

EFICIENCIA ECONÓMICA DE LA MASA TÉRMICA EN EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE CLIMAS TEMPLADOS.

Alfredo Esteves¹, Daniel Gelardi¹, Carolina Ganem², M.Victoria Mercado²

Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (DICYT)¹

Facultad de Arquitectura²

Universidad de Mendoza

Boulogne Sur Mer 683 - 5500 Mendoza Argentina

Tel./Fax: +54 261 4202017 - Fax: 4201100/ E-mail: alfredo.esteves@um.edu.ar

Resumen: El comportamiento de la masa térmica en el almacenamiento de energía en edificios ha sido de interés en aplicaciones en edificios bioclimáticos y sustentables. Existe energía disponible proveniente del Sol y del espacio, que es mayor a los requerimientos energéticos de un edificio durante el día. Este exceso energético puede almacenarse en la masa térmica y ser liberado durante las horas de la noche disminuyendo las necesidades de calefacción nocturna del edificio. Del mismo modo, en verano la masa térmica permite que la estructura permanezca fresca durante el día y reducir la necesidad de sistemas de refrigeración mecánica consumidores de energías convencionales. En este trabajo se muestra que: a) la eficiencia económica de la masa térmica aumenta con la calidad de la envolvente para la misma masa térmica involucrada; b) la eficiencia económica de la masa térmica aumenta con la cantidad incorporada en el interior del edificio; y c) que la relación entre superficie de masa térmica y la superficie cubierta a enfriar, es un excelente indicador de la eficiencia económica. Se incluye un gráfico que permite dimensionar la masa térmica en función de las ganancias térmicas por la envolvente y el % de ahorro económico.

Introducción

En este nuevo siglo que transita la humanidad uno de los problemas que se enfrenta es la contaminación ambiental. Existen esfuerzos realizados en el sector industrial, a través de la norma ISO 14000 y sucesivas series para mejorar la calidad de los procesos industriales de manera de disminuir el impacto al medio ambiente. El sector transporte, a través de la industria automotriz, también responde con el desarrollo de motores de mejor performance. Sin embargo, la cantidad de vehículos y la tendencia creciente a poseerlos, genera un impacto difícilmente controlable si no se utilizan motores eléctricos o hidrógeno como combustible. En el sector residencial y terciario, tenemos una asignatura pendiente, y en general, el motivo de la falta de construcciones bioclimáticas y sustentables con bajo impacto ambiental radica entre otros motivos en la falta de conocimientos del tema.

Diseñar con el clima local es ecológico y económico. La disminución en el consumo de energía en la operación del edificio permite generar ahorros sustanciales (con lo cual disminuye el impacto al medio ambiente) haciendo a la vez un uso más racional de los fondos disponibles con los que cuentan los usuarios. Al incorporar estrategias de conservación de energía y sistemas pasivos de acondicionamiento térmico, nos permite acercarnos al edificio hacia una construcción sustentable. Además mejora el bienestar objetivo de los ocupantes (mejores temperaturas de confort y niveles lumínicos) y también subjetivo, ya que les permite estar más concientes del clima exterior.

En verano, el acoplamiento de espacios y elementos edilicios a sumideros de calor ambiental (aire, cielo, tierra y agua), por medios naturales de transferencia de calor, permite un efecto apreciable de enfriamiento (Goulding et al, 1994).

Entre los 23° y 35° de latitud sur, existen lugares donde prevalecen climas cálidos y desérticos o semidesérticos, que se destacan por tener: bajas precipitaciones (usualmente menos de 250 mm anuales), alta amplitud térmica diaria (usualmente mayor a 13°C) y alta radiación solar que se traduce en alta heliofanía relativa (alrededor de 60%). Esto se combina con vientos relativamente poco frecuentes (presencia de calmas en 50% o más).

En estos climas la acumulación de energía en edificios, en la estación de calefacción se lleva a cabo almacenando el exceso energético ganado por energía solar y ganancias internas durante el día. La inercia térmica del edificio es utilizada para almacenar este exceso y el calentamiento se produce suavemente. En la estación de enfriamiento, la energía acumulada durante el día, se entrega al ambiente exterior por medio del aire que circula por convección natural o forzada. De este modo, la masa del edificio absorbe las ganancias de energía durante el día y aumenta su temperatura manteniendo el interior del edificio fresco. Por la noche, la energía debe ser extraída del edificio utilizando un sumidero de calor y un modo preferiblemente pasivo de transferencia de energía. Por lo tanto, se trata que el edificio incorpore en su diseño estrategias de calefacción y enfriamiento pasivas de acondicionamiento ambiental. Es decir, ganancias directas, muros acumuladores o invernaderos para invierno y enfriamiento convectivo nocturno, convectivo subterráneo o radiante para verano. En cualquier caso, la masa térmica se vuelve estratégica y será necesario tomar en consideración la calidad y cantidad para mantener el interior confortable. Es importante notar que debe poseer tecnología de aislación térmica que preferiblemente sea incorporada por el exterior (Izard et al, 1978). Si la aislación térmica se coloca por el interior, no es posible utilizar los muros como masa térmica y el edificio se hará difícil de controlar térmicamente por medios pasivos.

En este trabajo se indican las consideraciones de diseño para la incorporación de la masa térmica: localización, materiales y espesores. Se analiza la eficiencia económica de la masa térmica utilizada como sistema pasivo de enfriamiento. Para esto se realiza un balance térmico hora a hora de las ganancias de energía térmica del edificio y se evalúa la eficiencia de la masa térmica. Finalmente se realiza un estudio de caso aplicado a la ciudad de Mendoza, en el oeste de la Argentina.

CONSIDERACIONES DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO CON RESPECTO A LA MASA TÉRMICA INTERIOR

Localización de la masa térmica

En un edificio bioclimático con calefacción pasiva, se pueden observar tres tipos de masa térmica, de acuerdo a su posición:

- 1- Almacenamiento térmico primario está constituido por la masa térmica localizada en un lugar que recibe radiación solar directamente, entre las 9 h y 15 hr. (hora solar) en invierno.
- 2- Almacenamiento térmico secundario es la masa térmica que está fuera del área soleada pero radiativamente acoplada con ella (que se ven mutuamente).
- 3- Almacenamiento térmico remoto es el que no está acoplado radiativamente con el almacenamiento primario y secundario. En este la transferencia de calor desde y hacia la masa térmica es solamente por convección.

Una vez que la radiación solar entra por un sistema de ganancia directa o invernadero e incide sobre una superficie de masa térmica, una parte es absorbida en ella y el resto de la energía es redistribuida a través del espacio por radiación infrarroja y por convección de aire. Esta redistribución de energía es tan efectiva que toda la superficie que rodea el espacio del ambiente interior es casi igualmente útil para la acumulación térmica, ya que la temperatura alcanzada por las superficies interiores que rodean al espacio es prácticamente equivalente. No se distingue entre el almacenamiento térmico primario y secundario y se lo llama "superficie térmica directa". De la misma manera, el almacenamiento térmico remoto se lo llama "superficie térmica indirecta" (Balcomb, 1984). Es muy importante en los edificios solares colocar masa térmica como superficie térmica directa.

En verano, la transferencia de calor hacia y desde la masa térmica es por acoplamiento convectivo para toda la masa térmica tanto primaria como secundaria (si se establece un oscurecimiento apropiado durante el día), debe estar directamente alcanzada por una corriente de aire cruzada si se utiliza el enfriamiento convectivo nocturno o enfriamiento subterráneo o acoplada radiativamente o convectivamente con la superficie fría si se trata de enfriamiento radiante. Tanto la superficie necesaria de masa térmica o la longitud de los tubos enterrados se puede obtener en base a la eficiencia de los sistemas involucrados (Stein et al., 1992).

Material y espesores

El calor generalmente se acumula en materiales con elevada capacidad térmica. Los medios de acumulación térmica requieren alta conductividad térmica para permitir al calor viajar rápidamente del exterior al interior y viceversa. Alta densidad es un indicio de alta conductividad térmica (ver Tabla 1).

La capacidad de almacenamiento térmico de materiales ordinarios de edificios y el agua (entre el punto de fusión y el punto de ebullición) es prácticamente independiente de la temperatura. Los materiales de cambio de fase (PCM) absorben calor cuando se fusionan y lo liberan cuando se re-solidifican.

La capacidad de almacenamiento térmico, en estos materiales está dependiendo principalmente de la densidad del material (Tabla 1), a efectos de realizar una comparación de las propiedades físicas de los materiales se toma como referencia un espesor igual para todo los casos. Si el espesor de muros y pisos es grande, la masa disponible para el almacenamiento es generalmente menor que la masa total del muro, es decir que aún sobredimensionando los espesores en los elementos acumuladores de un edificio, este va a acumular hasta cierto límite, establecido por las propiedades de dicho material.

La bibliografía indica que el espesor efectivo de materiales edificios ordinarios es de 80 mm a 160 mm en períodos de carga y descarga de 24 hr, cuando el calor se acumula sobre un solo lado (Goulding et al, 1984). Sin embargo, el espesor efectivo puede reducirse a 100 mm sin incurrir en una penalidad significativa del rendimiento (Roaf, 2003).

El agua tiene una capacidad de almacenamiento por unidad de volumen importante y puede ser utilizada con espesores mayores (250 mm) ya que el almacenamiento térmico ocurre prácticamente en forma isotérmica.

Los materiales de cambio de fase tienen ventajas con respecto a otros materiales especialmente si la temperatura del almacenamiento está encima del punto de fusión. Se ha demostrado la ventaja de muros de parafina sobre los muros de concreto en donde los primeros pesan un veinteaño del peso del muro de concreto (incluyendo el contenedor) para producir una eficiencia útil, condiciones de confort y almacenamiento térmico promedio equivalentes (Bernarde et al, 1995).

Tabla 1: propiedades térmicas de materiales utilizados en muros (Gelardi et al, 2000)

Materiales	Espesor [mm]	Densidad (1) [Kg/m ³]	Conductividad Térmica (1) [W/mK]	Calor Específico (1) [J/KgK]	Capacidad de almacenamiento térmico (1) [KJ/m ³ K]	Admitancia Térmica (2) [W/m ² .°C]
Piedra o granito	120	2500	2.5	860	258	47.1 (22.1)
Hormigón	120	2400	2,1	864	248	59.0 (23.2)
Ladrillo	120	1800	0,6	1000	216	34.6 (19.8)
Adobe	120	1700	0,52	1000	204	31.2 (18.7)
Agua	120	1000	0,58	4186	502	-----
Parafina (3)	20	786	0.138	2.09 x 10 ⁵	328	-----
Sulfato de sodio (3)	20	1460	0.514	2.51 x 10 ⁵	732	-----

Ref.: (1) Gelardi et al, 2000, (2) Balcomb, 1981, (3) Duffie et al, 1991. Admitancia térmica, valores en superficies asoleadas y valores entre paréntesis correspondientes a superficies en transferencia por convección.

Hay varias guías que indican la cantidad de masa térmica a incorporar en edificios (Balcomb et al, 1984; Goulding et al, 1994). Esta cantidad es elegida para prevenir las variaciones excesivas de temperatura en los espacios ocupados. No hay sin embargo, establecidos estudios que definitivamente establezcan los efectos de la masa en el consumo edilicio y en la economía de recursos que son los principios de la sustentabilidad de los mismos (Kim et al, 1998).

Metodología para calcular la eficiencia económica

La masa térmica depende de: características térmicas de la envolvente (producto de la conductancia térmica por el área de cada elemento), condiciones climáticas (fundamentalmente temperatura ambiente, radiación solar y vientos) y ganancias internas.

Si el edificio tiene una envolvente de poca calidad, que se traduce en un alto valor de conductancia térmica x área, la cantidad de energía acumulada es muy pobre y de este modo la incorporación de masa térmica es muy poco eficiente. Por el contrario, un edificio que posea buena calidad térmica de la envolvente, intercambiará poca energía con el medio ambiente exterior y enfatizará los intercambios con el interior, por lo tanto la inclusión de masa térmica tendrá una eficiencia importante.

Para capacidad de almacenamiento térmico cero, los requerimientos de calefacción y enfriamiento son máximos. El almacenamiento térmico permite que el exceso de la energía ganada durante el día sea utilizada en la noche y reducir el gasto en calefacción, siempre hablando de un edificio con buena calidad de envolvente. Hay una cantidad de almacenamiento en función de la fracción de ahorro solar del edificio (Balcomb, 1986). En verano, la masa térmica transfiere energía solamente por convección y la admitancia térmica de la pared es el indicador útil para conocer la capacidad de almacenamiento de calor del muro (Balcomb, 1981). Se puede calcular la cantidad de energía acumulada en la masa térmica que puede reducir el costo energético de enfriamiento.

En este trabajo se han calculado los requerimientos de enfriamiento del edificio para un período diurno con frecuencia de dos horas para el día más caluroso del año, con la metodología indicada en Quadri, 1993 para el cálculo de potencia de aire acondicionado. Esta metodología se ha utilizado para conformar un programa en planilla Excell descrito previamente en Esteves et al, 2003. Si el edificio no tiene almacenamiento térmico es necesario un equipamiento de enfriamiento que extraiga esta energía y mantenga el interior a temperaturas confortables. La energía consumida por este equipo de enfriamiento es la energía máxima consumida por el edificio y el costo de enfriamiento es el más alto. Si el edificio tiene suficiente almacenamiento térmico, acumulará todo el calor diurno ganado y mantendrá el interior a temperatura de confort y el costo de enfriamiento será el menor.

La masa térmica a incluir en el interior del edificio debería ser suficiente para almacenar la energía ganada durante el día y entregarla posteriormente al ambiente exterior durante las horas de la noche. La figura que nos indica la cantidad de masa térmica almacenada y que puede el sistema evacuar durante las horas nocturnas, es la admitancia térmica para el intercambio convectivo (valor que se indica en la Tabla 1 para los distintos materiales). En función de la cantidad de masa térmica y considerando un rendimiento del 100%, se calcula la cantidad de energía que puede acumular disminuyendo proporcionalmente el costo de enfriamiento del edificio.

Nos estamos basando en que la estrategia de utilizar la masa térmica es factible y las temperaturas reinantes en el lugar se mantienen en el límite impuesto para utilizar este sistema de enfriamiento.

CASO DE ESTUDIO

Se ha trabajado con un caso de estudio que considera una vivienda en la ciudad de Mendoza, Argentina. La vivienda posee las siguientes características: orientación principal hacia el ecuador (12 m longitud). Longitud de fachada este, 8 m. Los muros son construidos con mampostería interior y aislación térmica exterior de poliestireno expandido ($K=0.68 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) y un revoque de protección exterior. El techo también posee aislación térmica del mismo material ($K=0.64 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) y un hormigón alivianado como protección y soporte de la membrana con aluminio. Las ventanas son protegidas con aleros y tienen doble vidrio hermético ($K=3.1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). La altura de la vivienda es 2.6 m. El techo horizontal tiene una superficie de 96 m^2 .

Tabla 2: muestra la eficiencia económica de diferentes situaciones de masa térmica

CNP	Energía a extraer		MT/SC	% Ahorro de Energía	MT/SC	% Ahorro de Energía	TS/CA	% Ahorro de Energía	Costo máximo \$
	[Wh/día]	[Tr]							
516	39700	1.7	1	56.9	1.5	85.4	2	96.6	463
262	27200	1.03	1	82.1	1.5	94.7	2	100	244
190	28023	0.83	1	90.1	1.5	97.8	2	100	181

Ref.: CNP (Coef. Neto de pérdidas), Tr (toneladas de refrigeración), MT/SC- masa térmica/superficie colectora

La Tabla 2, indica diferentes niveles de calidad de envolvente, a través del CNP - coeficiente neto de pérdidas (desde 516 hasta 190). Recordemos que el CNP representa las pérdidas térmicas del edificio, sin considerar las correspondientes al sistema solar, sus unidades son $[\text{W}/^\circ\text{C}]$. Esto corresponde a tres casos: edificio con buen techo, pero muros sin aislación térmica y un nivel alto de renovaciones de aire (CNP = 516); edificio con muros aislados térmicamente y un nivel de renovaciones igual a 1.5 intermedio (CNP=262); edificio con buena aislación térmica y un nivel de renovaciones bajo, igual a 0.5 Renovaciones de aire (CNP=190). Se incluyen también tres niveles de masa térmica interior a través del factor MT/SC, es decir, cantidad de masa térmica respecto a la superficie cubierta: 1, 1.5 y 2. Los resultados se expresan en % de ahorro de energía para atender el enfriamiento del edificio. El costo máximo de enfriamiento que corresponde al nivel de masa térmica nula y se expresa en pesos argentinos.

Recordemos que mientras mayor es el valor de CNP, corresponde a calidad de envolvente más pobre. Se puede observar que el % de ahorro para CNP=516 y para cualquier proporción de masa térmica la superficie colectora (MT/SC) es nulo. Posiblemente debido a ganancias demasiado grandes hacen inevitables la masa térmica por más que sea elevada.

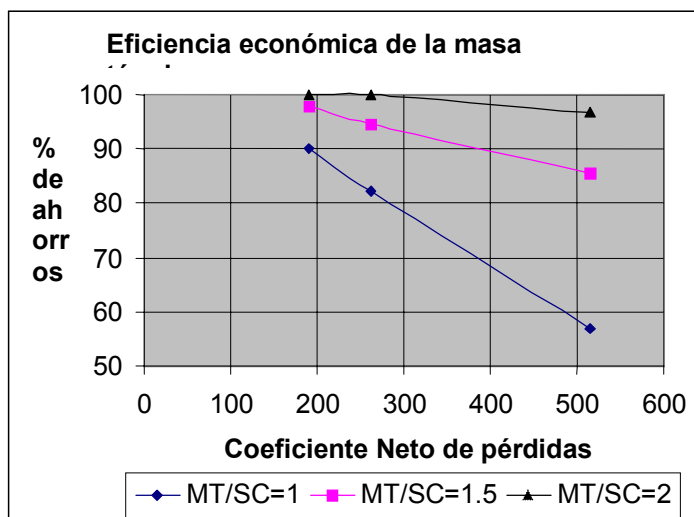


Figura 1: eficiencia económica en función del CNP para distinta cantidad de masa térmica

En este sentido se puede indicar que:

- 1- Al mayor valor de CNP le corresponden valores más bajos de eficiencia de la masa térmica.
- 2- $MT/SC = 1$ implica que la cantidad de superficie de masa térmica es igual a la superficie cubierta. Esto representaría tener solamente el piso como elemento de masa térmica. Para este caso, la vivienda tiene muy poca acumulación y se obtienen ahorros del 90% en el mejor de los casos, es decir contar con $CNP = 200$, implica extremar medidas de aislación térmica.

3- $MT/SC = 1.5$ implica disponer de mayor cantidad de masa térmica, pero no suficiente. Sin embargo, los resultados indican que en todo momento se mantiene el valor de ahorro encima de 80%. Alcanzando % de ahorro importantes solamente cuando se extremen las medidas de aislación térmica y se logran CNP menores a 250.

4- $MT/SC = 2$ es el caso de disponer de una cantidad de masa térmica igual al doble de la superficie cubierta. Es el caso de tener un edificio con un $FAEP^1 = 2$, la masa térmica en este caso es igual a la superficie de piso más la superficie de envolvente. Para este caso, el ahorro es máximo, aún para situaciones de envolvente de poca calidad térmica, lo que indica la importancia de la contribución de la masa térmica desde un estado temprano del diseño edilicio.

CONCLUSIONES

Se presenta el rendimiento económico de la incorporación de masa térmica en edificios que fueran a construirse en un clima templado desértico o semidesértico. El análisis indica la ventaja de incorporar masa térmica utilizando un factor, MT/SC - la superficie de masa térmica respecto de la superficie cubierta del edificio, ya que el mismo involucra dos unidades de superficie, lo cual, deja un factor adimensional y representa la cantidad de masa térmica que se tiene por cada m^2 de superficie cubierta. En este caso, se presenta un gráfico que permite considerar la cantidad de masa térmica necesaria para un nivel dado de ahorro energético en función del CNP del edificio.

Es importante indicar que, en un diseño cuidadoso que posea un $FAEP$ aproximadamente igual a 2 (Esteves et al, 1997), un valor de $MT/SC = 2$ implica que la masa térmica es equivalente a la superficie de la envolvente (techos + envolvente lateral) y cuando $MT/SC = 4$ esto es equivalente a la superficie de envolvente más las superficies de particiones internas del edificio.

Se demuestra de este modo que la masa térmica es muy importante en climas del desierto y representa un muy alto nivel de ahorro dependiendo del nivel de conservación y la superficie colectora del edificio.

REFERENCIAS

- Balcomb Douglas, 1981. Solar Energy Handbook. Cap. 10. Passive Solar Systems. J.Wiley.
- Balcomb Douglas et al, 1984. Solar Passive Design Handbook III.
- Benard C., Body Y., Zanolli A. 1985. "Experimental Comparison of Latent and Sensible Heat Thermal Walls". Solar Energy vol. 34, N° 6, pp. 475-487. Pergamon.
- Esteves A., Gelardi D., Oliva A. 1997. "The Shape In The Bioclimatic Architecture. The Faep Factor". Proc. II Conf. Teachers of Architecture. Cap. 3-12. Ed. M. Sala. Italia.
- Esteves A., Gelardi D. 2003. " Docencia En Arquitectura Sustentable: Programa De Optimización De Proyectos De Arquitectura Basado En El Balance Térmico. AVERMA Vol. 6. Ed. INENCO.
- Gelardi, D.; Esteves, A.; Piliafíto, E.; Quero, J.; Inzirillo, R. 2000. "Bioclimatic Building with water wall solar system with botter of polythylene Terephthalate (pet.). 3rd International Conferent for Teachers of Architecture, Oxford.
- Goulding et al, 1994. Energy in Architecture". The Energy Research Group. School of Architecture. University of Dublin, IRL.
- Izard, J.L.; Guyot, A. 1978 "Arquitectura Bioclimatica". Editorial Gili Barcelona. España.
- Kim Jong-Jin ; Rigdon B. 1998. Introduction of Sustainable Design. University of Michigan. National Pollution Prevention Center for Higher Education.
- Mitchell J.W.; Beckman W.A. 1989. "Theoretical Limits for Storage of Energy in Buildings. Solar Energy Vol. 42, N° 2, pp. 113-120.
- Quadri Néstor P. 1993. Instalaciones de Aire Acondicionado y Calefacción. Ed. Alsina. Buenos Aires. Argentina
- Roaf Susan, Fuentes Manuel, Thomas Stephanie. 2003. Ecohouse 2 - A Design Guide. Architectural Press, Amsterdam. ISBN 0 7506 5734 0.
- Stein B., Reynolds J. 1992. Mechanical and Electrical Equipment for buildings. J.Wiley & Sons. 8^a Ed. New York.

ABSTRACT

In bioclimatic and Sustainable Architecture the use of interior thermal mass has been of interest. In this building there are some energy available from sun, that it is important to storage for night. The energy available it is possible to storage in thermal mass (walls, roof or floor) and contributes to reduce auxiliary energy used. In the summer, thermal mass is enable to storage energy during the day, contributing to reduce air conditioning use. In this work, it is demonstrated that: a) economic efficiency of thermal mass increase for larger interior surface of it; b) economic efficiency has increased in buildings with better thermal quality of envelope and c) the relation between thermal mass surface and floor surface area (MT/SC) it is an excellent indicator of economic efficiency and it is included an graphic that relate between MT/SC , CNP (Net Loss Coefficient) and % of savings.

¹ **FAEP** - Factor de Area Envolvente/Piso es igual a la superficie de envolvente lateral+ superficie de techos/superficie cubierta (ver Esteves et al., 1997).