
IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN PASIVA EN UN EDIFICIO CONSTRUIDO CON TIERRA: PROPUESTA DE VIVIENDA EXPERIMENTAL

M. A. Gálvez Huerta

Dr. Arquitecto ETSAM (UPM) y UAX
E-mail: aricama@uax.es

Introducción

La necesidad de desarrollar técnicas naturales de acondicionamiento higrotérmico de edificios en situaciones con temperaturas exteriores elevadas ha dado lugar a numerosos estudios teóricos y realizaciones prácticas que conforman el marco teórico-práctico de la disciplina conocida como Refrigeración Pasiva. Las decisiones de proyecto que se llevan a cabo en este contexto pueden agruparse según los tipos siguientes:

- En primer lugar, el conjunto de estrategias arquitectónicas consistentes en: Protección exterior de huecos frente a la radiación solar, evitando el sobrecalentamiento interior; Disposición de masa térmica en los cerramientos para regular en el tiempo la cesión de calor al interior del edificio; Colocación del aislamiento al exterior para evitar sobrecalentamiento interior y dotar de masa térmica al cerramiento; Ventilación con el objeto de facilitar los intercambios de calor de los ocupantes con el ambiente interior; Elección de colores claros en la envolvente; Empleo de patios sombreados interiores al edificio como reguladores térmicos de las estancias abiertas a ellos. Este conjunto de estrategias, prioritariamente de diseño, suponen una importante reducción de las cargas de refrigeración de los locales pero como máximo consiguen reducir la media de las temperaturas interiores al nivel de las medias exteriores. Son, por supuesto, las reglas mínimas aconsejables que un arquitecto debe contemplar en sus proyectos, si quiere que sean razonables desde el punto de vista energético y componen, por otro lado, el canon de soluciones que ofrece la arquitectura llamada bioclimática para climas cálidos secos.

- En segundo lugar, y en los casos de temperaturas exteriores medias elevadas y oscilaciones térmicas diarias acusadas, la única forma de aumentar la velocidad de cesión del calor al exterior es la implantación de sistemas de enfriamiento pasivo. Son éstos el conjunto de sistemas, cuyo fin último es el mismo que el de los sistemas denominados activos (refrigeración por ciclo de compresión), es decir, neutralizar las cargas térmicas interiores y mantener la temperatura interior dentro de los límites de confort, pero sin (o con el menor) gasto energético. La clasificación de estos sistemas se hace generalmente atendiendo al sumidero térmico al que se realiza la cesión de calor consiguiendo el efecto refrigerante. Asumiendo que los sumideros

considerados habitualmente son el aire, la atmósfera, el agua y el terreno se acostumbra a plantear la siguiente clasificación:

- Ventilación nocturna;
- Reirradiación nocturna;
- Enfriamiento evaporativo directo e indirecto; y
- Acoplamiento del edificio con el terreno.

En esta comunicación se propone la implementación de sistemas de refrigeración pasiva mediante ventilación y reirradiación nocturna en un prototipo de vivienda construido con tapial y adobe.

Descripción del prototipo

Se plantea la construcción de una vivienda prototipo sobre la que realizar posteriores experiencias con el siguiente programa: salón, cocina americana, cuarto de baño y dos dormitorios, en una superficie aproximada de 50 m², resuelto en una planta rectangular de proporciones 1/2.

Para ello se opta por un sistema constructivo de dos muros de carga en el sentido largo de la planta. Estos muros se ejecutan en tapial, con espesor de 90 cm, aunque puede modularse a espesores inferiores de 45, 60 o 75 cm. Sobre ellos se dispone una cubrición abovedada con directriz semicircular de ladrillos de adobe de espesor medio 20 cm. Sobre ella se proyecta una capa de material aislante y se dispone al exterior una cubrición de chapa metálica de onda fina pintada separada 10 cm que conforma una cámara de aire entre la chapa y el aislante.

Las aberturas para iluminación de las estancias se realizan prioritariamente en los testeros, excepto la puerta de entrada, que se sitúa en el centro de uno de los muros largos. Estas aberturas se encuentran protegidas frente a la radiación solar mediante contraventanas enrasadas al exterior. Las estancias interiores (baño y cocina americana) se iluminan cenitalmente, mediante elemento practicable que integra también la ventilación del conjunto.

La cimentación de los muros se realiza con zapata corrida y la solera se ejecuta en hormigón sobre capa de grava.

Para la definición geométrica de estos espacios se remite a la documentación gráfica (plantas, alzados y secciones) que se acompaña con este texto.

Descripción de los sistemas de refrigeración

En el prototipo anterior se implementa un sistema de refrigeración por reirradiación nocturna que funciona como sigue:

La cubierta de chapa se comporta como un radiador que disipa calor a la atmósfera durante la noche, reduciendo su temperatura varios grados hasta una temperatura de equilibrio, que se estima cuando menos 5°C inferior a la exterior. Como consecuencia de esta cesión de calor, el aire que fluye por debajo del radiador también es enfriado, alcanzando no obstante temperaturas superiores a la de equilibrio de la placa, tanto más próxima a ella cuanto mejor sea el intercambio de calor entre ambos. Este aire enfriado, si se introduce en el edificio, es capaz de enfriar el aire interior y los cerramientos, en los que se ha acumulado calor durante el día en virtud de su alta masa térmica. De esta forma, además de mantener la temperatura interior dentro de los valores de confort, permite a los cerramientos iniciar el día siguiente con una temperatura baja, óptima a los efectos de acumulación. Durante el día, todos los orificios que conectan la cámara situada bajo la chapa con el interior se mantienen lógicamente cerrados.

Sistemas parecidos se han experimentado por Givoni y Hoffman (Givoni 1994:112 y 113), siendo común a todos ellos el hecho de que el aire enfriado por el radiador se cedía directamente al espacio a acondicionar, con el inconveniente de una evidente falta de control en su intercambio de calor con los cerramientos. En este trabajo se plantea como mejora la disposición de un sistema de conductos de PVC embutidos en los cerramientos, donde efectivamente se realiza este intercambio con mayor grado de control. El movimiento del aire en todo el conjunto se lleva a cabo mediante varios ventiladores axiales de pequeña potencia que, además de forzar el paso de aire por estos conductos, dirige el flujo del mismo por aberturas en la clave de la bóveda a la cámara bajo el radiador de chapa, completando el circuito.

Tanto este sistema como los propuestos por Givoni y Hoffman se basan en la utilización del aire en un circuito cerrado, sin aporte de aire exterior. La necesaria introducción de los caudales de aire de ventilación mínimos sanitarios deben proveerse por otro procedimiento. Para ello se dispone, a lo largo de la generatriz superior de la cubierta, de un doble conducto por el que circula este aire de ventilación que es captado en la claraboya de iluminación del cuarto de baño, discurre bajo una segunda cubierta radiadora y es impulsado al interior por orificios situados sobre los armarios de los dormitorios en un testero, y por similares orificios practicados en los lados de la chimenea del otro testero correspondiente al salón.

Para un entendimiento más completo del sistema, se acompañan esquemas en sección del circuito descrito, con indicación del sentido de circulación del aire, dirección de los flujos de calor predominante y situación de los puntos de impulsión y recogida de aire tratado.

Ámbito de validez del sistema propuesto

El sistema antes descrito es válido sólo para las siguientes condiciones:

- a) Temperaturas mínimas superiores a 25°C, con oscilaciones térmicas diarias superiores a 15°C, lo que arroja temperaturas máximas superiores a 40°C. Con el sistema propuesto se pretende conseguir una evolución de las temperaturas interiores con máximos que no superen los 30 °C y mínimos lo más próximos posibles a la temperatura mínima exterior, para obtener una temperatura media interior por debajo de la media exterior. Conviene recordar en este punto que Givoni (1994:8) establece en 36°C el límite máximo de la temperatura exterior para la que son efectivos los sistemas de masa térmica y ventilación nocturna, punto a partir del que sistemas como el propuesto en este trabajo se convierten en alternativa.
- b) En condiciones de atmósfera limpia, sin nubosidad y con bajo contenido de humedad. Conocido es el efecto negativo que para el balance energético de la placa radiadora supone la presencia de agua en la atmósfera en forma de nubes, por suponer una fuente de radiación mayor que el cielo despejado. La humedad ambiental alta trae por su parte como consecuencia la formación de condensaciones en la placa radiadora, si ésta alcanza temperaturas inferiores a la de rocío del aire. No hay que olvidar que este fenómeno de la condensación se lleva a cabo con cesión de calor que es contabilizado como ganancia para la placa, reduciendo así su potencia enfriadora.
- c) Sin ventilación durante el día. La introducción de aire exterior en unos momentos en los que las temperaturas exteriores se encuentran próximas a los 40°C elevaría la temperatura interior a estos valores, imposibilitando el efecto refrigerante nocturno, por alcanzarse ya al caer la tarde temperaturas interiores superiores a las exteriores.
- d) Con cerramientos de alta inercia térmica. Disponiendo, como en este caso, cerramientos exteriores de gran espesor de tierra apisonada, se logra mantener la temperatura interior estable, sin que resulte afectada por las oscilaciones térmicas exteriores, protegiendo al ambiente interior del sobrecalentamiento. Por otro lado, el calor almacenado durante el día en los cerramientos será disipado durante la noche por el procedimiento descrito.

Condiciones que deben cumplir los elementos constructivos

- a) Placa radiadora. Para cumplir con su función prioritaria, que es la de emitir la máxima radiación, deberá conseguirse una elevada emisividad de radiación de onda larga, ϵ , superior en lo posible a 0,90. Esto se consigue fácilmente con una placa metálica pintada, sin que el color de la pintura influya en la temperatura de equilibrio nocturna (Givoni 1994:111). Acerca de las experiencias realizadas con superficies selectivas, como las analizadas por Martín (Cook 1989: 177 y ss), es evidente que el empleo de estos materiales

suponen una sensible mejora, aún con elevado coste económico, pero en ningún caso del calibre de la que se consigue en los paneles solares térmicos para calefacción y agua caliente sanitaria. El problema de la ganancia de calor por transmisión superficial como consecuencia de velocidades del aire exterior elevadas no se trata en este trabajo, aunque se es consciente de su importancia en cuanto a reductor de la potencia de refrigeración conseguida.

b) Cámara de aire bajo la placa, con un espesor mínimo de 5 cm y máximo de 10 cm. Se alimenta por la generatriz superior de la cubierta a través de una serie de aberturas regulables mediante compuerta, operada manualmente por el usuario.

c) Aislamiento de la cubierta, de 5 cm de espesor mínimo. La geometría de la cubierta y la posición relativa del aislamiento en la misma aconsejan como solución óptima la de la proyección del mismo.

d) Cerramientos de fachada, para los que se exige una elevada inercia térmica. Se denomina inercia térmica a la resistencia que presentan los cuerpos a variar su temperatura, acumulando en su interior la energía térmica que reciben. La variable que expresa esta propiedad en los materiales es la difusividad térmica, a , cuya fórmula de definición es

$$a = I/cr$$

siendo k la conductividad térmica, c el calor específico y r la densidad del material. Se mide en m^2/s . Un material es tanto mejor acumulador del calor cuanto más baja es su difusividad térmica.

Para la tierra compactada pueden establecerse los valores medios siguientes

$$I = 0,58 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$c = 836 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$r = 1500 \text{ kg/m}^3$$

con los que se obtiene una difusividad térmica, $a = 4,62 \times 10^{-7} \text{ m}^2/s$. Este valor se encuentra lejos del que tiene el agua, $a = 1,46 \times 10^{-7} \text{ m}^2/s$, el material acumulador del calor por excelencia, pero es bastante inferior a los valores de otros materiales, como la piedra, $a = 1,19 \times 10^{-6} \text{ m}^2/s$, que se tienen por buenos acumuladores.

e) Conductos embutidos en los cerramientos. La ejecución de los cerramientos con tapial facilita la disposición en su interior de conductos verticales de PVC de 118,6/125 mm de diámetros interior y exterior,

con aperturas al ambiente interior en sus extremos inferior y superior. Los conductos se disponen con una separación entre ejes de 50 cm. Las características del material e los efectos de cálculos son las siguientes:

conductividad térmica, $\lambda = 0,45 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

rugosidad, $f = 0,50 \text{ mm}$

Propuesta de instrumentos de cálculo y dimensionado del sistema

a) Temperatura de equilibrio de la chapa de cubierta

La aplicación de la ecuación de balance energético permite obtener la temperatura de equilibrio que alcanza la chapa en función de la temperatura exterior. Esta ecuación de balance contempla, entre las pérdidas de calor P (en W), las obtenidas por radiación, que dependen de la temperatura y de la emisividad de la placa, y se expresan mediante la ley de Stefan Boltzmann

$$P = \epsilon \sigma A T_c^4,$$

donde σ es la constante de Stefan Boltzmann, cuyo valor es $5,66 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, A es el área de la cubierta, T_c es la temperatura de equilibrio de la chapa de cubierta, expresada en $^\circ\text{K}$ y ϵ es su emisividad frente a onda larga.

Por el contrario, entre las ganancias se deben contabilizar al menos:

- La ganancia G_1 procedente del aire exterior a mayor temperatura que la chapa, intercambio de calor que se produce por transmisión superficial, y que se cuantifica mediante la expresión

$$G_1 = h_e A (T_e - T_c),$$

donde h_e es el coeficiente de transmisión superficial del calor del conjunto chapa-aire exterior (cuya determinación es generalmente problemática, pues depende, entre otros factores, de la velocidad del aire exterior) y T_e es la temperatura del aire exterior en cada instante.

- La radiación procedente de la atmósfera, G_2 . Su determinación es sumamente compleja, pues depende de muchos factores, entre los que son fundamentales la nubosidad y el contenido de humedad (generalmente caracterizado por la temperatura de bulbo húmedo o el punto de rocío). Una descripción pormenorizada de distintos modelos interpretativos de este fenómeno se encuentra en Cook (1989: 143 y ss.) En la fase de aproximación en la que necesariamente de sitúa esta ponencia se considera suficiente el empleo del modelo propuesto por Neila y Bedoya en sus guías del Máster de Arquitectura Bioclimática de la UPM, en el que se

estima la radiación procedente de la atmósfera equivalente a la de un cuerpo a la temperatura del aire, pero con una emisividad del 50%. Esto lleva a la expresión de ganancias por este concepto siguiente:

$$G_2 = 0,5 \ s A T_e^4$$

De la operación de igualar ganancias y pérdidas se obtiene una temperatura de equilibrio de la chapa que en casi todos los casos arroja un valor inferior en más de 5°C a la temperatura ambiente nocturna. Con la chapa a esta temperatura se consigue un enfriamiento del aire que circula por la cámara de aire situada por debajo y que, impulsado al interior del edificio sirve para su acondicionamiento térmico. La temperatura más baja alcanzada por este aire depende del caudal de aire impulsado (y en consecuencia de su velocidad) y de las características de la superficie de separación entre la chapa y el aire. Givoni (1994:125) propone un método de cálculo para este fenómeno que arroja como resultado general que la temperatura inferior del aire alcanzada queda sensiblemente por encima de la temperatura de la placa, tanto más cuanto mayor sea el caudal circulante.

b) Variación de temperatura experimentada por los cerramientos exteriores.

En el apartado 4a de este trabajo se consideraba como uno de los objetivos del sistema lograr unas temperaturas interiores que oscilaran entre 26-27 °C como mínima y 29-30 °C como máxima, manteniendo un rango de variación de las mismas en torno a 3 °C.

Neila y Bedoya (1997: 254) introducen la noción de masa térmica como variable indicadora de la capacidad de almacenar calor de un cerramiento, determinante además en cuanto a la estimación de la temperatura alcanzada por el mismo ante un aporte de calor determinado. Haciendo uso de este procedimiento, con la masa térmica, en kJ/°C, de la construcción propuesta, la elevación de la temperatura limitada a 3 °C conduce a una determinada capacidad de acumular calor de los cerramientos durante las 16 horas en las que hay sol. Este calor es el que debe de ser eliminado durante las 8 horas nocturnas por el sistema propuesto.

Conclusiones

El prototipo de vivienda construida con tierra y los sistemas de refrigeración pasiva propuestos se revelan, en una primera aproximación, viables para los fines deseados. Se es consciente, no obstante, de las limitaciones del análisis realizado y se proponen las siguientes vías de estudio abiertas por el trabajo:

- a) Definición constructiva del prototipo y de los sistemas pasivos propuestos;
- b) Establecimiento de un modelo de evolución hora a hora de la temperatura interior; y
- c) Definición de métodos de cálculo de la potencia de refrigeración alcanzada.

Bibliografía

BEDOYA, César y NEILA, Javier (1997): *Técnicas arquitectónicas y constructivas de Acondicionamiento ambiental*. Munilla-Lería. Madrid.

COOK, Jeffrey (1989): *Passive Cooling*. MIT Press. Cambridge.

GIVONI, Baruch (1994): *Passive and low energy cooling of buildings*. John Wiley & Sons. Nueva York.

