,5	0,94462652	3284,36	2627,49	0,0178816

30-jun	14:30	23,9	9,6	0,94427235	3245,58	2564,01	0,01745465
	15:00	23,7	10,0	0,94333094	3207,20	2533,69	0,01724252
	15:30	23,8	9,9	0,94440698	3264,92	2546,64	0,0173331
	16:00	23,4	10,3	0,94346153	3188,16	2486,76	0,01693117
	16:30	23,1	10,7	0,94124986	3094,43	2444,60	0,01663275
	17:00	23,1	11,0	0,94217745	3094,43	2444,60	0,01664915
	17:30	23,3	10,8	0,94421792	3207,20	2469,54	0,01682181
	18:00	23,1	11,2	0,94421741	3169,22	2440,30	0,01663365
	18:30	22,9	11,6	0,94299375	3094,43	2413,65	0,01645264
	19:00	22,7	11,6	0,94237783	3057,61	2384,94	0,01625713
	19:30	22,8	11,2	0,94344628	3112,98	2396,99	0,01634147
	20:00	22,3	11,7	0,94184983	3057,61	2323,78	0,01583141
	20:30	21,1	11,8	0,93883365	3003,11	2132,21	0,01449422
	21:00	22,3	11,6	0,93971917	2949,45	2330,07	0,01587008
	21:30	22,4	11,1	0,93991982	2949,45	2359,56	0,0160744
	22:00	21,6	10,8	0,93744515	2896,63	2230,41	0,01516977
	22:30	22,1	10,5	0,93802483	2861,88	2318,13	0,01578669
	23:00	22,2	10,0	0,93703835	2844,65	2332,61	0,01587394
	23:30	22,1	9,4	0,93628208	2861,88	2318,13	0,01575736
01-jul	0:00	21,7	9,1	0,93518322	2827,50	2262,00	0,01536809
	0:30	21,7	9,1	0,93363369	2759,81	2263,04	0,01537033
	1:00	21,6	8,5	0,93339676	2776,60	2249,04	0,01526624
	1:30	21,2	8,6	0,93152193	2693,54	2208,70	0,01498744
	2:00	21,2	8,4	0,93099583	2660,93	2208,57	0,01498817
	2:30	20,9	8,1	0,93027791	2644,75	2168,70	0,01471117
	3:00	20,7	8,2	0,92875678	2580,91	2142,15	0,01452691
	3:30	20,5	8,0	0,92786705	2549,49	2116,08	0,01434601
	4:00	20,2	7,6	0,92706638	2533,91	2077,81	0,01407914
	4:30	20,0	8,0	0,92536446	2457,25	2064,09	0,01398409
	5:00	19,8	7,5	0,92530717	2472,42	2027,38	0,01372991
	5:30	19,4	7,5	0,92356068	2412,23	1978,03	0,01338849
	6:00	19,2	7,3	0,92269212	2382,62	1953,75	0,01322066
	6:30	18,8	7,1	0,92139036	2353,33	1906,20	0,01288941
	7:00	18,5	7,2	0,91927649	2281,48	1870,81	0,01264252
	7:30	18,0	7,5	0,91704614	2211,55	1813,47	0,01224609
	8:00	18,1	7,3	0,91799787	2253,28	1825,16	0,0123252
	8:30	18,3	9,8	0,91874928	2281,48	1848,00	0,01248119
	9:00	19,0	11,1	0,92184263	2397,39	1917,91	0,01296179
	9:30	19,3	12,1	0,92365609	2472,42	1953,21	0,01320399
	10:00	19,9	12,5	0,92624171	2580,91	2013,11	0,01361482
	10:30	20,7	13,0	0,9297565	2709,97	2113,78	0,01431134
	11:00	21,7	12,1	0,93344985	2827,50	2262,00	0,01533961
	11:30	22,6	10,8	0,93944556	3039,35	2370,69	0,01611512
	12:00	23,3	10,5	0,94175791	3169,22	2471,99	0,01680578
	12:30	24,3	9,9	0,94628317	3284,36	2627,49	0,01791296

01-jul	13:00	24,3	8,9	0,94595969	3323,54	2625,60	0,01788207
	13:30	24,2	8,8	0,94436466	3226,34	2613,34	0,01779811
	14:00	23,9	8,6	0,94376538	3207,20	2565,76	0,01746883
	14:30	23,6	8,8	0,94262052	3131,63	2536,62	0,01727246
	15:00	23,4	9,0	0,94219693	3094,43	2506,48	0,017071
	15:30	23,4	9,2	0,94265471	3112,98	2490,38	0,01696391
	16:00	23,2	9,4	0,94203003	3075,97	2460,78	0,01676231
	16:30	23,2	9,6	0,94208594	3057,61	2476,66	0,01687717
	17:00	22,9	9,6	0,94237408	3094,43	2413,65	0,01644183
	17:30	22,7	10,5	0,94104778	3003,11	2402,48	0,01637003
	18:00	22,6	10,6	0,94094584	2985,13	2388,10	0,0162757
	18:30	22,1	10,7	0,9403837	2985,13	2298,55	0,015656
	19:00	22,2	11,0	0,93998144	2931,75	2316,08	0,01578453
	19:30	22,2	10,5	0,94059365	2967,24	2314,45	0,0157731
	20:00	22,4	11,1	0,94012402	2914,15	2360,46	0,01609478
	20:30	22,4	10,6	0,94053791	2949,45	2359,56	0,01608497
	21:00	22,2	10,0	0,93941198	2914,15	2331,32	0,01588404
	21:30	22,0	9,8	0,93761851	2844,65	2304,16	0,01569006
	22:00	21,9	9,3	0,93690535	2827,50	2290,27	0,01558885
	22:30	21,4	9,1	0,9347457	2776,60	2221,28	0,01509956
	23:00	21,3	9,1	0,9331639	2726,50	2208,46	0,01500215
	23:30	21,1	8,9	0,93190893	2693,54	2181,77	0,01481082
02-jul	0:00	20,7	8,7	0,9303885	2660,93	2128,74	0,014437
con Rep. ↑	0:30	20,8	8,6	0,92990827	2644,75	2142,25	0,01452599
sin Rep. ↓	1:00	20,6	8,5	0,92853496	2596,74	2129,33	0,01443162
	1:30	20,4	8,1	0,92739501	2565,16	2103,43	0,01424819
	2:00	20,4	7,7	0,92651465	2533,91	2103,15	0,01424236
	2:30	20,2	7,4	0,92518916	2487,67	2089,64	0,01414496
	3:00	20,2	7,2	0,92430301	2457,25	2088,66	0,01413433
	3:30	19,7	7,2	0,92273972	2412,23	2026,27	0,01370285
	4:00	19,2	7,2	0,92138897	2382,62	1953,75	0,01320198
	4:30	18,7	7,1	0,91976073	2338,80	1894,43	0,01279152
	5:00	19,0	7,1	0,9194964	2309,99	1940,39	0,01310694
	5:30	18,9	7,0	0,91876553	2295,69	1928,38	0,01301991
	6:00	18,8	6,9	0,91803596	2281,48	1916,44	0,0129334
	6:30	18,9	6,4	0,91816363	2281,48	1939,26	0,01308919
	7:00	18,7	6,3	0,91720252	2253,28	1915,29	0,01292265
	7:30	18,6	6,2	0,91636646	2225,39	1913,83	0,01290982
	8:00	18,5	6,6	0,91594672	2225,39	1891,58	0,01275387
	8:30	19,1	8,5	0,91759421	2281,48	1962,07	0,01323497
	9:00	19,4	8,7	0,91923311	2353,33	2000,33	0,01349426
	9:30	20,1	8,7	0,92175605	2442,16	2075,84	0,01401358
	10:00	21,1	9,9	0,92627703	2612,66	2194,63	0,01483307

02-jul	10:30	21,9	10,1	0,92962686	2743,11	2304,21	0,01558801
	11:00	23,1	9,2	0,93425103	2914,15	2477,03	0,01678408
	11:30	24,0	7,7	0,93981602	3188,16	2582,41	0,01751443
	12:00	24,8	7,4	0,94340698	3343,29	2708,06	0,01838782
	12:30	25,6	6,4	0,94726814	3504,95	2839,01	0,01930458
	13:00	25,4	5,8	0,94629657	3463,91	2805,77	0,0190716
	13:30	25,0	6,3	0,94323511	3303,90	2742,24	0,01862886
	14:00	24,4	6,3	0,94094541	3207,20	2661,98	0,01806975
	14:30	24,0	6,6	0,93930554	3131,63	2599,25	0,0176367
	15:00	23,7	7,0	0,93814917	3075,97	2553,06	0,01731925
	15:30	23,3	7,0	0,93767342	3075,97	2491,54	0,01689335
	16:00	22,7	7,9	0,93505107	2967,24	2403,47	0,01628324
	16:30	22,8	7,7	0,93617751	3021,18	2416,94	0,01637784
	17:00	22,7	8,7	0,93390964	2896,63	2404,21	0,01629016
	17:30	22,7	8,7	0,93401138	2896,63	2404,21	0,01629194
	18:00	22,4	8,6	0,93398073	2914,15	2360,46	0,01598961
	18:30	22,3	8,3	0,93450021	2949,45	2330,07	0,01578194
	19:00	22,4	8,8	0,9337673	2879,21	2360,96	0,01600003
	19:30	22,1	8,7	0,93373774	2896,63	2317,31	0,01569847
	20:00	22,1	8,4	0,93399819	2914,15	2302,18	0,0155951
	20:30	21,9	8,7	0,93298236	2861,88	2289,51	0,01550798
	21:00	21,7	8,4	0,93290159	2879,21	2245,79	0,01520543
	21:30	21,4	8,5	0,93144344	2810,44	2220,25	0,01502916
	22:00	21,1	8,4	0,93031741	2776,60	2165,75	0,01465233
	22:30	21,1	8,2	0,93006449	2776,60	2165,75	0,01464834
	23:00	20,5	8,3	0,92776597	2709,97	2086,68	0,01409762
	23:30	20,4	8,2	0,92651701	2660,93	2075,52	0,0140175
03-jul	0:00	20,3	7,9	0,92648578	2677,19	2061,44	0,01391721
	0:30	20,6	7,3	0,92694349	2693,54	2100,96	0,01418628
	1:00	20,7	6,7	0,92696297	2693,54	2127,90	0,01436845
	1:30	20,3	6,8	0,92458623	2596,74	2077,39	0,01401975
	2:00	20,3	6,5	0,92396716	2565,16	2077,78	0,01402241
	2:30	20,3	5,8	0,92386692	2565,16	2077,78	0,01402089
	3:00	19,9	6,0	0,92183078	2487,67	2039,89	0,01375805
	3:30	19,8	6,0	0,92066841	2442,16	2026,99	0,0136677
	4:00	19,8	5,6	0,92056861	2442,16	2026,99	0,01366622
	4:30	19,8	5,2	0,92072471	2427,16	2038,81	0,01375287
	5:00	19,5	5,1	0,91976672	2382,62	2001,40	0,01350017
	5:30	19,3	4,9	0,91874949	2353,33	1976,80	0,01332848
	6:00	19,2	4,7	0,91816756	2338,80	1964,60	0,0132423
	6:30	19,1	4,6	0,91748723	2324,36	1952,46	0,0131552
	7:00	19,2	4,3	0,91746977	2324,36	1975,70	0,01331156
	7:30	19,2	4,0	0,91722137	2324,36	1975,70	0,01330795
	8:00	19,4	4,5	0,91720393	2324,36	1998,95	0,01346426
	8:30	19,8	5,9	0,91904521	2397,39	2037,78	0,01373011

	9:00	20,4	6,9	0,92220913	2518,41	2115,47	0,01426403
	9:30	21,0	7,7	0,92515292	2628,66	2181,79	0,01472341
	10:00	21,5	8,0	0,92748992	2709,97	2249,28	0,01519161
	10:30	22,3	7,9	0,93111375	2844,65	2361,06	0,01596594
	11:00	23,4	8,0	0,93572524	3021,18	2507,58	0,0169838
	11:30	24,1	7,4	0,93957917	3188,16	2614,29	0,01772619
	12:00	24,7	6,9	0,94251748	3323,54	2692,07	0,01826807
	12:30	25,5	6,6	0,94713148	3525,63	2820,51	0,01916963
	13:00	25,7	6,1	0,94825974	3567,31	2853,85	0,01940649
	13:30	25,3	6,6	0,94525009	3403,13	2790,57	0,01896617
	14:00	24,7	7,0	0,94313487	3323,54	2692,07	0,01828003
	14:30	24,4	6,7	0,94378379	3383,08	2638,80	0,01791281
	15:00	24,1	7,7	0,94080019	3207,20	2597,83	0,01763161
	15:30	24,0	8,1	0,94104401	3226,34	2581,07	0,01751657
	16:00	23,5	8,3	0,94001841	3207,20	2501,62	0,01696448
	16:30	21,8	8,4	0,93823147	3264,92	2220,15	0,0150121
	17:00	22,7	8,8	0,93901213	3207,20	2373,33	0,01607728
	17:30	22,7	8,7	0,94037956	3284,36	2364,74	0,01602109
	18:00	23,2	8,9	0,9405406	3226,34	2452,02	0,01663184
	18:30	21,8	8,6	0,93950385	3303,90	2213,61	0,01497827
	19:00	22,1	9,2	0,9387441	3207,20	2277,11	0,0154211
	19:30	23,2	9,3	0,94025149	3188,16	2454,88	0,01665724
	20:00	23,3	9,4	0,94071511	3207,20	2469,54	0,0167594
	20:30	23,3	9,5	0,93995994	3169,22	2471,99	0,0167737
	21:00	23,5	9,3	0,93952131	3131,63	2505,30	0,01700313
	21:30	23,1	8,7	0,93877728	3131,63	2442,67	0,01656493
	22:00	22,6	8,4	0,93697846	3075,97	2368,50	0,01604721
	22:30	22,1	8,0	0,93544005	3057,61	2293,21	0,01551677
	23:00	22,2	8,1	0,93363732	2967,24	2314,45	0,01565645
03-jul	23:30	22,2	7,5	0,93458581	3039,35	2309,90	0,01562069
04-jul	0:00	22,6	7,4	0,93434306	3003,11	2372,45	0,01605023
	0:30	22,7	6,9	0,93459752	3003,11	2402,48	0,01625782
	1:00	22,3	6,4	0,933482	2985,13	2328,40	0,01574293
	1:30	22,2	6,3	0,93206075	2914,15	2331,32	0,01575974
	2:00	21,9	6,1	0,93049969	2861,88	2289,51	0,01546671
	2:30	21,6	5,5	0,92986234	2844,65	2247,27	0,01517607
	3:00	21,7	5,4	0,928463	2759,81	2263,04	0,0152852
	3:30	21,1	5,2	0,92701564	2726,50	2181,20	0,01471932
	4:00	20,9	5,3	0,92533292	2644,75	2168,70	0,01463297
	4:30	20,2	4,7	0,92383552	2628,66	2050,36	0,01381675
	5:00	20,0	4,8	0,92217297	2549,49	2039,60	0,01374263
	5:30	19,9	5,0	0,92093201	2487,67	2039,89	0,01374464
	6:00	19,4	4,8	0,91967158	2457,25	1965,80	0,01323624
	6:30	19,2	4,6	0,91881062	2427,16	1941,72	0,01307074
	7:00	18,7	4,4	0,91808712	2427,16	1868,91	0,01257068

04-jul	7:30	18,5	4,5	0,91742335	2412,23	1833,30	0,01232638
	8:00	18,0	4,2	0,91670622	2412,23	1760,93	0,01183056
	8:30	18,9	6,5	0,9181416	2412,23	1905,66	0,01282298
	9:00	19,1	7,5	0,92039842	2518,41	1914,00	0,01288021
	9:30	19,7	8,5	0,92297716	2612,66	1985,62	0,01337259
	10:00	20,0	8,6	0,92563258	2743,11	2002,47	0,01348851
	10:30	21,6	9,1	0,930728	2896,63	2230,41	0,01506108
	11:00	22,3	9,4	0,9345817	3057,61	2323,78	0,01570924
	11:30	23,3	8,0	0,93975034	3284,36	2463,27	0,01667747
	12:00	24,1	8,1	0,94347625	3443,55	2582,66	0,01750855
	12:30	24,1	7,5	0,94520725	3567,31	2568,46	0,01740962
	13:00	23,6	7,2	0,94287813	3463,91	2494,02	0,01689129

Prototipo P2: Valores derivados: ρ P2, W_s P2, μ P2, h P2, Δh P2, Eficiencia de saturación.

Día	Hora	Densidad	Humedad de saturación	Grado de saturación	Entalpía	Δ Entalpía	Eficiencia
		ρ P2 (kg/m ³)	W_s P2 (kgw/kgas)	μ P2	h P2 (kJ/kg)	Δh P2 (kJ/kg)	E.sat. P2
30-jun con Rep. ↓	0:00	1,08479045	0,020	0,744	62,755	9,039	0,797
	0:30	1,08592663	0,020	0,754	62,256	7,090	0,807
	1:00	1,08790436	0,019	0,775	61,571	7,931	0,838
	1:30	1,08863513	0,019	0,775	60,898	6,652	0,839
	2:00	1,08881855	0,019	0,785	61,058	6,678	0,850
	2:30	1,0895503	0,019	0,785	60,386	6,925	0,847
	3:00	1,09070884	0,018	0,775	58,914	5,810	0,829
	3:30	1,09186124	0,018	0,785	58,399	5,918	0,838
	4:00	1,09282665	0,018	0,785	57,740	5,449	0,835
	4:30	1,09398147	0,018	0,785	56,772	5,402	0,833
	5:00	1,095448	0,017	0,796	55,939	5,013	0,845
	5:30	1,09599018	0,017	0,796	55,615	5,836	0,838
	6:00	1,09726403	0,017	0,796	54,664	4,009	0,839
	6:30	1,09834883	0,016	0,796	54,029	4,127	0,832
	7:00	1,09944499	0,016	0,806	53,815	4,070	0,839
	7:30	1,10053176	0,016	0,806	53,185	3,066	0,841
	8:00	1,10076766	0,016	0,806	53,178	2,968	0,847
	8:30	1,10003434	0,016	0,806	53,797	0,795	0,874
	9:00	1,09770875	0,017	0,796	55,256	-0,493	0,882
	9:30	1,0952728	0,018	0,785	56,730	0,022	0,876
	10:00	1,09253769	0,018	0,775	58,538	0,568	0,867
	10:30	1,0902952	0,019	0,785	60,682	1,497	0,886
	11:00	1,08702504	0,020	0,775	62,912	3,489	0,869
	11:30	1,08363001	0,021	0,774	65,718	6,057	0,862
	12:00	1,08037274	0,022	0,764	68,047	7,111	0,856
	12:30	1,07725604	0,023	0,774	71,232	10,296	0,862

30-jun	13:00	1,07671496	0,023	0,774	71,616	11,620	0,856
	13:30	1,07664693	0,023	0,784	71,848	13,236	0,864
	14:00	1,07754925	0,023	0,794	71,302	13,601	0,878
	14:30	1,07750126	0,022	0,784	70,007	14,474	0,863
	15:00	1,0783517	0,022	0,784	69,259	13,294	0,868
	15:30	1,07721896	0,022	0,774	69,801	13,400	0,853
	16:00	1,07787243	0,022	0,774	68,363	12,945	0,857
	16:30	1,08008808	0,021	0,784	67,085	11,884	0,875
	17:00	1,07904211	0,021	0,784	67,126	11,267	0,878
	17:30	1,07689314	0,022	0,764	68,188	13,545	0,850
	18:00	1,07669446	0,022	0,764	67,501	15,570	0,855
	18:30	1,07789965	0,021	0,774	66,626	13,645	0,871
	19:00	1,07839668	0,021	0,774	65,921	12,285	0,871
	19:30	1,0772648	0,021	0,764	66,447	14,038	0,855
	20:00	1,07854923	0,021	0,754	64,838	13,082	0,849
	20:30	1,08058996	0,021	0,703	61,125	10,772	0,797
	21:00	1,08103582	0,020	0,785	64,316	13,865	0,883
	21:30	1,08102242	0,020	0,795	64,835	14,331	0,891
	22:00	1,08291112	0,020	0,764	62,224	14,717	0,850
	22:30	1,08289958	0,020	0,805	63,586	15,120	0,897
	23:00	1,08413273	0,019	0,815	63,705	13,696	0,907
	23:30	1,08488391	0,020	0,805	63,512	12,775	0,887
01-jul	0:00	1,08574243	0,019	0,795	62,315	10,080	0,868
	0:30	1,0875468	0,019	0,816	61,907	11,352	0,897
	1:00	1,08771135	0,019	0,805	61,746	12,233	0,875
	1:30	1,08960123	0,018	0,816	60,521	11,824	0,891
	2:00	1,09021773	0,018	0,826	60,316	10,913	0,904
	2:30	1,09076133	0,018	0,816	59,509	10,942	0,884
	3:00	1,0923494	0,018	0,826	58,628	9,955	0,900
	3:30	1,09320189	0,017	0,826	57,962	10,127	0,897
	4:00	1,09385818	0,017	0,816	57,181	9,694	0,875
	4:30	1,09576727	0,017	0,836	56,424	9,146	0,911
	5:00	1,09556042	0,017	0,816	55,882	8,766	0,872
	5:30	1,09726249	0,016	0,816	54,603	8,327	0,871
	6:00	1,09811348	0,016	0,816	53,971	8,524	0,868
	6:30	1,09930541	0,016	0,806	52,925	8,303	0,848
	7:00	1,1015647	0,015	0,816	51,784	7,978	0,864
	7:30	1,10381152	0,015	0,816	50,264	6,863	0,868
	8:00	1,10275332	0,015	0,806	50,773	7,172	0,851
	8:30	1,1020212	0,015	0,806	51,375	3,556	0,885
	9:00	1,09884459	0,016	0,796	53,417	2,704	0,887
	9:30	1,0969494	0,017	0,786	54,547	2,352	0,885
	10:00	1,09433079	0,018	0,775	56,311	2,709	0,878
	10:30	1,09094299	0,018	0,775	58,906	2,516	0,883
	11:00	1,08772808	0,019	0,795	62,243	6,288	0,898

	11:30	1,0816115	0,021	0,774	65,457	7,719	0,863
	12:00	1,07968913	0,022	0,774	67,940	9,308	0,860
	12:30	1,07569594	0,023	0,794	71,382	11,713	0,882
	13:00	1,07603113	0,023	0,784	71,511	13,733	0,855
	13:30	1,07775964	0,022	0,805	70,778	14,371	0,885
	14:00	1,07809509	0,022	0,794	69,835	14,101	0,866
	14:30	1,07919617	0,021	0,805	68,920	13,626	0,884
	15:00	1,07946753	0,021	0,805	68,200	12,894	0,886
	15:30	1,07882971	0,021	0,795	68,031	13,890	0,873
	16:00	1,0793311	0,021	0,795	67,311	13,163	0,875
	16:30	1,07938898	0,021	0,805	67,500	14,060	0,892
	17:00	1,07859696	0,021	0,774	66,599	12,731	0,848
	17:30	1,08004083	0,021	0,795	65,898	13,090	0,885
	18:00	1,0800576	0,020	0,795	65,555	15,610	0,886
	18:30	1,08004425	0,020	0,764	63,978	14,801	0,849
	19:00	1,08064318	0,020	0,785	63,995	13,852	0,877
	19:30	1,07992766	0,020	0,774	64,172	14,589	0,859
	20:00	1,0808093	0,020	0,805	64,680	14,538	0,903
	20:30	1,08032324	0,020	0,795	64,862	16,226	0,886
	21:00	1,08140418	0,020	0,795	64,144	16,940	0,880
	21:30	1,0832658	0,019	0,805	63,237	13,604	0,891
	22:00	1,08398234	0,019	0,805	62,876	13,564	0,885
	22:30	1,08596333	0,019	0,795	61,322	12,178	0,868
	23:00	1,08769976	0,019	0,805	60,765	12,225	0,882
01-jul	23:30	1,08895921	0,018	0,805	60,072	11,538	0,879
02-jul	0:00	1,090337	0,018	0,795	58,915	10,416	0,862
con Rep. ↑	0:30	1,09099577	0,018	0,806	59,038	11,709	0,875
sin Rep. ↓	1:00	1,09250773	0,018	0,816	58,489	11,950	0,888
	1:30	1,09365285	0,017	0,816	57,817	11,013	0,882
	2:00	1,09468572	0,017	0,826	57,596	9,914	0,893
	2:30	1,09614877	0,017	0,836	57,039	9,275	0,905
	3:00	1,09718817	0,017	0,847	56,805	9,901	0,920
	3:30	1,09857939	0,016	0,836	55,401	11,695	0,900
	4:00	1,09964632	0,016	0,816	53,924	11,870	0,866
	4:30	1,10114673	0,016	0,806	52,573	11,264	0,848
	5:00	1,10180632	0,016	0,837	53,168	11,620	0,896
	5:30	1,10258807	0,016	0,837	52,844	11,073	0,894
	6:00	1,10337006	0,015	0,837	52,522	9,349	0,893
	6:30	1,10338632	0,015	0,847	52,917	8,424	0,904
	7:00	1,10436096	0,015	0,847	52,288	7,861	0,901
	7:30	1,10535454	0,015	0,857	52,050	6,586	0,918
	8:00	1,1056908	0,015	0,847	51,655	5,302	0,904
	8:30	1,10422991	0,015	0,857	53,286	3,573	0,941

	9:00	1,10254324	0,016	0,847	54,459	3,822	0,929
	9:30	1,10008888	0,017	0,847	56,396	5,084	0,932
	10:00	1,09560427	0,018	0,836	59,612	5,288	0,930
	10:30	1,09246844	0,019	0,836	62,357	6,555	0,934
	11:00	1,0883414	0,020	0,846	66,434	11,269	0,950
	11:30	1,08267407	0,022	0,805	69,848	14,688	0,870
	12:00	1,07947879	0,023	0,804	72,903	17,487	0,868
	12:30	1,07604652	0,024	0,804	76,071	21,107	0,854
	13:00	1,07690509	0,024	0,804	75,269	22,087	0,841
	13:30	1,07993102	0,023	0,825	73,309	20,783	0,894
	14:00	1,08196473	0,022	0,825	71,366	19,923	0,891
	14:30	1,08339263	0,021	0,825	69,848	18,615	0,894
	15:00	1,08438966	0,021	0,825	68,728	18,874	0,898
	15:30	1,08448563	0,021	0,805	67,644	16,187	0,857
	16:00	1,08687458	0,020	0,805	65,470	15,802	0,870
	16:30	1,08566787	0,021	0,795	66,022	15,331	0,850
	17:00	1,08821039	0,020	0,826	65,074	14,587	0,912
	17:30	1,08809374	0,020	0,826	65,078	14,589	0,912
	18:00	1,08780575	0,020	0,805	64,413	12,256	0,878
	18:30	1,08697883	0,020	0,785	64,091	12,145	0,843
	19:00	1,08806555	0,020	0,815	64,232	12,067	0,896
	19:30	1,08777704	0,020	0,795	63,569	10,567	0,864
	20:00	1,08736302	0,020	0,785	63,409	10,844	0,845
	20:30	1,08845357	0,020	0,795	62,877	11,136	0,864
	21:00	1,0882235	0,020	0,775	62,211	10,080	0,830
	21:30	1,08973784	0,019	0,785	61,350	10,669	0,845
	22:00	1,09065176	0,019	0,775	60,185	8,558	0,829
	22:30	1,09094407	0,019	0,775	60,175	8,990	0,826
	23:00	1,09305326	0,018	0,765	58,363	7,067	0,814
02-jul	23:30	1,09444024	0,018	0,775	57,850	5,937	0,826
03-jul	0:00	1,09436888	0,018	0,765	57,698	8,458	0,806
	0:30	1,09411877	0,018	0,775	58,485	6,714	0,808
	1:00	1,09429232	0,018	0,785	58,948	5,775	0,811
	1:30	1,09672816	0,018	0,795	57,443	4,125	0,829
	2:00	1,09746586	0,017	0,806	57,243	5,154	0,839
	2:30	1,09758329	0,017	0,806	57,239	4,952	0,824
	3:00	1,09972251	0,017	0,816	56,056	3,899	0,846
	3:30	1,10101279	0,017	0,826	55,518	3,506	0,864
	4:00	1,10113054	0,017	0,826	55,514	3,915	0,856
	4:30	1,10103798	0,016	0,836	55,631	4,125	0,868
	5:00	1,10191003	0,016	0,837	54,680	3,620	0,864
	5:30	1,10294318	0,016	0,837	54,039	3,452	0,858
	6:00	1,10354836	0,016	0,837	53,717	2,820	0,852
	6:30	1,10427172	0,016	0,837	53,393	2,489	0,849
	7:00	1,10446316	0,016	0,847	53,790	2,102	0,865

	7:30	1,10475833	0,016	0,847	53,781	1,874	0,857
	8:00	1,10494976	0,016	0,857	54,177	0,369	0,897
	8:30	1,10302529	0,016	0,847	55,367	-1,572	0,901
	9:00	1,09981999	0,017	0,836	57,547	-2,041	0,900
	9:30	1,09681696	0,018	0,826	59,437	-1,693	0,895
	10:00	1,09455811	0,018	0,826	61,143	-0,793	0,900
	10:30	1,09112977	0,019	0,826	63,939	0,771	0,902
	11:00	1,0868402	0,021	0,825	67,564	3,705	0,908
	11:30	1,08317237	0,022	0,815	70,387	5,673	0,885
	12:00	1,08037048	0,023	0,804	72,494	7,206	0,860
	12:30	1,07605929	0,024	0,794	75,831	10,304	0,837
	13:00	1,07502876	0,024	0,794	76,643	12,850	0,826
	13:30	1,07798579	0,023	0,815	74,689	12,590	0,878
	14:00	1,07967595	0,023	0,804	72,524	11,292	0,862
	14:30	1,0785445	0,023	0,774	71,900	12,401	0,797
	15:00	1,08166604	0,022	0,805	70,250	12,236	0,871
	15:30	1,08126354	0,022	0,794	70,061	11,710	0,859
	16:00	1,08185593	0,022	0,774	68,551	11,758	0,829
	16:30	1,08183549	0,022	0,672	63,889	6,154	0,697
	17:00	1,08207045	0,022	0,733	66,292	8,317	0,781
	17:30	1,08043723	0,022	0,713	66,563	7,869	0,752
	18:00	1,0809016	0,022	0,754	67,808	8,408	0,810
	18:30	1,08033434	0,023	0,662	64,010	3,415	0,690
	19:00	1,0816804	0,022	0,703	64,621	5,675	0,751
	19:30	1,08126097	0,022	0,764	67,665	10,618	0,830
	20:00	1,08083668	0,022	0,764	68,029	12,439	0,832
	20:30	1,08172025	0,022	0,774	67,858	12,490	0,847
	21:00	1,08246948	0,021	0,795	68,235	13,739	0,874
	21:30	1,0828606	0,021	0,774	67,119	11,213	0,835
	22:00	1,08438694	0,021	0,764	65,491	10,943	0,815
	22:30	1,08560327	0,021	0,744	64,037	9,769	0,779
	23:00	1,08784903	0,020	0,774	63,876	9,691	0,825
03-jul	23:30	1,08670672	0,021	0,754	64,198	3,098	0,782
04-jul	0:00	1,08744878	0,020	0,785	65,084	3,990	0,828
	0:30	1,08737484	0,020	0,795	65,613	5,087	0,836
	1:00	1,08812268	0,020	0,774	64,199	3,017	0,788
	1:30	1,08979993	0,020	0,795	63,828	4,785	0,822
	2:00	1,09131333	0,019	0,795	62,773	2,936	0,816
	2:30	1,09174878	0,019	0,785	61,930	3,343	0,780
	3:00	1,09351176	0,019	0,816	61,691	4,756	0,838
	3:30	1,09460863	0,019	0,795	60,046	4,841	0,789
	4:00	1,09650587	0,018	0,816	59,310	4,527	0,833
	4:30	1,09739963	0,018	0,775	57,133	3,581	0,731
	5:00	1,0992977	0,017	0,796	56,430	3,922	0,773
	5:30	1,10078119	0,017	0,816	56,022	3,448	0,820

04-jul	6:00	1,10173704	0,017	0,796	54,526	2,987	0,772
	6:30	1,10258929	0,016	0,796	53,900	3,386	0,764
	7:00	1,10291351	0,016	0,765	52,630	2,075	0,699
	7:30	1,10344519	0,016	0,755	51,907	0,803	0,687
	8:00	1,10376753	0,016	0,725	50,649	0,859	0,625
	8:30	1,10312285	0,016	0,786	53,168	0,413	0,805
	9:00	1,10048017	0,017	0,755	54,033	0,245	0,785
	9:30	1,09793896	0,018	0,755	55,902	-0,470	0,805
	10:00	1,09491448	0,019	0,724	57,021	-0,077	0,769
	10:30	1,0906098	0,020	0,764	61,948	2,975	0,827
	11:00	1,08680626	0,021	0,754	64,527	5,226	0,818
	11:30	1,08185911	0,022	0,743	68,235	9,423	0,778
	12:00	1,07846759	0,024	0,743	71,182	11,097	0,779
	12:30	1,07638788	0,024	0,712	71,552	11,467	0,720
	13:00	1,07849706	0,024	0,712	69,712	11,568	0,713

Experimento en condiciones interiores:Condiciones de contorno: Toma de datos: ϑ , H.R., td

Hora	ϑ (°C)	HR (%)	td (°C)
10:00	21,8	69	15,9
10:30	21,6	74	16,8
11:00	21,6	77	17,4
11:30	21,7	78	17,7
12:00	21,7	79	17,9
12:30	22,2	76	17,8
13:00	21,9	79	18,1
13:30	21,9	80	18,3
14:00	21,9	82	18,7
14:30	22	83	19
15:00	22	84	19,2
15:30	22	84	19,2
16:00	22	84	19,2
16:30	22,4	80	18,8
17:00	22,2	84	19,4
17:30	22,1	84	19,3
18:00	22,1	85	19,5
18:30	22,2	85	19,6
19:00	22,2	86	19,8
19:30	22,2	86	19,8
20:00	22,2	86	19,8
20:30	22,2	86	19,8
21:00	22,3	87	20,1
21:30	22,3	87	20,1

22:00	22,3	87	20,1
22:30	22,3	87	20,1
23:00	22,3	87	20,1
23:30	23,4	73	18,3
23:59	22,6	83	19,6
0:30	22,5	85	19,9
1:00	22,4	86	20
1:30	22,4	86	20
2:00	22,4	87	20,2
2:30	22,4	86	20
3:00	22,4	86	20
3:30	22,4	86	20
4:00	22,4	86	20
4:30	22,4	86	20
5:00	22,4	85	19,8
5:30	22,4	85	19,8
6:00	22,4	84	19,6
6:30	22,4	84	19,6
7:00	22,4	84	19,6
7:30	22,4	85	19,8
8:00	22,4	85	19,8
8:30	22,4	84	19,6
9:00	22,6	82	19,4

Toma de datos prototipo: Tª alveolo, H.R. Alveolo,
 Datos derivados: t*alveolo

Hora	Tª Alveolo (°C)	H.R. Alveolo (%)	t*alveolo (°C)
10:00	19,6	80	18,2
10:30	19,7	83	18,7
11:00	19,9	85	19,2
11:30	20	86	19,5
12:00	20,2	87	19,8
12:30	20,5	86	20,0
13:00	20,4	87	20,1
13:30	20,4	88	20,2
14:00	20,5	88	20,3
14:30	20,6	89	20,6
15:00	20,7	90	20,8
15:30	20,8	90	20,9
16:00	20,9	90	21,1
16:30	21,1	89	21,1
17:00	21	90	21,2
17:30	21	90	21,2

18:00	21,1	91	21,4
18:30	21,1	91	21,4
19:00	21,2	91	21,5
19:30	21,2	91	21,5
20:00	21,2	91	21,5
20:30	21,3	91	21,6
21:00	21,3	92	21,8
21:30	21,3	92	21,8
22:00	21,4	92	21,9
22:30	21,4	92	21,9
23:00	21,4	92	21,9
23:30	21,6	91	22,0
23:59	21,5	91	21,9
0:30	21,4	92	21,9
1:00	21,5	92	22,0
1:30	21,5	92	22,0
2:00	21,5	92	22,0
2:30	21,5	93	22,2
3:00	21,6	93	22,3
3:30	21,6	93	22,3
4:00	21,6	93	22,3
4:30	21,6	93	22,3
5:00	21,6	93	22,3
5:30	21,6	93	22,3
6:00	21,6	93	22,3
6:30	21,6	93	22,3
7:00	21,6	93	22,3
7:30	21,6	93	22,3
8:00	21,6	93	22,3
8:30	21,6	92	22,1
9:00	21,6	91	22,0

Toma de datos Prototipo: T^a del agua de los 4 depósitos, T^a de los depósitos centrales (A y B), ΔT de la media de la T^a de los depósitos centrales (A y B) respecto del aire, potencia evaporativa.

	T^a depósitos (°C)					Gradiente térmico Agua-aire	potencia evaporativa
Hora	2 C	2 A	2 B	2 D	T^a Media AB	ΔT P2 (°C)	P (w/m2)
12:00	19,3	18,8	18,7	19	18,75	2,95	58,62
16:00	20,4	20,2	20,2	20,2	20,2	1,8	44,56
23:00	21,5	21,2	21,2	21,2	21,2	1,1	40,74

CAPÍTULO IX

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA:

- ALADRO M. S. *"Estudio de la formación de aerosoles orgánicos secundarios en un modelo fotoquímico mediante experimentos en una cámara de simulación atmosférica"*. Tesis Facultad de ciencias químicas. U. Complutense Madrid, (2013).
- ALLARD F. *"Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook"*. James & James. ISBN:1873936729. Londres. (1998).
- ABBA M. B. *"Pot-in-pot refrigerator, clay pot cooler"*. Nigeria. (1990).
- ANDALUCÍA TEAM. *"Casa Patio 2.12"*. Solar decathlon, Madrid (2012).
- ANDERSSON, M. *"Sexual Selection"*. Princeton University Press. Princeton. (1994).
- ANSI/ASHRAE *"Designation and Safety Classification of Refrigerants"*. Addenda to ANSI/ASHRAE Standard 34-2007. ISSN 1041-2336. Atlanta. (2007).
- ALFARO M. *"Contaminación del aire: emisiones vehiculares, situación actual y alternativas"*. EUNED (1998).
- ALTMANN D., LINDEL U., ROEDER V. *"Lightweight anhydrite plaster - containing lightweight filler instead of sand"* Patente nº DD159323-A, (1981).
- ARREDONDO F. *"Estudio de materiales III. Cales"* 6ª Ed. CSIC. Madrid. (1969).
- ARROSI. *"Boletín técnico del producto: ALUFFIL"*. Elduain (2008).
- ASEOSFAM *"Manual de manipulación de gases refrigerantes"*. Fundación de la energía de la Comunidad de Madrid. (2013).
- ASHRAE. *"Handbook Fundamentals"*. SI Edition. ISBN:1883413451. (1997).
- ASHRAE *"Handbook Refrigeration"*. SI Edition ISBN:1883413540. (1998).
- BABOR J. A., IBARZ A. J., *"Química general moderna"*. Marín. 5ª ed. (1964).
- BAHSLER S. *"Plaster for inside and outside use - Containing specified amount of pumice stone granules as aggregate"*. Pat nº DE3134606-A. (1981).
- BAIRD C. *"Environmental Chemistry"*. 2ª Edición. W. H. Freeman and Company, New York. (1995).
- BANNIER E., CANTAVELLA V., BOU E., CASTELLANO J. *"Inercia térmica de la envolvente de edificios y su influencia en la demanda energética"*. 7º Congreso: greencities & sostenibilidad. Málaga (2012).
- BARBERO M. M. *"Mejora del comportamiento térmico de los morteros de cal aditivados y su empleo en la rehabilitación de inmuebles"*. Tesis doctoral. UPM. Madrid. (2011).

BARBERO M. M., CAMPOS-ACOSTA J., NEILA F. J. "*Reflectance properties analysis of mineral based mortars for renders: Research of their energy performance*". Energy and Buildings. 76. Elsevier B. V. p.615-621. (2014).

BARBEROT E., "*Tratado Práctico de Edificación*", GG. Barcelona, (1927).

BENLLIURE J. "*Los límites territoriales del consumo urbano de agua en la Comunidad de Madrid*". Boletín CF+S 52/53. En defensa de la reflexión pausada. p178-235. Madrid.(2004).

BERDAHL P., FROMBERG R. "*The thermal radiance of clear skies, Solar Energy*". Vol 29-4. P. 299-314 (1982).

BLÄUER-BÖHM C. "*Factors influencing the durability performance of mortars*". Verhoef L.G.W. Wittmann F. H. eds. pp. 105-112 (2000).

BLESA R. "*Conocimientos fundamentales sobre climatización*". CEAC. p.76. Barcelona (1994).

BOMBERG M. "*Testing water vapor transmission: Unresolved issues. in: Water vapor transmission through materials and systems*". ASTM Special Techniciona Publication STP 1039:157-67. (1989).

BURBANO S., BURBANO E., GARCÍA C. "*Física general*" Tiebar 32ª Ed. 9788495447821. Madrid (2003).

BOUKHANOUF R., ALHARBI A., AMER O., IBRAHIM H. G. "*Experimental and Numerical Study of a Heat Pipe Based Indirect Porous Ceramic Evaporative Cooler*". International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 6, No. 2, (2015).

BOWMAN N. T., LOMAS K. J., COOK M. J., EPPEL H., ROBINSON D., FORD B., DIAZ C., WILTON O., CUCINELLA M., BADANO E., BOMBARDI F., FRANCIS E., GALATÀ A., LANARDE P., BELARBI R., RODRÍGUEZ E., ÁLVAREZ S. "*The Application of Passive Downdraught Evaporative Cooling (PDEC) to Non-domestic Buildings*". Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University, Reino unido. (1998).

BOYNTON R. S., "*Chemistry and Technology of Lime and Limestone*". Wiley & Sons, Nueva York, (1980).

BRA (British refrigerant Association). "*Guide to Flammable Refrigerants*". Nº 1. (2012).

BRAMSON M. A. "*Infrared radiation : A handbook for applications, with a collection of reference tables*". Plenum Press. N. Y. (1968).

BRECKER A., FERRANDO E., De Los REYES S., SAGASTA A., TERMENS M., VELERO P., VICENTE S. "*¿Qué? : construcción ecológica, criterios, ayudas, materiales, energías, agua*". Ceder Aitana. ISBN 8460737365. (2001).

De BUSTAMANTE I. SANZ J. M., IGLESIAS J. A., LÓPEZ-CAMACHO B. "*Some examples of Spanish qanats*". UAH p17-29 (2004).

CAMARGO, J.R., EBINUMA C.D., SILVEIRA J.L., "*Thermoeconomic analysis of an evaporative desiccant air conditioning system*". Applied Thermal Engineering,. 23(12): p. 1537-1549. (2003).

CAMPOS D.F. "*Procesos del ciclo hidrológico*". 3ª Ed. Universidad de San Luís de Potosí. Facultad de Ingeniería. México (1998).

CARO T, IZZO A, REINER JR R. C. WALKER H, STANKOWICH T. "*The function of zebra stripes*". Nature Communications 5 doi:10.1038/ncomms4535. (2014).

CAZALLA O. "*Morteros de cal. Aplicación al patrimonio histórico*". Tesis doctoral. Universidad de Granada. (2002).

CHAKRABORTY J., FONSECA E. "*Analysis and evaluation of a passive evaporative cool tower in conjunction with a solar chimney*" PLEA proceedings. 22nd Conference on passive and low energy architecture. ISBN 9953418691. Beirut, Líbano. (2005).

CHANDRA A. R. " *Refrigeration and Air Conditioning*" PHI Learning private limited. ISBN: 9788120339156. Nueva Delhi. (2010).

CHANDRA S., BERNTSSON L., SVÄRD A. "*Restoration of the Torpa stone house*". Verhoef L.G.W.. Wittmann F. H., eds. pp. 123-133 (2000).

CHANG C. L., CHO I. K., LI Q. X., "*Insecticidal Activity of Basil Oil, trans-Anethole, Estragole, and Linalool to Adult Fruit Flies of Ceratitis capitata, Bactrocera dorsalis, and Bactrocera cucurbitae*". Journal of Economic Entomology. 102 (1), p.203-209. (2009).

CHANG S.C., HUTCHEON N. B., "*Dependence of water vapor permeability on temperature and humidity*" ASRAE Transactions 62: 437. (1956).

CHOW V.T., MAIDMENT D.R, MAYS L.W. "*Hidrología aplicada*" McGrawHill (1994)

CHT: Confederación Hidrográfica del Tajo. "*Plan hidrológico de la cuenca del tajo 2011*". Confederación hidrográfica del Tajo. Ministerio del medio ambiente y medio rural y marino (2011).

CHT: Confederación Hidrográfica del Tajo. "*Plan Hidrológico de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo (Ciclo de Planificación 2009-2015)*".Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. (2014).

CIAMPI M., LECCESE F., TUONI G., "*Ventilated façades energy performance in summer cooling of buildings*". Solar Energy N. 75. Pp 491–502. (2003).

CLOUDSLEY-THOMPSON, J. L.. "*How the zebra got his stripe – new solutions to an old problem*". Biologist 31, 226-228. (1984).

COLES A. JACKSON P. "*Windtower*" Stacey International, ISBN: 1905299249 2007 Virginia (2007).

CORONEL J. F. "*Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor*". US. Sevilla (2014).

Comisión Europea. *"Opinion of the Scientific Committee on Food on Estragole (1-Allyl-4-methoxybenzene)"* Comité científico de los alimentos. Directorio general de salud y protección al consumidor. Bruselas. (2001).

Comisión Europea. Unión Europea. <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/financing-energy-efficiency>>. Fecha de consulta: 22/07/2015.

CURRY, J.A., WEBSTER, P.J., *"Thermodynamics of atmospheres and oceans"*, Academic Press, (1999)

CYII *"Informe anual 2012"* Canal de Isabel II Gestión. Madrid(2012).

DAFEDAR, M.A, NAJEEM M, FAKRUDDIN Y, CHIRAG P. *"Heat transfer augmentation in different geometries of dimpled surface under natural convection an experimental approach"*. International Journal of Research in Engineering and Technology. ISSN: 2319-1163 Bijapur, India. (2013).

DCA US Departamento de Construcciones Arquitectónicas de la Universidad de Sevilla *"Estudio de Dosificaciones y tipos de Mortero de Cal Artesanal"* Ficha Técnica & Manual de Aplicación mortero cal base. Graphenstone (2015)

DEFRAEYE T., BLOCKEN B., CARMELIET J. *"Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling"*, Energy Conversion & Management 52 (1), 512-522. (2011).

DÍEZ A., CHAPARRO I., GARCÍA B., GOZALO J.. *"Atlas House"*. Solar decathlon. ETSA UPV (2010).

ECHARRI V., GARCÍA J.M., GONZÁLEZ A. B., LÓPEZ F. J. *"Cerámica y eficiencia energética: Sistemas de acondicionamiento pasivos y activos"*. Qualicer 10, XI congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico. Castellón (2010).

ESTEBAN J.L. *"La arquitectura popular como base de una Arquitectura bioclimática. Aplicación al Enfriamiento pasivo"* Informes de la Construcción, Vol. 38, nº 385, (1986).

FATHY H. *"Natural energy and vernacular architecture. Principles and examples with reference to hot arid climates"* UNU (1986)

FENERCOM *"Guía sobre hidroeficiencia Energética"* Gráficas Arias Montano S.A. Comunidad de Madrid. (Móstoles). (2012).

FITZGERALD D. *"Evaporation"* Trans, ASCE, 15, pp. 581-646. (1886).

FLORES F. *"Fabricación, monitorización y caracterización de un equipo de aire acondicionado de bajo impacto ambiental, utilizando un sistema combinado: refrigerador evaporativo cerámico y tubos de calor REC-TC"*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, España. (2008).

FLORES F., HERNÁNDEZ J., REY F. VELASCO E., TEJERO A. *"Acondicionamiento de espacios con enfriamiento evaporativo mediante ladrillos cerámicos"* Ingeniería mecánica tecnología y desarrollo vol.4 no.1, 001-014. (2011).

FORBES B., SHAM D. F., WEISSFELD A. S. "Bailey & Scott; Diagnóstico microbiológico". Panamericana 12ª ed. ISBN 9789500682435. Buenos Aires. (2009).

FORD, B. "*Evaporative Cooling at Malta Stock Exchange*" 'EcoTech' Architecture Today, pp 14 – 17 nº5 Londres. (2002).

FOX R.W., McDONALD A. T. "*Mecánica de fluidos*" 2ª Ed. McGraw Hill, (1989).

FRANCINI J.B., FINNEMORE E.J. "*Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*" 9ª Ed. McGraw Hill. Madrid (1999).

FURLAN V. "*Experiences pratiques avec des crépis a base de chaux*" Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of historic Buildings. ICCROM, pp. 9-18. Roma. (1982)

FURLAN V., KOHLER N., "*Les différents types de crépis et enduits extérieurs*". Chronique des matériaux de construction nº 7. (1981).

GAN, G. "*A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings*". Energy and Buildings 27, 37–43. (1998).

GARCÍA S. "*Metodología del diagnóstico de humedades de capilaridad ascendente y condensación higroscópica en edificios históricos*" (Tesis doctoral) Madrid. ETSAM, (1995).

GELLERT R. HAN K, GLUECK G, NAEGUELE D, HOHWILLER F. "*Light plaster for thermal insulating wall cladding*". Pat. DE19802230-A1, (1999).

GHIABAKLOU Z., BALLINGER J. A. "*A passive evaporative cooling system by natural ventilation*". Building and environment Vol. 31, No. 6, pp. 503-507. (1996).

GHIABAKLOU Z. "*Thermal comfort prediction for a new passive cooling system*". Building and environment 38, 883-891. (2003).

GIANCOLA, E. "*El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas*". (Tesis doctoral) ETSAM,. 219p Madrid.(2010).

GIVONI B. "*Passive low energy Cooling of Buildings*". John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-28473-4. (1994).

GIVONI B. "*Climate Considerations in Building and Urban Design*". John Wiley & Sons, Inc. Nueva York. (1998).

GONZÁLEZ-CRUZ E. M., GONZÁLEZ-GARCÍA S.I. "*Estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un nuevo tipo de techo-estanque para el enfriamiento pasivo en clima húmedo*". Ambiente construido. vol.13 nº4. Porto Alegre. (2013).

GÖBEL P. "*Evaporation measurements on enhanced water-permeable paving in urban areas*". 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh (2008)

GOFORTH M. A., GILCHRIST G. W., SIRIANNI J. D., "*Cloud effects on thermal downwelling sky radiance*". AeroSense 2002, International Society for Optics and Photonics (2002).

GUERRA J.J., CEJUDO J. M., MOLINA J. L., ÁLVAREZ S., VELÁZQUEZ R. *"Evaluación del proyecto EXPO'92: Control climático en espacios abiertos."* CIEMAT. ISBN: 8478342583. Madrid. (1995).

GUT P. ACKERKNECHT D. *"Climate Responsive Building - Appropriate Building Construction in Tropical and Subtropical Regions"*. SKAT. ISBN: 3-908001-39-0. St. Gallen (1993).

GUTIERREZ A., PICATOSTE J. R. *Evidencias del cambio climático y sus efectos en España*. PNACC (Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático) NIPO: 280-12-108-1 (2012).

HAMILTON, W. D., ZUK, M. *"Heritable true fitness and bright birds, a role for parasites?"*. *Science* 218, 384-387. (1982).

HANSEN E. F., RODRÍGUEZ-NAVARRO C., VAN BALEN K. *"Lime Putties and Mortars: Insights into Fundamental Properties"*. *Studies in Conservation* Vol. 53, No. 1, pp. 9-23. (2008).

HARGREAVES G.H., ALLEN, R.G. *"History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation"*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* v.129, n.1, p.53-63, Reston, (2003).

HE J., HOYANO A. *"Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability"*. Tokyo Institute of Technology. Yokohama. Japón (2008).

HENSEL M., GHARLEGHI M. *"Iran: Past, present and future"*. *Architectural design* 217. ISSN 0003-8504. Londres. (2012).

HERNÁNDEZ A. *"NTP 538: Legionelosis: medidas de prevención y control en instalaciones de suministro de agua"* Instituto Nacional de seguridad e higiene en el trabajo. (1999).

HERRERO, J., MILLARES, A., AGUILAR, C., DÍAZ, A., POLO, MJ, LOSADA, M. *"WiM-Med 1.0 Base teórica"*. GD de Flujos Ambientales, ECAMA, CEAMA, Universidad de Córdoba (2009).

HINCKLEY J. *"The Big Book of Car Culture: The Armchair Guide to Automotive Americana"*. MotorBooks/MBI Publishing Company. (2005).

HOEKSTRA, A.Y. *"Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade"*, IHE Delft, (2003).

HOLMAN J. P., *"Transferencia de calor"* CECSA, México. (1986).

HORVÁTH G, VARJÚ D. *"Polarized Light in Animal Vision. Polarization Patterns in Nature"*. Springer-Verlag. ISBN: 3-540-40457-0. (2004).

HORVÁTH G., MAJER J., HORVÁTH L., SZIVÁK I. KRISKA G. *"Ventral polarization vision in tabanids, horseflies and deerflies (Diptera, Tabanidae) are attracted to horizontally polarized light"*. *Naturwissenschaften* 95, 1093-1100. (2008).

HORVÁTH G., BLAHÓ M., KRISKA G., HEGEDÜS R., GERICS B., FARKAS R., ÅKESSON S. *"An unexpected advantage of whiteness in horses, the most horsefly-proof horse has a depolarizing white coat"*. *Proc. R. Soc. B* 277, 1643-1650. Londres. (2010).

- HORVÁTH G., EGRI Á., BLAHÓ M., KRISKA G., FARKAS R., GYURKOVSKY M., ÅKESSON S. "*Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes*". J. Exp. Biol. 215, 736-745. (2012).
- HORTON R. E. "*Analysis of runoff plot experiments ith varying infiltration capacity*". Trans. Am. Geophhys. Union 20 (IV), 683-694. (1939).
- HU W., BECKER N., MCMICHAEL T., TONG S. "*Heat-related Mortality during Summer in Sydney. Australia, 1990-2004*." Epidemiology, 18(5), S113-S114. (2007).
- HYLAND R. W., WEXLER A. "*Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173,15K to 473,15K*". ASHRAE Transactions 89 (2A). p. 500-519 (1983b).
- IBRAHIM E., SHAO L., RIFFAT S. B. "*Performance of porous ceramic evaporators for building cooling application*". Energy and Buildings, 38, pp. 941-949.(2003).
- IDAE "*Guía técnica, Torres de refrigeración*" Ahorro y eficiencia energética en Climatización. MITC. ISBN: 978-84-96680-09-8. Madrid (2007).
- INCROPERA, F. "*Fundamentos de transferencia de calor*". 4ª ed. Prentice Hall. ISBN:970-17-0170-4. Mexico (1999).
- INE. "*Encuesta sobre el Suministro y Saneamiento del Agua: año 2012*". Notas de prensa. <<http://www.ine.es/prensa/np872.pdf>> (2014).
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo "*Legionella pneumophila*" Databio. Fichas de agentes biológicos. (2012).
- INHOBE. Sociedad pública de gestión ambiental. *Guía de edificación ambientalmente sostenible en edificios comerciales en la comunidad autónoma del país vasco*. Bilbao.(2009).
- IRIBARNE J.V., GODSON W.L."Atmospheric Thermodynamics" Kluwer Academic Publishers. (1981)
- Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) en relación a los niveles de mercurio establecidos para los productos de la pesca.* Revista del comité científico nº 13. Número de referencia: AESAN-2010-008. (2010).
- JOHNSON J.A., HEIDENREICH J. J., MANTZ R.A., BAKER P.M., DONLEY M.S. "*A multiple scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings*" Progress in Organic Coatings, Vol. 47, 3-4. pp. 432-442. (2003).
- JUMP A, HUNT J Y PENUELAS J. "*Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of Fagus sylvatica*". Global Change Biology 12: 2163-2174. (2006).
- KAHAN S. "*Módulo: Aire húmedo*" Instituto de Física. Facultad de Ingeniería. Universidad de la República. Uruguay (2004) En:<<http://es.scribd.com/doc/261140945/Aire-Humedo#scribd>> Fecha de consulta: 19/10/2015.
- KAHN M, KAHN B. "*ECOOLER Ceramic natural cooling system*." Studiokahn. disponible en: <<http://ecooler.yolasite.com/how.php>> Fecha de consulta: 09/10/2015. Israel. (2010).

"Kaikaku" disponible en:

<<http://kaikaku.es/>> Fecha de consulta: 09/10/2015.

KARATASIOS I., KATSIOTIS M. S., LIKODIMOS V., KONTOS A. I., PAPAVALASSIOU G., FALARAS P., KILIKOGLU V., *"Photo-induced carbonation of lime-TiO₂ mortars"* Applied Catalysis B-Environmental, vol. 95, nº 1-2. (2010-B).

KAVEH A., AZAMI A., *"Sustainability Analyses of Passive Cooling Systems in Iranian Traditional Buildings approaching Wind-Catchers"*, Recent Advances in Energy, Environment and Development. ISBN: 978-1-61804-157-9, pp.124-129.. (2013).

KEITZ, H. A. *"Cálculos y medidas en luminotecnía. Introducción al sistema de cantidades y uniddes usado en luminotecnía y fotometría"*. Editorial Paraninfo. Madrid. (1974).

KERN C. D. *"Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites"* Tesis doctoral. Air force cambridge research labs I g hanscom field mass. AD0629081. (1964).

KINGDON, J. *"The zebra's stripes: an aid to group cohesion"*. The Encyclopedia of Mammals (ed. D. MacDonald), pp. 486-487. Oxford: Equinox. (1984).

KITTAS C., BARTZANAS T., JAFFRIN A., *"Temperature Gradients in a Partially Shaded Large Greenhouse equipped with Evaporative Cooling Pads Biosystems Engineering"*. SE-Structures and Environment 85 (1), p. 87-94. (2003).

KNOBLOCH K., PAULI A., IBERL B., WEIGAND H. WEIS N. *"Antibacterial and antifungal properties of essential oil components"*. Journal of Essential Oil Research 1: 119-128. (1989).

KOENIGSBERGER O. H., INGERSOLL T. G., MAYHEW A., SZOKOLAY S.V. *"Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales"* Paraninfo. Madrid (1997).

KONTOS A. G., PELAEZ M., LIKODIMOS V., VAENAS N., DIONYSIOUB D. D., FALARAS P., *"Visible light induced wetting and nanostructured N-F Co-doped titania films"* Photochemical and photobiological Sciences, Vol 10, nº3 (2011).

KONTOS A. G., KATSANAKI A., MAGGOS T., LIKODIMOS V., GHICOV A., KIM D., KUNZE J., VASILAKOS C., SCHMUKI P., FALARAS P., *"Photocatalytic degradation of gas pollutants on self assembled titania nanotubes"* Chemical physics Letters Vol. 490, nº 1-3 p.58-62 (2010).

KOU J. I., WU F. M., LU H. J., XU Y. S., SONG F. Q. *"The effective thermal conductivity of porous media based on statistical self-similarity"* Physics Letters A, Vol. 374 p. 62-65. (2009)

KRAVCÍK M. POKORNÝ J., KOHUTJAR J, KOVÁC M, TÓTH E. *"Water for the Recovery of the Climate" - A New Water Paradigm* . Žilina (2007).

KRAVCÍK *"Water for the Recovery of the Climate – A New Water Paradigm"*. Conferencia Expo Zaragoza 23 Ago. (2008).

LANIK. *"Vukopor A. Ceramic foam filters Technical data sheet"*. Boskovice.(2012).

LARISON B, HARRIGAN R. J, THOMASSEN H A., RUBENSTEIN D I., CHAN-GOLSTON A M., LI E, SMITH T B. "How the zebra got its stripes: a problem with too many solutions" R. Soc. open sci. 2: 140452. (2014).

LAWTON R., ALEXANDER L., SETZER W., BYLER K. "Floral essential oil of *Guettarda poasana* inhibits yeast growth". Biotropica 25: 483-486. (1993).

LEE J. R., LEE S. H., KUBO I. & HONG S. D. "Antifungal activity of medium chain (C-6-C-13) alkenals against, and their inhibitory effect on the plasma membrane H⁺-ATPase of *Saccharomyces cerevisiae*". Journal of Microbial Biotechnology 8: 197-202. (1998).

LEON A. "El Grafeno en Revestimientos y Morteros". V Encuentro-Edificación 07/25 UPM en <www.virtualencounters.org> Publicado el 14 abr. (2015).

De LIETO A., GALLI G., VALLATI A. "CFD Analysis of Convective Heat Transfer Coefficient on External Surfaces of Buildings". Sustainability 7, ISSN 20711050 (2015).

LINDE. Natural refrigerants overview brochure. <www.linde-gas.com/refrigerants> Fecha de consulta: 6/03/2015.

LLOP S, PORTA M. "Estudio de la evolución de la exposición a plomo en la población infantil española en los últimos 20 años. ¿Un ejemplo no reconocido de salud en todas las políticas?". Gaceta Sanitaria 27:149-55 (2013)

LÓPEZ, A., FERNÁNDEZ, F., MORENO A., *El clima urbano. Teledetección de la isla de calor en Madrid*. Ministerio de Obras públicas y Transportes, Serie Monografías, 230 pp. Madrid (1993).

LOUW, G. N. "Physiological Animal Ecology". Longman. New York (1993).

MACHADO DE BITTENCOURT D.M. "Arquitetura de pedra e cal no literal sul e vale do Jacuí, nos séculos XVII e XVIII: Colônia do Sacramento, Rio Grande, Viamão e Santo Amaro" EDUNISC. Santa Cruz do Sul. (2007).

MAISOTSENKO V., CALISKAN H., HEPBASLI A., DINCER I. " Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle" International Journal of Refrigeration. (2011).

MALINOWSKI R., "Ancient mortars and concretes - Durability aspects" Symposium Proceedings on Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, ICCROM pp. 341-350, Roma. (1982).

MARAVELAKI N., LIONAKIS E, KAPRIDAKI C, AGIOUTANTIS Z, VERGANELAKI A, PERDIKATSIS V. "Characterization of hydraulic mortars containing nanotitania For restoration applications." 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. (2012).

MARDOMINGO A. "Fundamentos de aire acondicionado". 1ª Ed. Bellisco. ISBN: 84-85.198-76-X. Madrid (1998).

MARGALHA, M. G., SILVA, A. S., DO ROSÁRIO VEIGA, M., DE BRITO, J., BALL, R. J. AND ALLEN, G. C. "Microstructural changes of lime putty during aging". Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (10), pp. 1524-1532. (2013).

MARTÍN C, LÓPEZ P, FIESTAS A. *"Instalaciones del Pabellón de España en la Expo 2008"* Informes de la Construcción. Vol. 61, 515, 5-22, ISSN: 0020-0883. (2009).

MARTIN A. *"Apuntes de Transmisión de calor"*. UPM. ETSAM. (2011).

MARTIN S., CAÑAS I. *"Study of vernacular architecture in Spanish areas of extreme climate for de selection of bioclimatic design strategies"* PLEA proceedings. 22nd Conference on passive and low energy architecture. ISBN 9953418691. Beirut, Líbano. (2005).

MARTINS A. J., TEIXEIRA V., CARNEIRO J., NASCIMENTO J. H. O., *"Hydrophobic-hydrophilic properties of titanium dioxide thin films"* NanoSpain (2008).

MARTINS A. C. *"Passive downdraught evaporative cooling and water re-use: strategies for low income housing"* PLEA proceedings. 22nd Conference on passive and low energy architecture. ISBN 9953418691. Beirut, Líbano. (2005).

MARTÍNEZ, I., *"Termodinámica del agua"*, en dos partes: IAA 365, pp. 31-43, y IAA 366 pp. 11-21, (2001).

MARTÍNEZ, I. *"Termodinámica de la atmósfera"*. IAA. Ingeniería aeronáutica y astronáutica ; pp. 28-39. ISSN 0020-1006. (2010)

MARTINEZ M. *"Legionelosis"* UNED. Vigilancia epidemiológica. XI Curso experto universitario en epidemiología y nuevas tecnologías. (2011).

MATTEINI M., MOLES A. *"La química en la restauración, los materiales del arte pictórico"* Editorial Nerea, Edición promovida por el Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico. Guipúzcoa (2001).

McKINSEY & COMPANY. *"Pathways to a low-carbon Economy "*. Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve. Informe Mckinsey (2007).

MELERO. S. *"Estudio de la eficacia del enfriamiento evaporativo en piezas cerámicas porosas para su aplicación en la arquitectura"*. (2010).

MENDES N, PHILIPPI P. C. *"A method for predicting heat and moisture transfer through multilayered walls based on temperature and moisture content gradients"* International journal of Heat and Mass transfer, vol 48. p. 37-51. (2005).

MEYER A. F. *"Computing runoff from rainfall and other physical data"* Am Soc. Civil engineers Trans. V 79, p 1056-1224. (1915).

Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *"Boletín oficial de la propiedad industrial. Tomo II: Invenciones"* Oficina Española de Patentes y Marcas. ISSN: 1889-1292. (2016).

Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad. *"Equipos de enfriamiento evaporativo"*. Disponible en:
<http://www.msssi.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/agenBiologicos/pdfs/7_leg.pdf>
(Fecha de consulta: 27/10/2015)

MIRANDA A. L., *"Tubos de calor: Una tecnología para el siglo XXI"* CEAC. ISBN 84-329-1094-5 Barcelona. (2005).

MOHAN D. M. MIMI S. *"Hydrology"* Phi learning pvt. ISBN:9788120337077 p. 372 . Nueva Delhi (2009).

MONTERO E. *"Manual básico Fachadas ventiladas y aplacados. Requisitos constructivos y estanqueidad"* Consejería de Obras Públicas, Vivienda y Transporte de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. 13p. (2007).

MORA M, LÓPEZ G, BENGOCHEA M. A, LÓPEZ P. A. *"Cuantificación de la eficiencia de la fachada cerámica ventilada mediante técnicas de la mecánica de fluidos computacional"* Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. Vol. 50. 104p. (2011).

MORENO et al. *"Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático"*. Ministerio de Medio Ambiente I.S.B.N.: 84-8320-303-0 (2005).

MORILLO B. *"Prototipo de placa cerámica evapotranspiradora para edificios en climas cálidos."* Congresos internacional E4R. Madrid (2012).

MORRIS, D. *"Animal Watching. A Field Guide to Animal Behavior"* Jonathan Cape. Londres (1990).

MÜLLER L., KASPER P., MÜLLER-TEGETHOFF K. AND PETR T., *"The genotoxic potential in vitro and in vivo of the allyl benzene etheric oils estragole, basil oil and trans-anethole"*. *Mutation Research*, 325 (4), 129-136. (1994).

MUÑOZ J., ESPINOZA F.J., *"Fabricación y caracterización de espumas cerámicas base Al_2O_3 obtenidas a partir de vaciado de suspensiones "* Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Cerámicas Multifuncionales. En <https://qro.cinvestav.mx/~ceramics/espumas.htm> Fecha de consulta 23/11/2015

MUSA M. *"Novel evaporative cooling systems for building applications"* tesis doctoral. Univ. Nottingham (2008).

NEILA, F. J. *"Arquitectura Bioclimática en un entorno sostenible"*. Ed. Munilla-Leira. ISBN-84-89 150-64-8. Madrid, (2004).

NEILA F. J., BEDOYA C. *"Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental"* Munilla-Lería. ISBN 84 89150 20 6. Madrid.(1997).

NEWSOM S., GIBBONS P., BROWN S., *"External lime coatings on traditional buildings"*, Historic Scotland Technical advice note nº15, Edinburgh, (2001).

NØRGAARD T., DACE M. *"Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles."* *Front. Zool.* doi: 10.1186/1742-9994-7-23. (2010).

NOWAK H. *"The sky temperature in net radiant heat loss calculations from low-sloped roofs"*. *Infrared Physics*, Vol. 29, 1-4, P. 231-232 (1989).

OKE T.R. *"City size and the urban heat island"*. *Atmospheric Environment* 7: 769-779. (1973)

OKE T. R. *"Towards Better Scientific Communication in Urban Climate."* *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), 179-190. (2006)

PACHECO-TORGAL F, LABRINCHA J, CABEZA L, GRANQVIST C.G. *"Eco-efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs: Design, Properties and Applications"* Woodhead Publishing, 550p. (2015).

PALOMAR D. *"Panel para enfriamiento evaporativo indirecto de fachadas"* Patente P201530598. (2015).

PALOMAR D., ACHA C. A., GARCÍA S. *"Determinación del flujo energético en el interior de una cámara ventilada de mortero de cal mediante el principio de flotabilidad"*. REIA #06. Universidad Europea. p:121-135. ISSN: 2340-9851. Madrid. (2016).

PARTON H.J., LOGAN. J.A.. *"A model for diurnal variation in soil and air temperature"*. Agricultural Meteorology nº 23 p. 205-216. Elsevier. Amsterdam (1981).

PEIRIS M. G. C., TENMAKONE K. *"Rate of rise of a liquid in a capillary tube"*. Am. J. Phys. 48 (5), pp. 415 (1980).

PENMAN H. L. *"Natural evaporation from open water, bare soil and grass"*. Proc. Soc. Londres nº 1032, 193:120-145, (1948).

PHDC *"Jornada sobre Enfriamiento evaporativo pasivo e híbrido en edificios"* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. CSIC Madrid. Noviembre. (2008).

PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). *Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono*. Sexta edición. ISBN 978-92-807-2770-8. Kenia. (2006)

PRADO A., GUERRA M., *"Manuales y normas del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. Revestimientos continuos conglomerados"*. Patronato Juan de la Cierva de investigación Técnica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid. (1962).

PRESAS M., PASTOR J.Y., LLORCA J. *"Comportamiento mecánico de espumas cerámicas de SIC"*. Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II Madrid. (2006).

PUMA *"Morcem estuco grueso"* Disponible en: <<http://www.grupopuma.com/es/productos/morteros-de-decoracion/morcem-estuco-grueso-es>> Fecha de consulta: 25/9/2014.

QIU, G.Q., RIFFAT S.B., *"Novel design and modelling of an evaporative cooling system for buildings"*. International Journal of Energy Research. 30(12): p.985-999. (2006).

RAGUSO R A., PICHESKY E. *"A day in the life of a linalool molecule: Chemical communication in a plant-pollinator system. Part 1: Linalool biosynthesis in flowering plants"*. Plant Species Biology. 14, 95-120. (1999).

Regional Centre for Energy Policy Research (REKK) *"Opportunities of large scale energy efficiency programs in Hungary. Potential funding - possible impacts"*. (2011).

RATHEE A., MITROFANOVA E., SANTAYANON P. *"Hydroceramic_hydrogel."* Digital Matter-Intelligent constructions. Instituto de arquitectura avanzada de Cataluña. Disponible en

<<http://www.intelligentconstructions.com/projects/hydroceramic>> Fecha de consulta: 26/10/2015. España. (2014).

REICHEL A., HOCHBERG A., KÖPKE C., *"Enlucidos, revocos, pinturas y recubrimientos"*, GG, Barcelona, (2004).

RODRÍGUEZ-NAVARRO c., HANSEN E., GINELL W. S. *"Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty"* Journal of the American Ceramic Society, Vol. 81, nº 11, pp. 3032-3034. (1998).

ROHWER C. *"Evaporation from free water surface"* USDA, Tech. nº 271 (1931).

SANTAMOURIS, M. ASIMAKOPOULOS D., *"Passive Cooling of Buildings"*. James & James. ISBN:9781873936474. Londres. (1996).

SANTOS G. C. *Estudio de las posibilidades de adecuar los procesos de absorción y evaporación del agua por los revestimientos de fachadas en los procesos de lluvia cara a la mejora del microclima urbano*. Trabajo fin de master. UPC. Barcelona (2014).

SCHECTER J. *"Cold Spot: Evaporative Cooling through Ceramics"* disponible en: <<http://climatecolab.org/plans/-/plans/contestId/1301101/planId/1313914>> Fecha de consulta: 17/11/2015. Cambridge. UK. (2015).

SCHEFFLER M, WEINHEIM P. C. *"Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications"*. Wiley-VCH. Weinheim. (2005).

SCHIANO-PHAN, R. *"The Development of Passive Downdraught Evaporative Cooling Systems Using Porous Ceramic Evaporators and their application in residential buildings"*, The 21^a Conference on Passive & Low Energy Architecture, Eindhoven, Netherlands, 19-22 ISBN: 9038616368 Vol. 2, pp. 1249-1254. (2004).

SCHMIDT M. *"The contribution of rainwater harvesting against global warming"* Universität Berlin, IWA Publishing, researchgate.net. London, UK, (2006).

SEESE, W S, DAUB G. W. *"Química"*. 5^{Ed}. Prentice-Hall Hispanoamericana (1989).

SHAH, NIHAR. *"Cooling the Planet: Opportunities for Deployment of Superefficient Room Air Conditioners"*. Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL Paper LBNL-6164E. (2014).

SHAMES I. H. *"Mecánica de fluidos"* 3^a Ed. McGraw Hill. ISBN 9586002462. Colombia. (1995).

SHARIFI E., LEHMANN S. *"Comparative Analysis of Surface Urban Heat Island Effect in Central Sydney"* Journal of Sustainable Development; Vol. 7, No. 3; 2014. ISSN 1913-9063 (2014)

SICKELS L.B. *"Organics vs. Synthetics: Their Use as Additives in Mortars"*, Symposium Proceedings on Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, ICCROM pp. 25-52, Roma. (1982b).

SIEGEL R., HOWELL J., *"Thermal radiation heat transfer"*, Taylor & Francis 4^a Ed. NY. (2002).

SILVA L. M., RIBEIRO R. A., LABRINCHA J. A. FERREIRA V. M. *"Role of light fillers on the properties of a mixed-binder mortar"* Cement and Concrete Composites, nº 32, pp. 19-24 (2010).

SMITS A. J. *"Mecánica de fluidos, Una introducción a la física"* Alfaomega. Mexico D.F.(2003).

STRASSBURGER, E. *"Tratado de Botánica"*. Omega 8.ª ed. 1088 p. Barcelona. (1994).

STREETER V. L., WYLIE E. B., BEDFORD K.W. *"Mecánica de fluidos"* 9ª Ed. McGraw Hill, Santafé de Bogotá. (2000).

SWINBANK W.C., *"Long-wave radiation from clear skies," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 89.381. P.339-348. (1963).

TREMPS E. *"Mecánica de fluidos(Teoría y problemas)"* Ed. UPM. ISBN: 978-84-96398-24-5 (2007).

TRIBUTSCH, H. *"How life learned to live"*. Cambridge, MA: The MIT Press. 218 p. (1984).

Unión Europea. *"Reglamento (CE) nº 473/2008 de la Comisión, de 29 de mayo de 2008, por el que se modifica el Reglamento (CE) nº 2037/2000 del Parlamento Europeo y del Consejo en lo relativo a la adaptación de los códigos NC de determinadas sustancias que agotan la capa de ozono y de mezclas que contienen sustancias que agotan la capa de ozono"*. «DOUE» núm. 140, (2008).

Unión Europea *"Directiva 2010/31/UE del parlamento europeo y del consejo de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios (refundición)"*, Diario Oficial de la Unión Europea (2010).

Unión Europea *"Horizon 2020"*. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. ISBN 978-92-79-38915-3 Luxemburgo. (2014).

VARÓ P., SEGUÍ R., SEGURA M. *"Evaluación de riesgo en instalaciones con probabilidad de proliferación y dispersión de Legionella"* ECU. ISBN 978849948147. San Vicente (2010).

VELASCO E., REY F.J., VARELA F., MOLINA M.J., HERRERO R. *"Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler"*. International Journal of Refrigeration, nº 28 pgs. 654–662. (2005).

VICENTE M. A *"Mecanismos de alteración en materiales pétreos"* Jornadas sobre restauración y conservación de monumentos, pp. 25-29. (1991)

VICENTE-SERRANO S.M., LASANTA T., GRACIA C. *"Aridification determines changes in forest growth in Pinus halepensis forests under semiarid Mediterranean climate conditions."* Agricultural and Forest Meteorology 150: 614-628. (2010).

THEVENOT R., FIDLER, J.C. *"A history of refrigeration throughout the world"*. International Institute of Refrigeration. 476 p. Paris (1979).

THORNTON C. W. HOLZMAN B. *"Measurement of evaporation from land and water surface"* USDA, Tech nº 817 (1942).

VAN RENTERGHEM. T. M. 2013. *"The potential of building envelope greening to achieve quietness."* Build. environ. 61, 34-44. (2013).

WANG R, HASHIMOTO K., FUJISHIMA A., *"Light-induced amphiphilic surfaces"* Nature. Vol 388.(1997).

WANG S. K. *"Handbook of air conditioning and refrigeration"*. 2ª ed. McGraw-Hill. ISBN: 0-07-068167-8. Nueva York. (2000).

WEIDENHAMER J., MACIAS F., FISCHER N. WILLIAMSON G. B. *"Just how insoluble are monoterpenes?"* Journal of Chemical Ecology 19: 1799-1807. (1993).

WHITE F. M., *"Mecánica de fluidos"* 5ª Ed. McGraw Hill, Madrid. (2004).

WILSON J. D., BUFFA A J. *"Física"* 5ª Ed. Prentice Hall, ISBN: 9789702604259. México (2003).

WOLFE W. L., ZISSIS G. J., *"The infrared handbook"*, Office of Naval Research, Department of Navy, Washington, D. C. (1985).

WONG N. H. *"Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls"*. Build Environ. 45, 411-420. (2010a).

WONG N. H. *"Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls"*. Build Environ. 45 (3), 663-672. (2010b).

WSP Environmental. *"Passive Downdraught Evaporative Cooling using porous ceramic in non-domestic buildings - Development of key components (Evapcool). Final Report"*, EC Project. (2003).

WULFF H. E. *"The Qanats of Iran"* Scientific american. (1968).

YARKE E.R. *"Ventilación natural de edificios"* Nobuko. ISBN 987-584-036-X. Buenos Aires.(2005)

ZHOU F. *"Studies on the heat/mass transfer characteristics and fluid structure in a square internal cooling channel with dimpled surfaces"* Tesis doctoral (Department of Mechanical Engineering), Louisiana State University P. 51 (2007).

Normativa:

UNE-EN 459-1 *"Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterio de conformidad."* Madrid. (2011).

UNE-EN 934-2:2010+A1:2012 *"Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado"*. (2012).

UNE-EN 998-1. *"Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido"*. (2010)

UNE EN 998-2. *"Especificaciones de los morteros para albañilería, parte 2-Morteros para albañilería"*. (2004).

UNE-EN 1015-7. " *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 7: Determinación del contenido en aire en el mortero fresco.*". (1999).

UNE-EN 1015-18. " *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido.*". (2003).

UNE-EN 1015-19. " *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 19: Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido.*". (Versión confirmada en fecha 2014).

UNE-EN ISO 6946. " *Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo. (ISO 6946:2007)*" (2012). (Versión corregida en fecha 2015-07-01).

UNE-EN 13914-1. " *Diseño, preparación y aplicación del revoco exterior y del enlucido interior. Parte 1: Revoco exterior.*" (2006).