

Método mejorado para el cálculo de la transferencia de calor en muro multicapa. Aplicación en rehabilitación

Soto Francés, Laura ^{(1)(*)}; **Pinazo Ojer, José Manuel** ⁽²⁾; **Soto Francés, Víctor Manuel** ⁽²⁾; **Sarabia Escriba, Emilio** ⁽²⁾

(*) Departamento Internacional R+D+I, Instituto Valenciano de la Edificación (IVE), 46018 Valencia, España, lsoto@five.es, +34 961207531

(1) Departamento Internacional R+D+I, Instituto Valenciano de la Edificación (IVE), 46018 Valencia, España

(2) Department of Applied Thermodynamics, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales., Universidad Politécnica de Valencia UPV, 46022 Valencia, España

Abstract Los programas de simulación energética de edificios más conocidos y empleados utilizan el método de los factores de respuesta (REF) (Mitalas & Stephenson, 1967) para evaluar la demanda de energía térmica de los edificios. Se muestrea con cierta frecuencia fija la temperatura a ambos lados de un cerramiento y entre instantes de muestreo distintos se supone que su evolución fue lineal. Esa interpolación se conoce como elemento formador (EF) o sostenedor de la señal muestreada de orden 1. Este artículo propone substituir el elemento formador de orden 1 por otro de orden 2. El presente artículo expone la utilización de la metodología de transferencia de calor en un cerramiento multicapa con un elemento formador de 2º orden, y aplicarlo a una situación concreta con los cerramientos más frecuentes utilizados en España en el campo de la rehabilitación energética. Igualmente se analiza la aplicación a dichos cerramientos una vez rehabilitados con diferentes posibilidades de incluir aislamiento en dichos cerramientos. Se comparan los resultados obtenidos y se demuestra la mayor precisión que se obtiene con esta nueva metodología. Finalmente se demuestra que un elemento formador de 1º orden presenta peores aproximaciones a la realidad cuando el cerramiento tiene mayor inercia y cuando el aislamiento se realiza en la cara donde se provoca la perturbación.

Keywords Transmisión calor cerramientos, Factores de respuesta, Funciones de transferencia, Simulación energética, Rehabilitación energética

1 Introducción

El objeto de este artículo es analizar la aplicación de un elemento formador de segundo grado a la transferencia de calor en cerramientos multicapa (Mitalas, G., & Stephenson, D., 1971), identificar su precisión respecto a un modelo de primer grado tradicional Mitalas (Mitalas G. , 1968), y determinar su aplicación a diferentes cerramientos típicos de construcción española en rehabilitación de edificios (EPISCOPE Partners, 2014), en donde puede variar tanto el grado y posición de aislamiento, como la inercia del mismo.

El presente trabajo es una aplicación del modelo desarrollado en (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escrivá, & Soto Francés, 2015) por los mismos autores, donde se detalla con precisión la forma de obtener los factores de respuesta ante un formador de 2^o grado.

Se debe resaltar que en la obtención de los factores de respuesta con un modelo de 2^o grado se aplica no sólo el balance de potencias térmicas en ambas caras del cerramiento como se ha hecho hasta el momento en los programas de simulación energética, sino que también se aplica el balance de energía en el intervalo de muestreo, de manera que el esquema de cálculo producido es conservativo.

La evolución impuesta de las temperaturas entre instantes de muestreo se observa en la Figura 1. Se trata de comprobar la fiabilidad del método a través de su aplicación a soluciones constructivas que son representativas del parque de viviendas existentes en España (Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011), y en las que se prevé una actuación en rehabilitación (EPISCOPE Partners, 2014). Para ello se comparan los resultados del método lineal y parabólico con paso de 1 hora frente al lineal con paso de 5 min, con el fin de comprobar frente a éste último la desviación de resultados y así la precisión de la propuesta (aunque recordemos que el paso de 5 min, aún contiene errores en la conservación de energía, pero el error con la realidad es más pequeño debido al menor paso de tiempo).

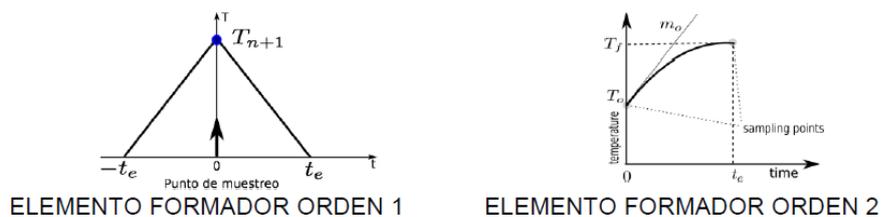


Fig. 1 Esquema distribución temperaturas según elemento formador

2 Datos de partida con diferentes elementos formadores

2.1 Método lineal

El método de Mittal (Mitalas G. , 1968), se representa en la figura 2.

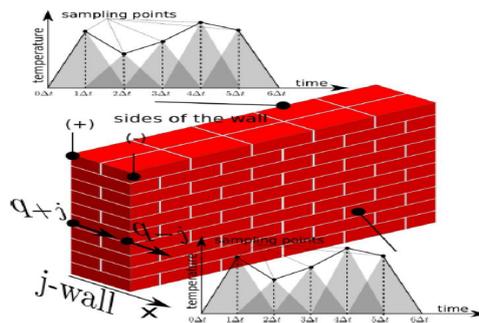


Fig. 2 Evolución temperaturas superficiales elemento formador 1^o orden

Se parte por tanto de una evolución lineal de temperatura dentro del intervalo, y con la condición de continuidad de la función se expresa como

$$T_{-j}(t) = T_{-j,n-1} + \frac{T_{-j,n} - T_{-j,n-1}}{t_e} t \quad (1)$$

Nota: j significa pared, y ± significa cada lado de dicha pared.

Pudiendo determinar de acuerdo con Mittal (Mitalas G. , 1968) la potencia intercambiada por conducción en un instante de muestreo dado mediante el uso de los factores de respuesta, y que para un cerramiento genérico en la superficie interior del muro se puede expresar como :

$$q_{cond,-j,n} = \sum_{r=0}^{\infty} T_{+j,n-r} Y_{T,j,r} + \sum_{r=0}^{\infty} T_{-j,n-r} Z_{T,j,r} \quad (2)$$

Nota: la obtención de los coeficientes de los factores de respuesta en potencia es una técnica ya conocida (Mitalas, G., & Stephenson, D., 1971).

Por tanto, para determinar la potencia térmica transferida por conducción en un cerramiento es necesario determinar dos incógnitas, las temperaturas en el siguiente punto de muestreo en ambas caras del cerramiento ($T_{j,n}$ $T_{+j,n}$). Por último, para obtener estas temperaturas se establecen dos equilibrios de potencia térmica en las superficies (+ y -) en cada instante de muestreo. En la realidad este equilibrio se verifica en todo instante de tiempo dentro de cada intervalo, sin embargo, el método sólo obliga al equilibrio en los puntos de muestreo (punto inicial y final en cada intervalo).

$$q_{cond,\pm j,n} + q_{rad,\lambda\uparrow,\pm j,n} + q_{rad,src,\pm j,n} + q_{rad,solar,\pm j,n} = q_{conv,\pm j,n} \quad (3)$$

Finalmente, reseñar que se podría obtener la energía transferida por conducción por dicha superficie a lo largo del último periodo de muestreo (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escrivá, & Soto Francés, 2015) mediante:

$$Q_{cond,(n-1)\rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} T_{+j,n-r} \cdot YY_{T,j,r} + \sum_{r=0}^{\infty} T_{-j,n-r} \cdot ZZ_{T,j,r} \quad (4)$$

En donde los factores de respuesta para energía se pueden obtener con la misma técnica de transformada de Laplace utilizada para obtener los factores de respuesta en potencia, ver (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escrivá, & Soto Francés, 2015).

En este método no se impone un balance de energía entre pasos de tiempo, de este modo, el esquema de simulación es no conservador. Sin embargo, como cabría esperar, los errores en la energía no se acumulan, se compensan positiva y negativamente a lo largo del tiempo, dando lugar a un esquema estable.

2.2 Método parabólico

El método de 2^o orden parte de una evolución parabólica en temperaturas y que suponiendo igualmente continuidad de la función se puede expresar como:

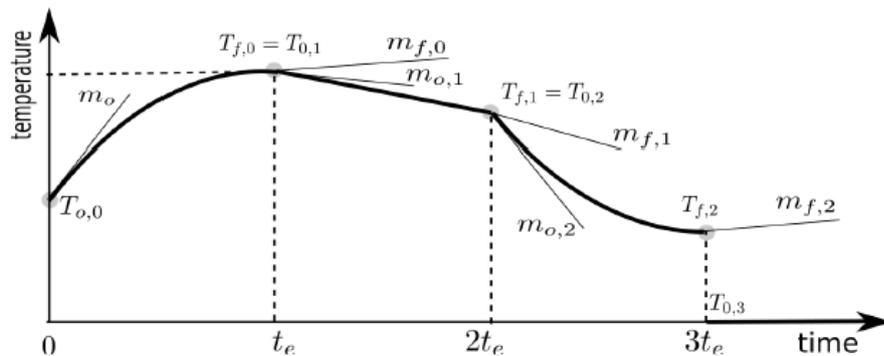


Fig. 3 Evolución temperaturas superficiales cerramiento con elemento formador 2^o orden (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escrivá, & Soto Francés, 2015)

Expresándose la evolución de temperaturas dentro de un intervalo como:

$$T_{-j}(t) = T_{-j,n-1} + \frac{T_{-j,n} - T_{-j,n-1}}{t_e} t - p_{-j,n} t_e \cdot t + p_{-j,n} t^2 \quad (5)$$

En este caso dos parámetros son necesarios para determinar la evolución de la temperatura dentro de un intervalo, concretamente la temperatura al final del mismo ($T_{-j,n}$) y la semiaceleración ($p_{-j,n}$).

Nótese que si las semiaceleraciones son nulas volvemos al método de 1^o orden o de Mittal.

La potencia intercambiada por conducción con este elemento formador se obtiene mediante la expresión:

$$q_{-j,n} = \sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} \cdot Y_{T,j,k} + p_{+j,n-k-1} \cdot Y_{p,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} \cdot Z_{T,j,k} + p_{-j,n-k-1} \cdot Z_{p,j,k}] \quad (6)$$

Mientras que la energía transferida en ese intervalo por conducción a través de dicha superficie se expresa de esta forma:

$$Q_{cond,(n-1) \rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} [T_{+j,n-r} \cdot YY_{T,j,r} + p_{+j,n-r} \cdot YY_{p,j,r}] + \sum_{r=0}^{\infty} [T_{-j,n-r} \cdot ZZ_{T,j,r} + p_{-j,n-r} \cdot ZZ_{p,j,r}] \quad (7)$$

Se destaca que (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escrivá, & Soto Francés, 2015):

- La obtención de los nuevos coeficientes de los factores de respuesta en potencia y en energía tanto para la temperatura como para la semiaceleración no comporta un esfuerzo muy superior de cálculo, ya que el mayor esfuerzo se debe realizar en la determinación de los polos de la función de transferencia del muro y estos son los mismos para todos los casos. Es decir, el “coste computacional” para la determinación de estos nuevos coeficientes de respuesta es básicamente el mismo.
- El número de coeficientes a utilizar en la determinación de la potencia intercambiada y de la energía transferida es el doble que en el caso de linealidad.

Por tanto, para determinar la potencia térmica transferida por conducción en un cerramiento nos hacen falta determinar cuatro incógnitas: la temperatura en el siguiente punto de muestreo en ambas caras del cerramiento ($T_{-j,n}$ $T_{+j,n}$) y la semiaceleración de la temperatura en ambas caras durante el intervalo de muestreo. Para obtener estas incógnitas se establecen dos equilibrios de potencia térmica en las superficies (+ y -) en cada instante de muestreo y dos balances de energía, uno en cada cara del cerramiento, para ese intervalo.

$$Q_{cond,\pm j,n} + q_{rad,\lambda\uparrow,\pm j,n} + q_{rad,src,\pm j,n} + q_{rad,solar,\pm j,n} = q_{conv,\pm j,n} \quad (8)$$

$$Q_{cond,\pm j,(n-1) \rightarrow n} + Q_{rad,\lambda\uparrow,\pm j,(n-1) \rightarrow n} + Q_{rad,src,\pm j,(n-1) \rightarrow n} + Q_{rad,solar,\pm j,(n-1) \rightarrow n} = Q_{conv,\pm j,(n-1) \rightarrow n} \quad (9)$$

3.2 Caso base de comparación

Como aplicación de la nueva metodología, este apartado determina el calor transferido por convección al aire a través de una pared. Los resultados se comparan con la hipótesis estándar de una evolución lineal de las temperaturas superficiales.

El paso de tiempo considerado tanto para el caso lineal como para el parabólico ha sido de 1 hora. Se comparan con el resultado que se considera válido: el caso lineal con paso de tiempo de 5 minutos.

Para determinar el comportamiento del cerramiento y poder realizar los cálculos de forma sencilla, se asumen las siguientes hipótesis de cálculo:

- Fuente de radiación interna de luces y la gente que inciden sobre la superficie interna durante 2 horas; PSRC = 10 [W/m²]. (Se asume que se absorbe toda la radiación incidente)
- Resto de las superficies internas del recinto se mantienen a una temperatura constante $T_r = 22$ [C°].
- La temperatura en la otra cara de la pared se mantiene igualmente a $T_j = 22$ [C°].
- La temperatura del aire seco se mantiene igualmente $T_a = 22$ [C°].
- El coeficiente de radiación equivalente (linealizando la expresión del intercambio radiante a longitud de onda larga) se mantiene constante $hr = 5$ [W/m²K].
- El coeficiente de convección es constante; $hc = 3$ [W/m²K].

4 Resultados

En la tabla 1 se representa el calor que se transfiere por conducción en cada hora cuando los cálculos se realizan con los diferentes métodos de cálculo planteados y paso de tiempo de cálculo diferente para el cerramiento FC01.

Table 1 Energía por conducción (J/m²) cada hora para el cerramiento FC01 según diferentes metodologías y paso de tiempo utilizado

| FC01 | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|--------------|-----------------|-----------------|---|-------------------------|
| Intervalo | Qconducción (J/m ²) | | | | Frente a lineal 5 min (valor-referencia) | |
| | Parabólico 1h | Lineal 1h | Lineal 15min | Lineal 5 min | Diferencia parab 1 h | Diferencia lineal 1h |
| 0-3600 | -26621 | 15949 | 23431 | 25336 | -1285 | 9387 |
| 3600-7200 | -22002 | 22341 | 22455 | 22292 | 290 | -49 |
| 7200-10800 | 6430 | -4834 | 3018 | 5045 | 1385 | -9879 |
| 10800-14400 | 3171 | 2979 | 3461 | 3393 | -222 | -414 |
| 14400-18000 | 2413 | 2556 | 2507 | 2461 | -48 | 95 |
| 18000-21600 | 1910 | 2059 | 1969 | 1939 | -29 | 120 |
| 21600-25200 | 1579 | 1698 | 1619 | 1597 | -18 | 101 |
| 25200-28800 | 1341 | 1435 | 1370 | 1353 | -12 | 82 |
| 28800-32400 | 1160 | 1236 | 1182 | 1169 | -9 | 67 |
| 32400-36000 | 1016 | 1078 | 1033 | 1023 | -7 | 55 |
| 36000-39600 | 897 | 950 | 911 | 902 | -5 | 48 |
| 39600-43200 | 796 | 84 | 80 | 80 | -5 | 41 |
| 43200-46800 | 709 | 2 | 8 | 1 | -4 | 36 |
| 46800-50400 | 633 | 74 | 72 | 71 | -4 | 32 |
| 50400-54000 | 567 | 9 | 0 | 3 | -4 | 32 |
| 54000-57600 | 508 | 66 | 64 | 63 | -3 | 28 |
| 57600-61200 | 455 | 9 | 3 | 7 | -2 | 25 |
| 61200-64800 | 408 | 53 | 51 | 51 | -2 | 23 |
| 64800-68400 | 366 | 5 | 5 | 0 | -2 | 20 |
| 68400-72000 | 328 | 48 | 46 | 45 | -2 | 18 |
| 7200-75600 | 294 | 0 | 1 | 7 | -2 | 16 |
| | | 43 | 41 | 41 | -2 | 15 |
| | | 0 | 4 | 0 | -2 | |
| | | 38 | 37 | 36 | -2 | |
| | | 6 | 1 | 8 | -2 | |
| | | 34 | 33 | 33 | -2 | |
| | | 6 | 3 | 0 | -2 | |
| | | 31 | 29 | 29 | -2 | |
| | | 1 | 9 | 6 | -2 | |

| | | | | | | |
|--------------------|-----|----|----|----|----|----|
| 75600-79200 | | 27 | 26 | 26 | | |
| | 264 | 9 | 8 | 5 | -1 | 14 |
| 79200-82800 | | 25 | 24 | 23 | | |
| | 237 | 0 | 0 | 8 | -1 | 12 |
| 82800-86400 | | 22 | 21 | 21 | | |
| | 213 | 4 | 6 | 4 | -1 | 10 |

Como puede observarse en la Tabla 1 los errores respecto al método de referencia (lineal 5min) que figuran en la tabla van decreciendo con el paso del tiempo. En el caso del método parabólico de 1 h, la diferencia es muy pequeña conforme evoluciona el tiempo. Este es un ejemplo respecto a la solución FC01 y al calor transferido por conducción, pero puede comprobarse en el resto de soluciones que la tendencia y el orden de magnitud son los mismos para las diferentes tipologías analizadas.

La evolución de la temperatura superficial del cerramiento según las diferentes metodologías y paso de tiempo utilizados la observamos en la figura 5.

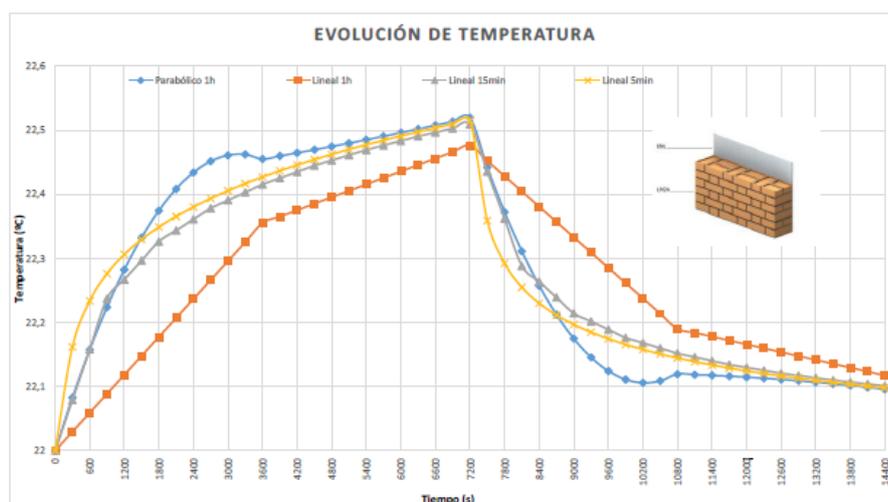


Fig. 5 Evolución de la temperatura superficial según metodología de cálculo y paso de tiempo

Puede observarse que los valores más próximos son los representados por la línea de puntos azul (parabólico 1h) y la línea de cruces amarilla (lineal 5 min). Se pone de manifiesto que la línea que corresponde al método lineal en rojo (de 1h), muestra una evolución de la temperatura muy distinta y más brusca. La tendencia de ajuste entre el método parabólico de 1h y el lineal de 5 minutos, se produce en todos los casos muestreados.

5 Conclusiones

Del anterior estudio presentado se puede concluir:

Los valores de energía transferida al aire para un perfil parabólico con paso de tiempo de 1h son semejantes a los de perfil lineal con un paso de tiempo de 5 min. Y claramente con un perfil lineal y paso de tiempo de 1h los resultados difieren mucho de lo que se podría considerar aceptable.

La evolución real de las temperaturas es desconocida. Un perfil parabólico podría pensarse, a primera vista, que no responde a la física del fenómeno. Pero como se ha demostrado, una relación lineal del perfil de temperaturas también puede verse de ese modo.

En resumen, la elección de la forma de la función puede considerarse arbitraria, el objetivo es que se base en unos criterios que den respuesta a regímenes estables, computacionalmente y económicamente viables.

Para la misma frecuencia de muestreo aplicada a diferentes soluciones constructivas se ha demostrado que en soluciones constructivas con mucha masa del lado de la perturbación, la solución lineal presenta mayor error que la parabólica.

Para la misma frecuencia de muestreo aplicada a diferentes soluciones constructivas se ha demostrado que en soluciones constructivas con el aislante del lado de la perturbación, la solución lineal presenta mayor error que la parabólica.

la base teórica y metodológica de un nuevo modelo para el cálculo de la transferencia de calor en muros busca dar respuesta a las necesidades actuales de exactitud y rapidez en el proceso de diseño tanto de edificios nuevos pero especialmente de los existentes y sus estrategias de rehabilitación.

Citas y referencias

- EPISCOPE Partners. (2014). Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks (EPISCOPE). Intelligent Energy.
- Mitalas, G. (1968). Calculation of transient heat flow through walls and roofs. ASHRAE Transactions 74, 182-188.
- Mitalas, G., & Stephenson, D. (1967). Room thermal response factors. ASHRAE Trans. Vol. 73, Part I. III-2.1. III-2.10.
- Mitalas, G., & Stephenson, D. (1971). Calculation of heat conduction transfer functions for multilayer slabs. ASHRAE Transaction 77, 117-126.
- Pinazo Ojer, J., Soto Francés, V., Sarabia Escrivá, E., & Soto Francés, L. (2015). Thermal response factors to a 2nd order shaping function for the. International Journal of Heat and Mass Transfer 88, 579-590.
- Serrano Lanzarote, B. A., Ortega Madrigal, L., & García-Prieto Ruiz, A. (2011). Catálogo de soluciones constructivas de rehabilitación. Valencia: Instituto Valenciano de la Edificación.

Libro de Actas del 3^{er} Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones
Eco-Eficientes

Soto Francés, V. M. (2008). Guía técnica de procedimientos y aspectos de la simulación de instalaciones térmicas en edificios. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.