

## INTEGRACIÓN DE PUENTES TÉRMICOS EN PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DINÁMICA DE EDIFICIOS MEDIANTE EL MÉTODO DEL MURO EQUIVALENTE

RAMOS MORENO, Elisa; CARRILLO ANDRÉS, Antonio

RODRÍGUEZ GARCÍA, Eduardo A.; FERNÁNDEZ HERNÁNDEZ, Francisco A.

acarrillo@uma.es

Universidad Málaga, E.T.S.I. Industriales, Dpto. de Máquinas y Motores Térmicos, Grupo de Energética

### RESUMEN

Los puentes térmicos son zonas de la envolvente de un edificio en las que se produce una transmisión preferencial de calor cuya causa es una heterogeneidad geométrica o material. Los programas más utilizados de simulación energética de edificios, como DOE-2 [1] o EnergyPlus [2], se basan en una hipótesis unidimensional para modelar la transmisión de calor en los cerramientos. No obstante, evaluar la transferencia de calor en los puentes térmicos implica resolver un problema de conducción bi- o tridimensional en régimen transitorio. Es posible utilizar herramientas especializadas como Voltra [3] o HEAT2 [4], pero no son generalmente aplicables a simulaciones estacionales, debido a su alto coste computacional. Se hace necesario un paso intermedio que conecte las simulaciones globales de edificios con los modelos detallados de puentes térmicos. Una de las aproximaciones más prácticas es la del “muro equivalente”, que consiste en identificar los parámetros de un muro multicapa ficticio, de forma que su respuesta dinámica sea muy próxima a la del elemento real, que tiene efectos 2D o 3D. Esta identificación de parámetros se puede llevar a cabo mediante diversos métodos. En este trabajo se aplica el método de identificación propuesto por Kosny [5] para obtener muros equivalentes que representen los tipos más usuales de puentes térmicos presentes en la construcción residencial española.

**Palabras clave:** puentes térmicos, muro equivalente, Voltra.

## 1. Introducción

Los puentes térmicos son zonas de la envolvente de un edificio en las que se produce una transmisión preferencial de calor debida a una heterogeneidad geométrica o material. La evaluación de su impacto en las prestaciones térmicas del edificio real no es trivial y se realiza empleando herramientas especializadas, como Voltra [3] o HEAT2 [4]. Estos programas consiguen modelar detalladamente el comportamiento bi- y tridimensional de los puentes térmicos, pero no se utilizan por lo general en simulaciones de edificios completos a largo plazo dado su alto coste computacional. Por tanto, es preciso conectar los modelos detallados de puentes térmicos con las simulaciones globales de edificios realizadas por programas, como EnergyPlus [2] y DOE-2 [1], que resuelven las ecuaciones que gobiernan la transmisión de calor considerando sólo flujo unidimensional. Diversos autores [6] han propuesto métodos que permiten, mediante una aproximación, incluir el efecto bi- y tridimensional de los puentes térmicos en los programas de simulación energética unidimensionales, entre ellos, el método del muro equivalente, que consiste en identificar un muro multicapa unidimensional de propiedades ficticias tales que su respuesta dinámica sea muy próxima a la que ofrece el muro original con efectos bi- o tridimensionales. La identificación de las propiedades de los muros equivalentes correspondientes a los tipos de puentes térmicos más usuales en la construcción residencial española se realiza en este trabajo utilizando el método propuesto por Kosny [5].

## 2. Método del muro equivalente

El método del muro equivalente define un muro multicapa ficticio de propiedades tales que su respuesta dinámica sea muy próxima a la del muro real con efectos bi- y tridimensionales. El método para identificar los parámetros característicos del muro equivalente propuesto por Kosny [5] tiene su base matemática en las condiciones impuestas a los factores de respuesta y los coeficientes de la función de transferencia a través de los factores térmicos estructurales.

En este trabajo se implementa el método del muro equivalente mediante el procedimiento que se muestra en la Figura 1. Este proceso se ha automatizado utilizando Matlab [6].

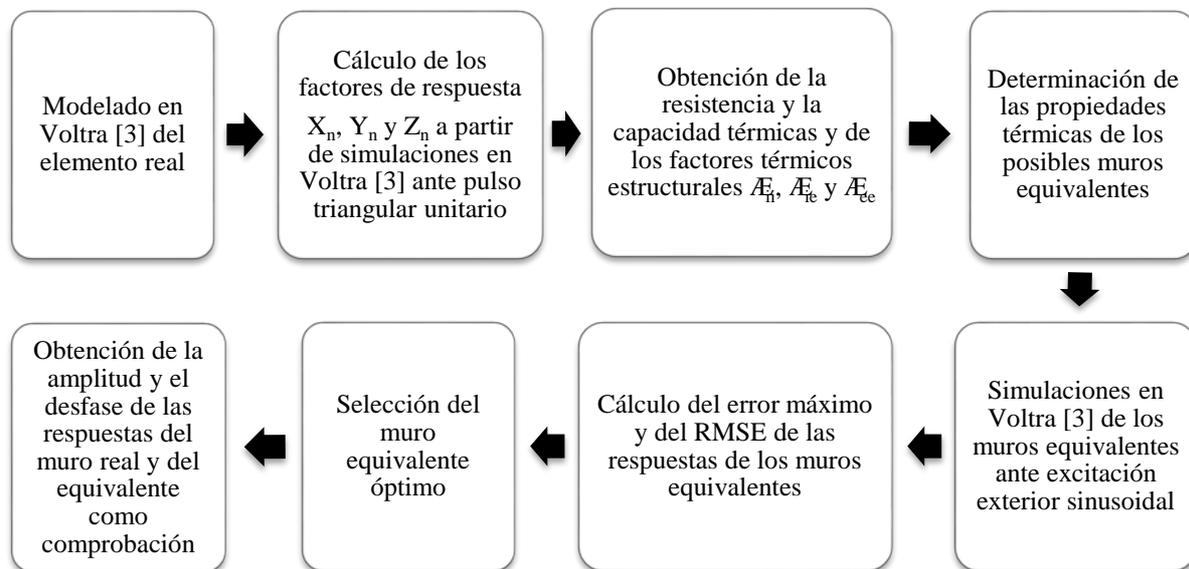


Figura 1: Esquema de implementación del método del muro equivalente automatizado con Matlab [6].

## 3. Aplicación del método del muro equivalente

En este apartado se muestra un resumen de los resultados de aplicar el método del muro equivalente a varios puentes térmicos representativos de las soluciones constructivas habituales en la construcción

residencial española. Las cuatro primeras configuraciones (figuras 2, 4, 6 y 8) se han tomado de la norma [9] y las dos últimas (figuras 10 y 12), del atlas EuroKobra [10]. En todos los casos se han utilizado coeficientes convectivo-radiantes interior  $h_i = 7.69 \text{ W/m}^2\text{-K}$  y exterior  $h_e = 25 \text{ W/m}^2\text{-K}$ . Las propiedades de los materiales se han tomado de la base de datos de Physibel [3] y se encuentran en la tabla 1. En todos los casos se ha optado por muros equivalentes de tres capas, pues la experiencia ha demostrado que es la configuración que ofrece mejores resultados [11].

En la serie de figuras (2-7) se muestra la comparación de los flujos de calor del puente térmico y de su muro equivalente óptimo para temperatura interior constante de  $20^\circ\text{C}$  y una señal de temperatura exterior que enlaza 48 horas de temperatura constante de  $15^\circ\text{C}$  con una señal sinusoidal de valor medio  $20^\circ\text{C}$ , amplitud de  $10^\circ\text{C}$  y período de 24 horas. Además, se puede ver la resistencia térmica del elemento R, así como los errores de amplitud  $E_A$  y desfase  $E_\phi$  de la respuesta del muro equivalente, respecto a la respuesta del elemento 2D calculada con Voltra [3].

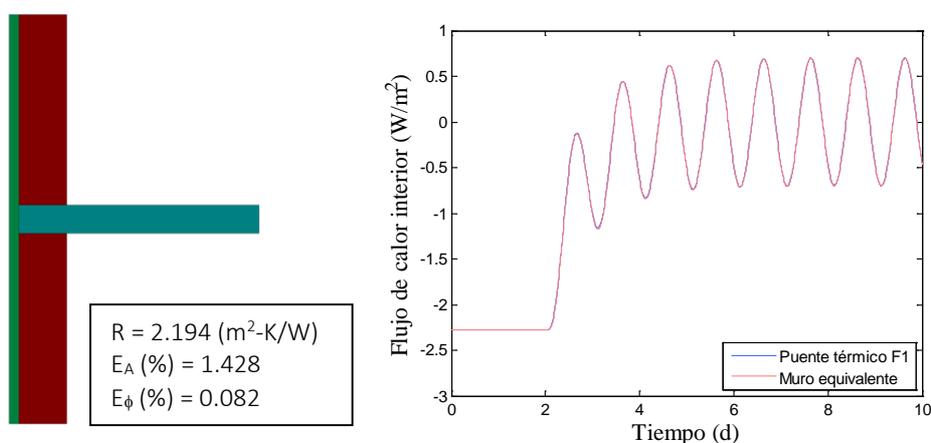


Figura 2: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en el encuentro de un forjado interior con muro exterior tipo F1 [9].

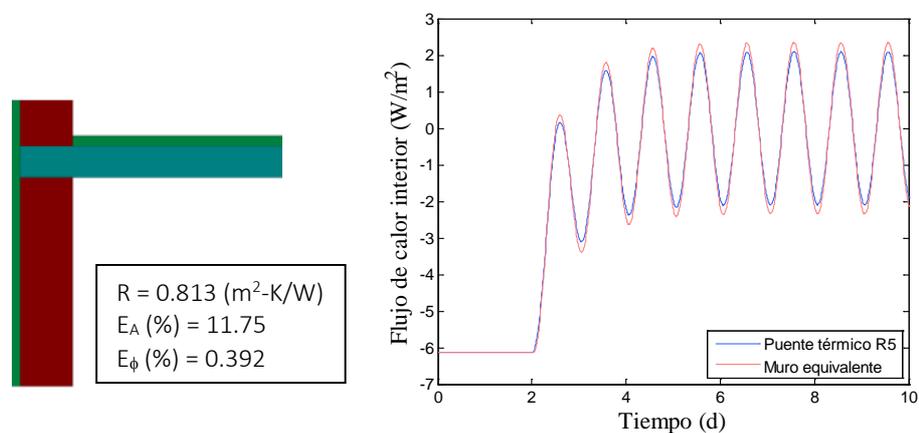


Figura 3: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en un tejado tipo R5 [9].

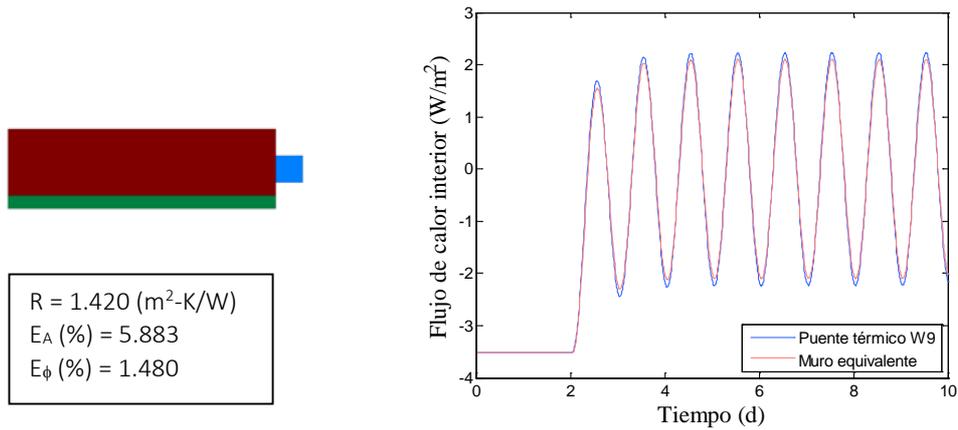


Figura 4: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en el alféizar de una ventana tipo W9 [9].

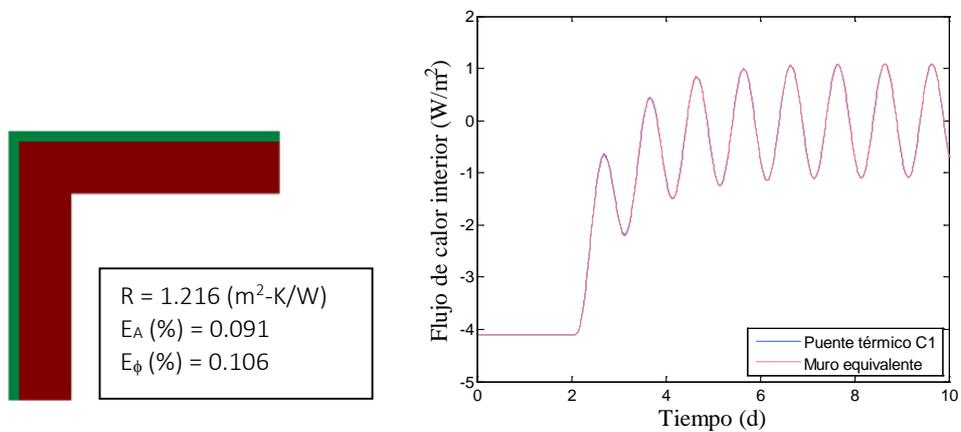


Figura 5: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en una esquina tipo C1 [9].

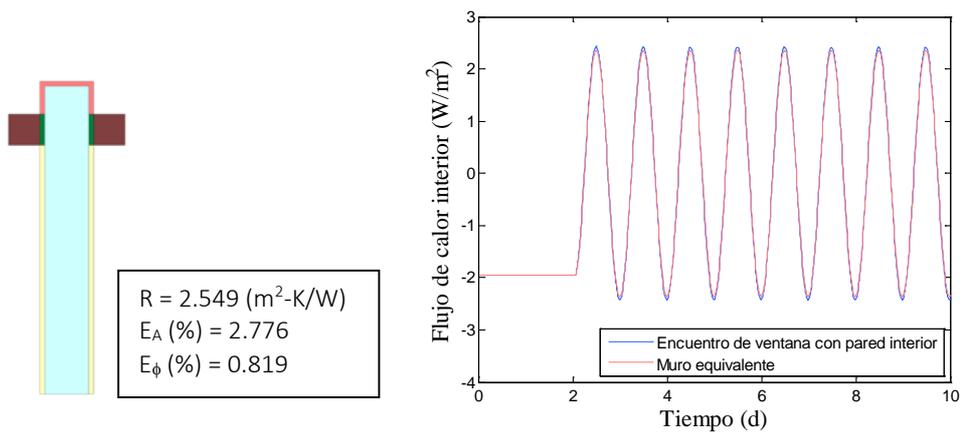


Figura 6: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en el encuentro de una ventana con una pared interior [10].

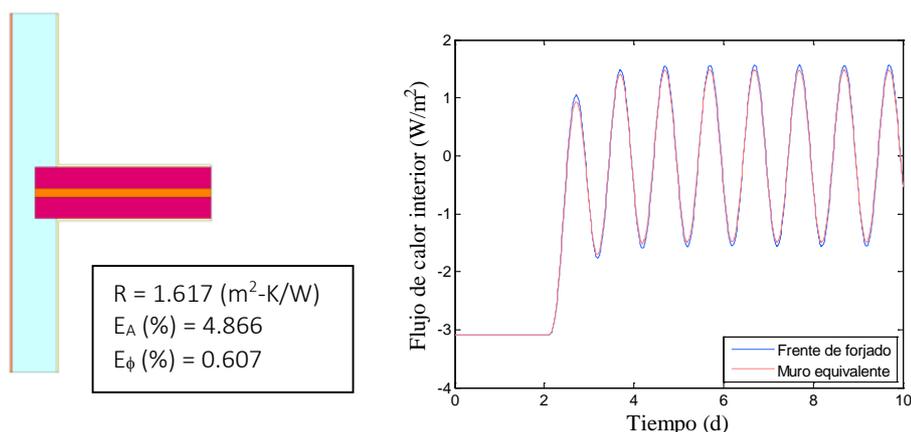


Figura 7: Resultados del ajuste de muro equivalente para un puente térmico formado en un frente de forjado [10].

Tabla 1: Propiedades térmicas de los materiales empleados

Color	Material	Conductividad ( $\text{W/m-K}$ )	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Calor específico ( $\text{J/kg-K}$ )
	Ladrillo 1800	0.9	1800	850
	Hormigón 2300	2.6	2300	930
	Poliuretano	0.028	25	1470
	Madera marco	0.12	600	2340
	Hormigón celular 600	0.2	600	1010
	Yeso	0.5	700	930
	Madera	0.17	700	2070
	Hormigón 900	0.3	900	930
	Mortero 1800	0.95	1800	840
	Lana de vidrio	0.035	20	840
	Ladrillo 1400	0.6	1400	840

El comportamiento de los muros equivalentes ante excitación sinusoidal exterior puede considerarse bueno en general, sin olvidar que se trata de una aproximación. El caso en el que el ajuste resulta menos convincente es para el puente térmico R5, donde el error en amplitud es mayor del 10%. El resto de los muros tiene errores por debajo del 6% en amplitud y, en cuanto a desfase, para todos los casos el error es menor del 1.5%.

El muro equivalente se ha seleccionado a partir de los resultados para excitación exterior sinusoidal y temperatura interior constante, que aproxima situaciones en las que la temperatura interior es bastante estable mientras que la temperatura exterior sigue un patrón diario. No obstante, se ha querido estudiar también cómo actuaría en caso contrario, esto es, ante temperatura exterior de veinte grados centígrados

constante y temperatura interior primero estacionaria y luego sinusoidal, en este caso con un período de doce horas.

Esta situación se ilustra en la figura 8, donde se compara la respuesta de flujo de calor por  $\text{m}^2$  del puente térmico tipo F1, configuración mostrada en la figura 2, con la de su muro equivalente ante excitación sinusoidal interior.

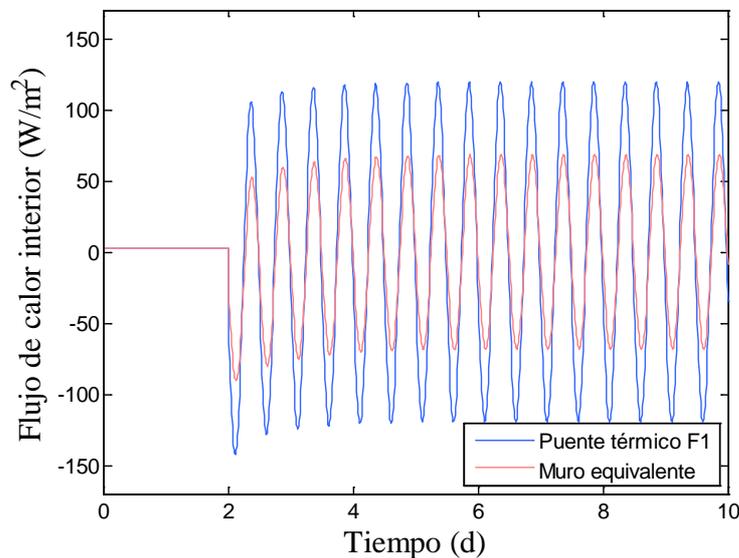


Figura 8: Comparación de los flujos de calor interior por  $\text{m}^2$  entre el puente térmico F1 (figura 2) y su muro equivalente ante excitación sinusoidal interior de período doce horas.

Se observa en la figura 8 que el ajuste en caso de excitación sinusoidal interior no es satisfactorio en cuanto a amplitud, siendo la amplitud la señal correspondiente al muro equivalente el 57.19% de la de la señal correspondiente al muro real; sin embargo, sí responde bien en cuanto a desfase, siendo el error del 6.06%. La calidad del ajuste para estas condiciones de contorno en el resto de puentes térmicos analizados también disminuye notablemente con respecto a la situación de sinusoidal exterior y temperatura interior constante considerada antes. Si bien es cierto que esto no es una circunstancia habitual, pues es en el exterior donde se sitúan normalmente las fluctuaciones, indica las posibles limitaciones de la aproximación.

Por otro lado, es importante resaltar las diferencias en la bondad del ajuste entre los distintos muros equivalentes correspondientes a un mismo puente, a pesar de que todos cumplen las condiciones impuestas por el método, esto es, tienen los mismos valores de resistencia, capacidad y factores estructurales que el muro real. Por ejemplo, en el caso del puente térmico tipo frente de forjado que se muestra en la figura 12, el RMSE en caso del muro equivalente óptimo para una excitación sinusoidal exterior de período 24 horas es de  $0.0511 \text{ W/m}^2$ , mientras que para el muro equivalente de error máximo es de  $0.4636 \text{ W/m}^2$ . En la figura 9 se pueden observar las diferencias entre las respuestas de flujo de calor interior por  $\text{m}^2$  para estos dos muros equivalentes y el muro real. Tales diferencias entre las respuestas de los muros equivalentes hacen indispensable el largo proceso de identificar el óptimo, para lo cual es necesario analizar todas las configuraciones de muros equivalentes obtenidos, calcular sus errores y elegir aquel muro equivalente para el cual éstos son mínimos.

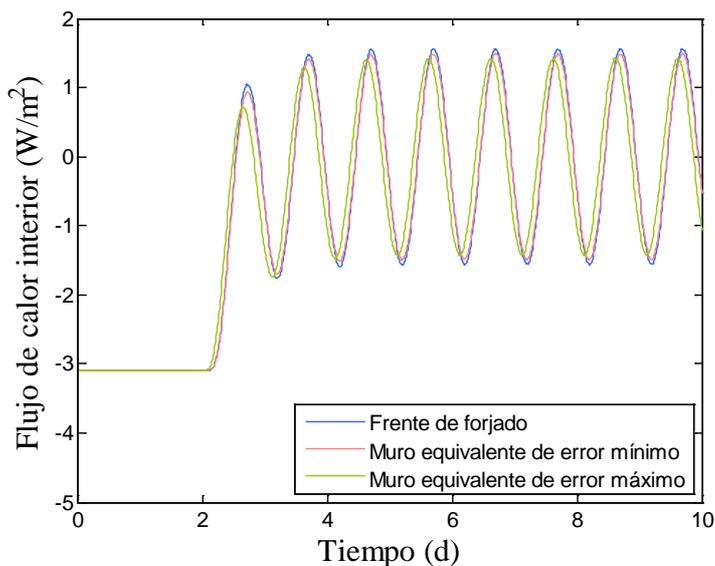


Figura 9: Comparación de las respuestas ante excitación sinusoidal exterior del frente de forjado (figura 7) y sus muros equivalentes de error máximo y mínimo.

También ha sorprendido durante el estudio del método que, en los casos analizados, los factores de respuesta del muro real y el equivalente no coinciden por completo como era de esperar según [5]. Pese a que se conservan los factores estructurales y, por tanto, la suma de los factores de respuesta, lo que son los factores de respuesta en sí son considerablemente distintos para el muro real y el equivalente, como puede verse en la figura 10 para el puente térmico C1 (figura 5), donde se representan los factores de respuesta de ambos muros adimensionalizados frente a los índices  $n$ .

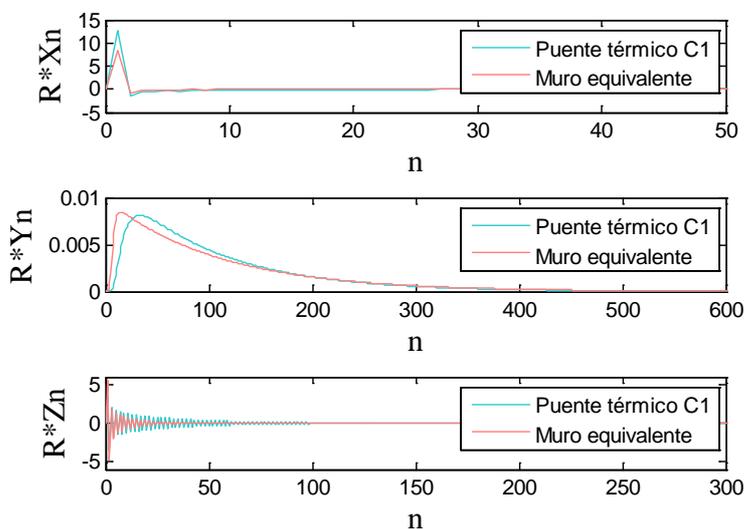


Figura 10: Comparación de los factores de respuesta del puente térmico C1 (figura 5) y de su muro equivalente.

## 4. Conclusiones y consideraciones finales

### 4.1. Conclusiones

Se ha estudiado el método del muro equivalente [5], se ha automatizado el proceso de identificación del muro equivalente y se ha aplicado a distintos tipos de puentes térmicos de interés práctico. El análisis de los resultados indica que el muro equivalente constituye una buena aproximación unidimensional para la mayoría de los puentes térmicos estudiados para la situación de excitación sinusoidal exterior y temperatura interior constante. Sin embargo, bajo otras condiciones, como temperatura exterior constante y excitación sinusoidal interior, o pulso triangular unitario, los resultados no son satisfactorios.

### 4.2. Líneas futuras de investigación

Una vez vistas las limitaciones del método para condiciones térmicas distintas de excitación sinusoidal exterior y temperatura interior constante, se hace necesario explorar posibles variaciones del mismo u otros procedimientos a fin de encontrar una forma de reproducir los efectos 2D o 3D de los puentes térmicos en una superficie unidimensional que sea válida en un conjunto de situaciones más amplio. Por otro lado, el procedimiento implementado en este trabajo se sirve para analizar los puentes térmicos implementados con el programa Voltra [3], que sólo trabaja con elementos rectangulares. Si bien es cierto que permite hacer mallados muy finos, con lo que podrían conseguirse buenas aproximaciones para líneas curvas, sería un avance contar con una herramienta que admitiese formas libres y así poder estudiar puentes térmicos irregulares.

## 5. Referencias

- [1] DOE-2. v49. JH & LBLN, 2015. <http://www.doe2.com>
- [2] EnergyPlus. v8.2. US Department of Energy 2015.
- [3] Voltra. v11.0w. Physibel, 2005. <http://www.physibel.be>
- [4] HEAT2. v8. Light. Blocon, 2011. <http://www.buildingphysics.com/index-filer/heat2.htm>
- [5] KOSNY J., KOSSECKA E. Multi-dimensional heat transfer through complex building envelope assemblies in hourly energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 2002, vol. 34, pp. 445-454.
- [6] MATLAB. Versión 7.10.0. The MathWorks, Inc. 1984-2010.
- [7] CARRILLO A., GARCÍA A., RODRÍGUEZ E., DOMÍNGUEZ F., CEJUDO J. M. Estudio de distintos métodos para el modelado de puentes térmicos en programas de simulación térmica de edificios, VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica, Universidad de Córdoba, 2009.
- [8] CARPENTER S. C., KOSNY J., KOSSECKA E. Modeling transient performance of two-dimensional and three-dimensional building assemblies. *ASHRAE Transactions*, vol. 109 (1), pp. 566-571, 2003.
- [9] UNE-EN ISO 14683:2000. Puentes térmicos en la edificación. Transmitancia térmica lineal. Métodos simplificados y valores por defecto.
- [10] EuroKobra. Versión 3.0w. Physibel, 2002. <http://www.cstc.be>.
- [11] CARPENTER S. C. *Advances in modelling thermal bridges in building envelopes*. Enermodal Engineering Limited, Kitchener, 2001.