



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



©<http://www.tovtoda.co.il>

Nuevo método conservativo
para la simulación de la transferencia de calor
en muros multicapa
basado en perfiles de temperatura parabólicos y
factores de respuesta.

Diciembre 2015

Autor : Laura Soto Francés, arquitecto por UPV
Director: Dr.Ing. José Manuel Pinazo Ojer
Subdirector: Dr. Arq. Begoña Serrano Lanzarote

A mi padre Víctor, *in memoriam*,
por todo lo que hubiéramos podido disfrutar
juntos con esta lectura.

A mi madre Laura,
por ser un modelo de superación para mí,
por su amor,
por cuidar de mis hijos cuando yo no pude.

A mi hermano Víctor,
por su apoyo incólume,
por compartir su inteligencia y su afecto,
por ser mi maestro y mi amigo.

A Javier,
mi refugio, mi razón, mi credo,
con mi amor por su amor.

A Nicolás y Simón,
por recordarme el camino a seguir,
por enseñarme lo que importa de verdad.

Agradecimientos

A José Manuel Pinazo, por servir de referente vital e intelectual, por tanto tiempo tan valioso, por su generosidad, su fe y su cercanía.

A Begoña Serrano, mentora y amiga, por su ayuda en el alfa y el omega de este camino.

A muchos otros amigos y familiares que han contribuido también a que este trabajo saliera adelante, confiando en que sepan reconocerse en esta mención.

Al Instituto Valenciano Valenciano de la Edificación, y a las personas que lo integran, por los medios y el soporte prestado.

RESUMEN

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. Para obtener la temperatura a cada lado se necesita hacer un balance de potencias térmicas en ambas superficies del cerramiento. Esto lleva a que el balance de potencia sea cierto en los instantes de muestreo pero no fuera de ellos y por lo tanto el esquema de cálculo no conserva la energía.

El objetivo planteado es obtener un método de simulación más rápido y preciso. El esquema debe conservar la energía para permitir la toma de saltos por hora de las cargas internas u otras excitaciones y la acción de los sistemas de climatización. La dinámica de HVAC es rara vez considerada y su tiempo de respuesta es más rápido que el edificio, por ello se mantiene el tiempo de frecuencia de muestreo de una hora.

La metodología propuesta demuestra cómo aplicar el método de los factores de respuesta mediante **un polinomio de segundo orden**. Todo ello bajo un esquema que conserva la energía dentro de los puntos de muestreo. El perfil parabólico permite cumplir esta condición entre los puntos de muestreo. Para comprobar la validez del método se comparan resultados entre la función lineal y la parabólica propuesta con la misma frecuencia de muestreo y distinta. Como se expondrá, se concluye que existe una mayor precisión en la temperatura y la energía transferida al aire.

La presente tesis propone substituir pues, el elemento formador de orden 1 por otro de orden 2. Para dar forma a la evolución de temperaturas a cada lado del cerramiento, además del balance de potencias se requiere el balance de energía por lo que el esquema de cálculo es conservativo. El método propuesto permitirá una precisión similar a aumentar la frecuencia de muestreo con un tiempo inferior de cálculo.

Por tanto, se pretende a través de la presente tesis sentar la base teórica y metodológica de un nuevo modelo para el cálculo de la transferencia de calor en muros para 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.

ABSTRACT

The most popular programs building energy simulation and more used are based on the method of response factors (REF) (Mitalas & Stephenson, 1967) to assess the thermal energy demand of buildings. It is sampled with a certain fixed frequency temperature on both sides of an enclosure and between different sampling instants supposed evolution **was linear**. This interpolation is known as forming element (EF) or holder of the sampled signal of order 1. For the temperature on each side is needed to take stock of thermal power on both surfaces of the enclosure. This leads to the balance of power is true in the sampling instants but not outside of them and therefore no calculation scheme conserves energy.

The stated objective is to obtain a method of fast and accurate simulation. The scheme should retain the power to allow the making jumps when internal loads or other excitations and the action of air conditioning systems. HVAC dynamics is rarely considered and its response time is faster than the building, so the sampling time of one hour is maintained.

The **proposed methodology** demonstrates how to apply the method of response factors using a **second order polynomial**. All under a scheme that conserves energy within the sampling points. The parabolic profile can fulfill this condition between sampling points. To check the validity of the method results from the linear function and the proposal function with the same sample rate and comparing different. As discussed, it is concluded that there is greater precision in temperature and the energy transferred to the air.

This thesis proposes to replace it, the trainer of order 1 with another element of order 2. To shape the evolution of temperatures on each side of the enclosure, in addition to the balance of powers balance of power is required so the scheme calculation is conservative. The proposed method gives a similar increase the sampling frequency with a lower precision computation time.

Therefore, it is intended through this thesis lay the theoretical and methodological basis of a new model for calculating heat transfer in walls to meet the current needs of accuracy and speed in the process of designing both buildings but especially new and existing renovation strategies.

RESUM

Els programes de simulació energètica d'edificis més coneguts i empleats utilitzen el mètode dels factors de resposta (REF) (Mitalas & Stephenson, 1967) per avaluar la demanda d'energia tèrmica dels edificis. Es mostreja amb certa freqüència fixa la temperatura a banda i banda d'un tancament i entre instants de mostreig diferents se suposa que la seva evolució va **ser lineal**. Aquesta interpolació es coneix com a element formador (EF) o sostenedor del senyal muestreada d'ordre 1. Per obtenir la temperatura a cada costat es necessita fer un balanç de potències tèrmiques en amb dues superfícies del tancament. Això porta al fet que el balanç de potència sigui cert en els instants de mostreig però no fora d'ells i per tant l'esquema de càlcul no conserva l'energia.

L'objectiu plantejat és obtenir un mètode de simulació més ràpid i precís. L'esquema ha de conservar l'energia per permetre la presa de salts per hora de les càrregues internes o altres excitacions i l'acció dels sistemes de climatització. La dinàmica de HVAC és rares vegades considerada i el seu temps de resposta és més ràpid que l'edifici, per això es manté el temps de freqüència de mostreig d'una hora.

La **metodologia proposada** demostra com aplicar el mètode dels factors de resposta mitjançant **un polinomi de segon ordre**. Tot això sota un esquema que conserva l'energia dins dels punts de mostreig. El perfil parabòlic permet complir aquesta condició entre els punts de mostreig. Per comprovar la validesa del mètode es comparen resultats entre la funció lineal i la parabòlica proposta amb la mateixa freqüència de mostreig i diferent. Com s'exposarà, es conclou que existeix una major precisió en la temperatura i l'energia transferida a l'aire.

La present tesi proposa substituir doncs, l'element formador d'ordre 1 per un altre d'ordre 2. Per donar forma a l'evolució de temperatures a cada costat del tancament, a més del balanç de potències es requereix el balanç d'energia pel que l'esquema de càlcul és conservatiu. El mètode proposat permetrà una precisió similar a augmentar la freqüència de mostreig amb un temps inferior de càlcul.

Per tant, es pretén a través de la present tesi asseure la base teòrica i metodològica d'un nou model per al càlcul de la transferència de calor en murs per donar resposta a les necessitats actuals d'exactitud i rapidesa en el procés de disseny tant d'edificis nous però especialment dels existents i les seves estratègies de rehabilitació.

ÍNDICE

1	Introducción	13
1.1	Contexto	13
1.2	Antecedentes.....	16
1.3	Objetivo	17
1.4	Metodología y fuentes	18
1.5	Contenido	19
2	Simulación energética de edificios	21
2.1	Introducción.....	21
2.2	Concepto básico de la simulación.....	21
2.3	Herramientas de simulación	25
3	Transferencia de calor en cerramientos	29
3.1	Breve revisión de métodos	29
3.2	Método de Factores de respuesta	31
3.3	El caso particular de EnergyPlus	33
3.3.1	<i>Contexto</i>	33
3.3.2	<i>Fundamentos</i>	35
3.3.3	<i>Función de transferencia</i>	37
4	Revisión crítica y propuesta de modelo	41
4.1	Ecuación de segundo grado	42
4.2	Transformada de Laplace de 2ºOrden	43
4.3	Transformada de Laplace de flujo de calor por conducción	45
4.4	Flujo de transferencia de calor por conducción.....	49
4.4.1	<i>Energía entre intervalos de tiempo</i>	51
5	Aplicación y resultados a un cerramiento multicapa genérico	55
5.1	Aplicación	55
5.1.1	<i>Definición del cerramiento</i>	55
5.1.2	<i>Coeficientes de respuesta (Mitalas)</i>	55

5.1.3	<i>Estructura de variación de las funciones (Método Mitalas)</i>	57
5.1.4	<i>Coeficientes de respuesta (Método propuesto)</i>	59
5.2	Resultados	64
5.2.1	<i>Definición de condiciones de contorno</i>	64
5.2.2	<i>Calor liberado al aire</i>	64
5.2.3	<i>Calor liberado al aire (método lineal)</i>	65
5.2.4	<i>Calor liberado al aire (función parabólica)</i>	68
5.2.5	<i>Comparación del calor liberado al aire de acuerdo con el método empleado</i>	72
5.3	Conclusiones de la aplicación.....	73
5.4	Otros intercambios de calor	75
6	Aplicación y resultados a distintas soluciones constructivas	77
6.1	Introducción	77
6.2	Breve reseña	77
6.3	Rehabilitación energética: fachadas y cubiertas	80
6.3.1	<i>Aplicación: Muros máxicos con distinta posición de aislante</i>	81
6.3.2	<i>Aplicación: Muros doble hoja con distinta posición de aislante</i>	86
6.4	Rehabilitación energética: cubiertas	93
6.4.1	<i>Aplicación: Cubiertas con distinta posición de aislante</i>	93
6.5	Tipos constructivos modelizados	98
6.6	Resultados de la aplicación	99
6.6.1	<i>Precisión del método</i>	99
6.6.2	<i>Patrones de precisión</i>	104
6.6.3	<i>Sistema conservativo</i>	114
7	Conclusiones y futuras líneas de investigación	119
7.1	Consideraciones generales	119
7.2	Comentarios a los resultados de aplicación	119
7.3	Cumplimiento del objetivo propuesto	120
7.4	Futuros trabajos.....	121
8	Índice de Figuras	123
9	Índice de Tablas	127
10	Bibliografía	129

11 Anexo I. Fichas técnicas de muros testeados	133
11.1 Muros doble hoja con distinta posición de aislante	141
11.2 Cubierta con distintas posiciones de aislante.....	151
12 Anexo II. Resultados de la modelización.....	159
12.1 Resultados modelo fachada FC01	161
12.2 Resultados modelo fachada FC01 EXT	165
12.3 Resultados modelo fachada FC01 INT	169
12.4 Resultados modelo fachada FC02.....	173
12.5 Resultados modelo fachada FC02 EXT	177
12.6 Resultados modelo fachada FC02 INT	181
12.7 Resultados modelo fachada FC02 MED	185
12.8 Resultados modelo fachada QB01	189
12.9 Resultados modelo fachada QB01 EXT.....	193
12.10 Resultados modelo fachada QB01 INT.....	197
13 Anexo III. Modelos para coeficientes de convección	201
13.1 Introducción.....	201
13.2 Algoritmos de convección interior	203
13.2.1 <i>Adaptive Convection Algorithm</i>	203
13.2.2 <i>Simple</i>	204
13.2.3 <i>CIBSE</i>	204
13.2.4 <i>CeilingDiffuser</i>	204
13.2.5 <i>Cavity</i>	204
13.2.6 <i>TARP</i>	205
13.3 Algoritmo de convección exterior.....	206
13.3.1 <i>Adaptive Convection Algorithm</i>	206
13.3.2 <i>Simple Combined</i>	207
13.3.3 <i>CIBSE</i>	207
13.3.4 <i>ASHRAE Vertical Wall</i>	207
13.3.5 <i>TARP</i>	207
13.3.6 <i>DOE-2</i>	207
13.3.7 <i>MoWiTT</i>	207
13.4 Conclusiones.....	208
14 Anexo IV. Transferencia de calor unidireccional multicapa Método Lineal	209

14.1	Planteamiento del problema	209
14.2	Factores de respuesta	222
14.2.1	<i>Cálculo de las raíces</i>	229
14.2.2	<i>Obtención de los factores de respuesta</i>	232
15	Anexo V. Determinación práctica de las antitransformadas de Laplace utilizadas.....	251

*“If you have built castles in the air, your work need not be lost; that is where they should be.
Now put the foundations under them.”*

Henry David Thoreau

1 Introducción

1.1 Contexto

De acuerdo con las estimaciones de la Comisión Europea el uso de los edificios es responsable del 40% de consumo de energía final en la Unión Europea¹. Así mismo, las mismas estimaciones consideran la actuación sobre la eficiencia energética en el uso de los edificios como el segundo sector con mayor potencial de ahorro después de la producción de energía. Por ambos motivos, la Comisión Europea considera prioritaria la actuación en el sector de la edificación, tanto mediante la regulación de los nuevos edificios como de la mejora del parque existente, como instrumento para conseguir modificar la tendencia actual de reducción del consumo energético de la Unión Europea, alejada de los objetivos marcados para el año 2020.

En Europa este objetivo se materializa en la Directiva 2002/91/CE, en lo referente a la certificación energética, y la Directiva 2010/31/UE, de 19 de mayo, relativa a la eficiencia energética de los edificios, junto con la *Concerted Action Energy Performance of Buildings* (EPDB) que involucra a los Ministerios e instituciones encargadas de preparar los aspectos técnicos, legales y administrativos en cada uno de los Estados Miembros para el cumplimiento de las mencionadas directivas.

Como parte de la evaluación y revisión de la eficiencia energética de los edificios, según lo dispuesto en el art. 19 de la Directiva, la Comisión Europea ha lanzado una consulta pública² que se desarrollará hasta el 31 de octubre.

El objetivo de esta consulta es consultar a las partes interesadas sobre la revisión de la eficiencia energética de los edificios y evaluar si la Directiva ha cumplido sus objetivos. La consulta también explorará cuestiones en relación con el Smart Finanzas para la iniciativa de edificios inteligentes y los enlaces de la directiva con otras áreas de la política energética. La consulta se divide en 12 secciones, y está diseñado para los encuestados a responder a las preguntas que cubren su área de especialización y / o preocupaciones.

Uno de los objetivos es la modificación de las normativas de edificación, con el fin de construir edificios más eficientes energéticamente.

La transposición de las directivas europeas mencionadas se materializa con la puesta en marcha del Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE (RD 314/2006, de 19 de octubre de 2006), principalmente en sus documentos de Ahorro de Energía y Salubridad (CTE-HE y CTE-HS, respectivamente). El Documento Ahorro de Energía, ha sido modificado recientemente a través de la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre, por la que se actualiza el Documento Básico DB-HE «Ahorro de Energía», del Código Técnico de la Edificación, aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. También a través del Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios (RITE) de 2013, versión actualizada del Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, teniendo en

¹Fuente http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/construction/en0021_en.htm

² La consulta pública ha sido publicada en : <https://ec.europa.eu/energy/en/consultations/public-consultation-evaluation-energy-performance-buildings-directive>

cuenta las correcciones de errores y modificaciones realizadas sobre el mismo a partir de su publicación en el B.O.E. del 29 de agosto de 2007.



Figura 1 Herramientas de la transposición. Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Certificación Energética de los Edificios en España a través del Real Decreto 235/2013 de 5 de abril, por el que se aprueba el Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios, tanto de nueva construcción, como existentes, que permite asignar a los edificios una determinada clase energética en función de su eficiencia energética.

Respecto a la herramientas de simulación disponibles a nivel estatal para dicha certificación energética, se encuentra publicada desde agosto de 2015 y en periodo de pruebas, la herramienta de simulación energética de edificios oficial que incluye el módulo de certificación y la adaptación a las últimas modificaciones del marco reglamentario derivadas de la Orden FOM/1635/2013, de 10 de septiembre (BOE de 12 de septiembre), por la que se actualiza el Documento Básico DB HE «Ahorro de Energía» del Código Técnico de la Edificación, modificando las exigencias de eficiencia energética que deben cumplir los edificios para satisfacer el requisito básico de ahorro de energía de la Ley de Ordenación de la Edificación.

Esta herramienta incluye la unificación en una sola plataforma de los programas generales oficiales empleados hasta la fecha para la evaluación de la demanda energética y del consumo energético (LIDER-CALENER), así como la adaptación de estas aplicaciones a los cambios introducidos por el DB-HE del año 2013.

Permite la verificación de las exigencias 2.2.1 de la sección HE0, 2.2.1.1 y punto 2 del apartado 2.2.2.1 de la sección HE1 del Documento Básico de Ahorro de Energía DB-HE. La exigencia establecida para edificios de nueva construcción de uso distinto al residencial privado en el apartado 2.2.2 de la sección HE0 debe verificarse, tal como establece el DB-HE, según el procedimiento básico para la certificación energética de edificios. Otras exigencias de las secciones HE0 y HE1 que resulten de aplicación deben verificarse por otros medios.

Rehabilitación energética

En España, especialmente entre los años 1950 y 1980, la construcción de edificios residenciales vivió un crecimiento sin precedentes³, para responder a la importante demanda de viviendas. Esto quiere decir que el parque actual de viviendas en España consta, en una proporción muy significativa, de viviendas construidas durante aquel período.

Año de construcción	Nº de viviendas	Periodos normativos	Nº de viviendas
<1940	1.446.551	Previo NBE.CT79	9731888
1940-1960	1.861.769		
1961-1980	6.423.568		
1981-2007	7.001.473	Previo CTE	7.001.473
2008-2011	795.157	Posterior CTE	795.157

Tabla 1. Nº de viviendas según año de construcción. Fuente: INE. Elaboración propia.

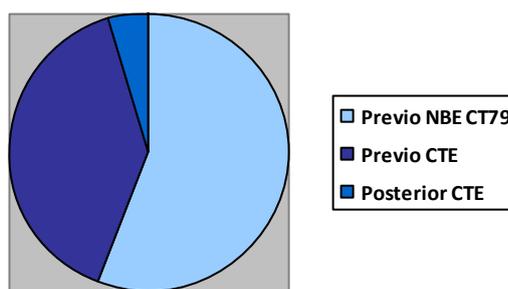


Figura 2 Distribución del parque de viviendas según el año de construcción.

Fuente : INE. Elaboración propia.

Estos edificios fueron concebidos y diseñados, en algunos de sus aspectos, sin normativa alguna que estableciera unos niveles mínimos de calidad o que, al menos, pudiera orientar a los técnicos. Así, por ejemplo, la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas de los edificios apareció en una fecha tan tardía como el año 1979. Por lo tanto, es difícil encontrar fachadas y cubiertas construidas anteriormente a ese año que incorporen un aislante térmico. Ello convierte a estos edificios en grandes consumidores de energía, provocando un aumento progresivo de las emisiones de CO₂.

Así pues, una de las principales tendencias para alcanzar estándares de confort bajo unos razonables parámetros de consumo energético es lo que se conoce con el

³ Fuente el Catálogo de soluciones constructivas de Rehabilitación es un Documento Reconocido según lo dispuesto en el Decreto 132/2006, de 29 de septiembre, del Consell, por el que se regulan los Documentos Reconocidos para la Calidad en la Edificación, tiene el objetivo de ayudar a los técnicos que tengan que acometer una rehabilitación energética.

nombre de “arquitectura bioclimática”, que considera al edificio como la integración de medios de acondicionamiento capaces de interactuar con el ambiente exterior para admitir los factores ambientales favorables y defenderse de los desfavorables.

Por ello, es necesario recurrir al diseño arquitectónico y constructivo del edificio como primera medida en materia de eficiencia energética, de este modo la “arquitectura pasiva” permite un uso racional de la energía para accionar sistemas de control y regulación, o para alimentar instalaciones adicionales que sean complemento de sistemas de acondicionamiento pasivo en condiciones extremas.

Por tanto, el objetivo primero al abordar una rehabilitación energética será la mejora de la envolvente, y la parte de los cerramientos representan un potencial frente al ahorro energético, por lo que éstos requieren un análisis más realista en su comportamiento.

El análisis del comportamiento térmico de un edificio puede resolverse con programas de simulación capaces de analizar el fenómeno de la transferencia de calor. Debido a la relevancia de la rehabilitación energética como objetivo imprescindible para alcanzar los objetivos fijados en la estrategia 2020, hoy se demanda un método científico para estudiar rigurosamente el comportamiento térmico de los cerramientos.

Por todo ello, ha habido un auge en el empleo y utilidades aplicadas a las herramientas de simulación energética. Se realizan multitud de simulaciones energéticas de edificios (BEM Building Energy Model) para determinar su comportamiento y estimar las variaciones que suponen en el consumo de energía las distintas propuestas de mejora.

En consecuencia, parece lógico que cualquier acción que mejore la herramienta de análisis y de toma de decisiones en una mejora en la eficiencia energética de un proyecto de edificación supondrá un aumento en la calidad del mismo. Debe, por tanto, mantenerse una perspectiva global del flujo de trabajo de diseño. Este flujo, al optimizarse, ofrece posibilidades que mejoran las prestaciones de un proyecto sin suponer un aumento en la carga de trabajo.

1.2 Antecedentes

El análisis del comportamiento térmico de un edificio puede resolverse con programas de simulación capaces de analizar el fenómeno de la transferencia de calor. Generalmente en los modelos dinámicos se supone una transferencia de calor unidimensional. Comúnmente las técnicas utilizadas se basan en diferentes métodos finitos (ESP, APACHE-sim, K2, SERI-ES, htb-2), métodos de convolución basados en la función de transferencia de calor por conducción (BLAST, TARP, DOE-EnergyPlus, TRNSYS).

Sin embargo, algunos de ellos todavía requieren algún enfoque más comercial y hay aspectos en los que actualmente se investiga para mejorar estos modelos tales como:

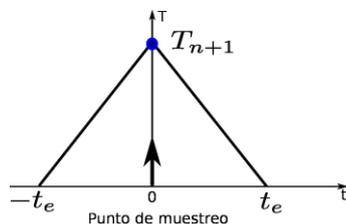
- El desarrollo de un nuevo software y nuevos enfoques de simulación.
- Desarrollo de técnicas de simulación y de datos relativos a determinados fenómenos físicos (por ejemplo, convección, conducción, radiación solar, la ventilación, la alta inercia térmica).

- Investigación y optimización del rendimiento de nuevas o existentes tecnologías (por ejemplo aislamiento transparente, dobles fachadas, controles, sistemas de aire acondicionado, fotovoltaica).
- Desarrollo de los códigos, estándares y métodos de cálculo simplificados.
- Educación. A pesar de que la comunidad científica está involucrada en este campo desde hace más de treinta años, la mayor parte del software comercial disponible, que se difunde ampliamente y acepta por todo el mundo, da algunas dificultades cuando se utiliza para simular, por ejemplo la construcción muy masiva (el origen está en que estos programas tienen motores de cálculo originarios de EE.UU. donde dichas características edificatorias- típicas de climas mediterráneos- no existen).

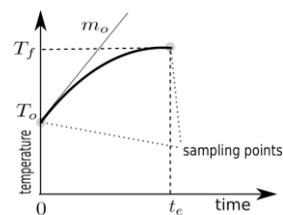
En trabajos anteriores diversos autores han demostrado que *Thermal Building Simulation* (TFM) tiene algunos problemas cuando se aplica a los edificios mediterráneos, caracterizados por un alto valor de la inercia térmica. (Beccali G., M. Cellura, Giarre L., Lo Brano V., Orioli A .. 2002).

1.3 Objetivo

El objeto de esta tesis es proponer un nuevo modelo para el cálculo de la transferencia de calor en cerramientos basado no sólo en el balance de potencias térmicas en ambas caras del cerramiento como se ha hecho hasta el momento en los programas de simulación energética, sino teniendo en cuenta además el balance de energía, de manera que el esquema de cálculo sea así conservativo entre los puntos de muestreo, como está representado conceptualmente en los siguientes esquemas.



ELEMENTO FORMADOR ORDEN 1



ELEMENTO FORMADOR ORDEN 2

Figura 3 Elementos formador lineal y parabólico. Fuente: Elaboración propia.

Los programas de simulación más conocidos y empleados utilizan el método de los factores de respuesta (REF) (Mitalas & Stephenson, 1967). 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. El balance de potencias requerido, para conocer la evolución de la temperatura, es cierto en los instantes de muestreo pero no fuera de ellos, y por lo tanto el esquema de cálculo no conserva la energía.

Se propone substituir el elemento formador de orden 1 por otro de orden 2. Para dar forma a la evolución de temperaturas a cada lado del cerramiento, además del balance de potencias se requiere el balance de energía por lo que el esquema de cálculo es conservativo. La función tiene como fin conseguir un esquema horario tan preciso (sobre la temperatura y energía transferida) como sea posible a otros métodos de frecuencia de muestreo más altas.

Para verificar la validez del método propuesto se compara con los actuales con mayor frecuencia de muestreo, debido a la mayor precisión del método propuesto pese a un menor muestreo el resultado será similar. La ventaja subyacente en este chequeo es la rapidez del método propuesto, ya que el muestreo requerido es menor, y por tanto se recorta el tiempo de cálculo para una misma precisión.

Hay una necesidad de desarrollar una mejor comprensión de la simulación energética y poner en práctica técnicas para lograr edificios energéticamente eficientes. Se espera que la información contenida en este documento puede ayudar a aumentar la comprensión de las técnicas de simulación de energía y animar a los profesionales a tener la confianza para utilizar las herramientas de simulación como herramientas de diseño eficaces.

1.4 Metodología y fuentes

El objeto de la investigación se adapta al método científico, de manera que a partir hechos reales o modelos físicos contrastados se propone una hipótesis, en este caso integrada en un modelo de simulación, que una vez verificada mediante la correlación con un modelo de simulación actual reconocido de lugar a la tesis.

Las principales fuentes bibliográficas utilizadas se describen en el apartado de Bibliografía y tratan de una amplia gama de disciplinas teóricas y aplicadas, destacando las siguientes:

- Física de la transmisión del calor.
- Tratados de calefacción y refrigeración, especialmente los publicados por ASHRAE.
- Normas técnicas.
- Tratados de construcción.
- Informática.
- Artículos científicos.
- Manuales de los programas.

Las fuentes propias utilizadas en la investigación consisten fundamentalmente en una amplia colección de programas informáticos aplicados a la simulación energética de edificios, entre los que destacan varios prototipos de modelos de simulación del comportamiento térmico desarrollados en los últimos años.

Para validar la metodología propuesta: se emplea una herramienta desarrollada por el Grupo de Investigación FREDSOL del Departamento de Termodinámica Aplicada en el que se ha colaborado para su desarrollo y que permite de una manera ágil y sencilla emplear el método de Mitalas por una parte y el propuesto con el fin de comparar resultados entre ambos.

Aplicación:

1º se realiza en detalle para un cerramiento tipo,

2º para cerramientos empleados en el campo de la rehabilitación energética, teniendo en cuenta dos variables relevantes como son la posición del aislante y la inercia del cerramiento.

1.5 Contenido

El presente trabajo tiene dos partes: una primera fase (capítulo 1-2) en la que se describe el estado del arte (explicando las metodologías actuales de cálculo).

En una segunda fase (capítulo 3-4) se estudia en concreto los modelos empleados para la transferencia de calor por conducción en muros. De una manera crítica se hace una revisión del método más empleado proponiendo uno que ofrezca más rigurosidad. Para establecer la validez de dicho modelo se comparan resultados de ambos en la aplicación a un muro multicapa genérico.

En una tercera fase (capítulo 5) se aplica el modelo a distintas soluciones de muro frecuentes en el campo de la rehabilitación energética residencial, manejando variables como la situación del aislante dentro del muro o la inercia del mismo.

En una fase final (capítulo 6) se elaboran una serie de conclusiones y se reflexiona sobre futuras líneas de investigación a partir del trabajo realizado.

Finalmente, una última parte está constituida por anexos que extienden y completan el trabajo. A continuación se realiza un breve resumen de cada uno de los capítulos:

- El capítulo 1 hace una introducción al problema planteado en este trabajo, se mencionan los objetivos, la metodología y el contenido de la tesis.
- El capítulo 2 se dedica a hacer una revisión de los programas de simulación, origen de los mismos, objetivos y principales recursos en este campo.
- El capítulo 3 se comentan los distintos modelos para el cálculo de la transferencia de calor por conducción en muros. En este capítulo se realiza una revisión del estado del arte.
- El capítulo 4 realiza una revisión de cómo los modelos de simulación resuelven la transferencia de calor por conducción y en detalle se estudia uno de los modelos más usados (EnergyPlus). A partir de esta revisión crítica se propone una alternativa al modelo más frecuente.
- En el capítulo 5 se aplica dicho método en detalle a un muro multicapa tipo.
- En el capítulo 6, y basándose en la elección de los modelos por razones de aplicabilidad en el campo de la rehabilitación energética residencial, se aplica dicho método a modelos tipo de muro con variación de posición del aislante y con distintas inercias.
- El capítulo 7, recoge las conclusiones más importantes obtenidas del presente trabajo y se detallan aquellas futuras líneas de desarrollo que se consideran más interesantes.

En el apartado de Anexos del presente documento se hace referencia a:

Anexo I Fichas técnicas de los muros testeados

Anexo II Resultados de la modelización

Anexo III Modelos para coeficientes de convección

En este anexo se hace una sencilla relación de los modelos de cálculo de los coeficientes de convección tanto exteriores como interiores.

Anexo IV. Transferencia de calor unidireccional multicapa Método Lineal

En este anexo se desarrolla en detalle el modelo lineal de cálculo para la transferencia de calor por conducción.

Anexo V. Determinación práctica de las antitransformadas de Laplace utilizadas

En este anexo se establecen los procesos matemáticos requeridos para el desarrollo del modelo propuesto y la resolución de las ecuaciones.

La propuesta del método planteada en la presente tesis se haya publicada en la revista nº 88 International Journal of Heat and Mass Transfer, de abril de 2015, con el título *Thermal response factors to a 2nd order shaping function for the calculation of the 1D heat conduction in a multi-layered slab* Formando parte del equipo de autores junto al grupo de investigación FREDSON del Departamento de Termodinámica Aplicada de la UPV. Por ello, repetidas veces será referenciado dicho artículo en la presente tesis doctoral. Sobre todo la parte de propuesta del método contenida en el capítulo 4, así como la aplicación en detalle a un muro multicapa.

2 Simulación energética de edificios

2.1 Introducción

La eficiencia energética de los edificios es importante tanto desde el punto de vista económico como desde el punto de vista ambiental. Existe ya una amplia tecnología para un ahorro sustancial de energía en el sector de la construcción, pero este potencial de ahorro aún está por explotar plenamente. Para lograr los objetivos de eficiencia, los profesionales involucrados requieren de herramientas de diseño eficaces para analizar y comprender el complejo comportamiento de los edificios en el uso de energía. En la última década, la simulación energética de edificios asistida por ordenador se ha empleado para proporcionar una evaluación precisa y detallada del diseño de edificios en materia de energía. Diversos autores sostienen, desde hace décadas, que la simulación energética es un potente método analítico para la base de la investigación y la evaluación del diseño arquitectónico frente al comportamiento energético de los edificios (Clarke & Maver, 1991).

Sin embargo, la aplicación de la simulación en el diseño del edificio es problemático porque las herramientas de simulación son complicadas y muchos profesionales no están familiarizados con sus propiedades y limitaciones. En la vida real, la naturaleza del proceso de diseño de los edificios y las deficiencias de las herramientas de simulación actuales han hecho que sea difícil para el arquitecto, en concreto, y para otros profesionales involucrados en el proceso, utilizar estas herramientas de manera eficiente.

2.2 Concepto básico de la simulación

Las herramientas de simulación han sido construidas tradicionalmente para reducir la complejidad del sistema subyacente de ecuaciones en un intento de disminuir la carga de entrada de datos computacional del usuario.

Las herramientas de simulación energética predicen la eficiencia energética de un edificio determinado así como el confort térmico de sus ocupantes. En general, apoyan la comprensión de cómo un edificio determinado funciona de acuerdo a ciertos criterios y permiten la comparación de diferentes alternativas de diseño. Existen limitaciones en prácticamente todas las herramientas disponibles de este tipo hoy en día.

Por lo tanto, es necesario entender ciertos principios básicos de simulación de energía. En primer lugar, cualquier resultado de la simulación sólo puede ser tan exacto como los datos de entrada para la simulación. Como se ilustra en la Figura 4, la entrada se compone principalmente de la geometría del edificio, cargas internas, sistemas de climatización y componentes, datos meteorológicos, estrategias de operación y horarios y parámetros específicos de simulación. Cada simulación se basa en ecuaciones termodinámicas, principios y suposiciones. Dado que los procesos térmicos en un edificio son complejas, los programas de simulación de energía aproximan sus predicciones mediante ecuaciones y métodos calificados. Por lo tanto, los resultados pueden ser imprecisos, si ciertos supuestos no se cumplen en la simulación respecto a la realidad.

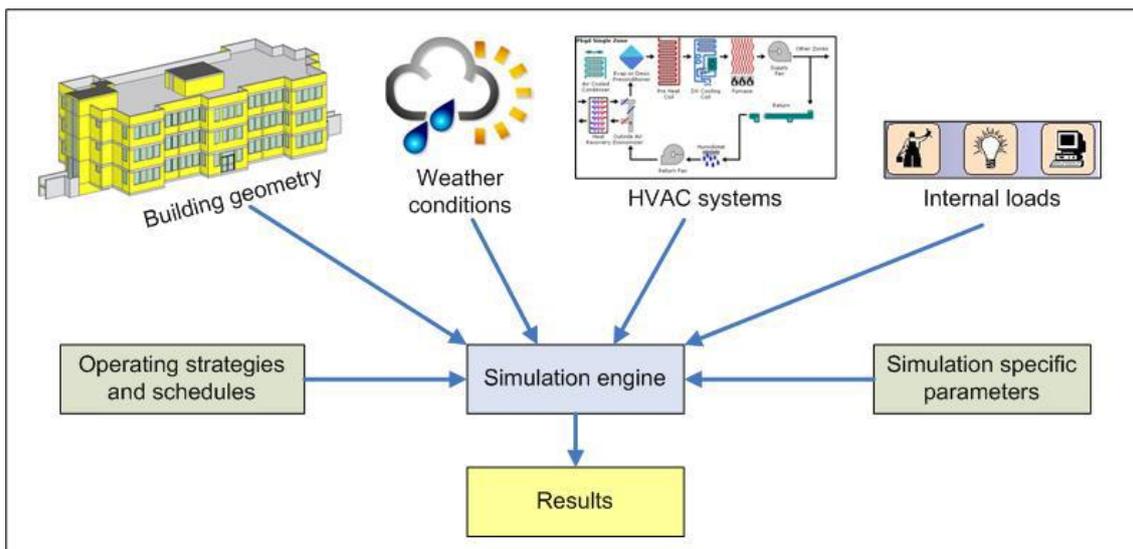


Figura 4 Flujo de datos general de motores de simulación. Fuente: Maile, Martin, & Bazjanac, 2007

Hay tres factores principales que afectan a la eficacia en el uso de herramientas de simulación energética: la complejidad, la precisión y validez.

La complejidad

La simulación requiere una gran cantidad de detalles para la entrada de datos y produce una gran cantidad de datos en su salida. A menudo toma mucho tiempo y esfuerzo familiarizarse con estas rutinas. Dada la variedad de software disponible y procedimientos, los nuevos usuarios en simulación se enfrentan a una curva de aprendizaje empinada que puede desalentar el uso de dichos programas. Es fundamental disponer de una visión del conjunto objetiva y de las interrelaciones dentro del procedimiento.

La precisión

Un tema controvertido en la simulación energética de los edificios es la capacidad del programa para obtener resultados precisos. Debido al cálculo complejo y a los largos procedimientos, la verificación paso a paso de los resultados de la simulación es generalmente poco práctico. Por lo tanto, en la mayoría de los casos la exactitud del programa tiene que ser asumida (Wiltshire & Wright, 1988).

Al comparar los diferentes programas de simulación, los resultados pueden variar. El grado de acuerdo depende sobre las interpretaciones realizadas por el usuario y la capacidad de los programas para manejar el edificio en cuestión.

Además, las discrepancias entre el resultado y el consumo de energía predicho, y entre las predicciones de diferentes programas, son a menudo notables en los estudios de validación. Se debería notar que si la precisión de los datos de entrada es inferior a la calidad del modelo de simulación, un buen uso del programa de simulación y de sus cálculos al simular no va a reducir las incertidumbres en el salida respectiva.

La validez

En la simulación energética, la validación del programa y la verificación deben ser consideradas en el contexto. Bloomfield (1989) señaló que no es factible para verificar la exactitud de cada simulación detallada, investigar toda suposición y aproximación. De hecho, todos los edificios modelados son simplificaciones de la realidad y no hay un único programa de simulación de energía (ASHRAE,2001b).

En los últimos años ,han aparecido estándares de validación para el software energético (Ben-Nakhi y Aasemb, 2003).. Los más representativos son:

- la Agencia Internacional de Energía (AIE) ha creado la prueba de simulación energética de los edificios (BESTEST) método de diagnóstico (Judkoff y Neymark, 1995)
- ASHRAE método estándar de prueba para la creación de programas informáticos de análisis de energía (ASHRAE, 2001b)

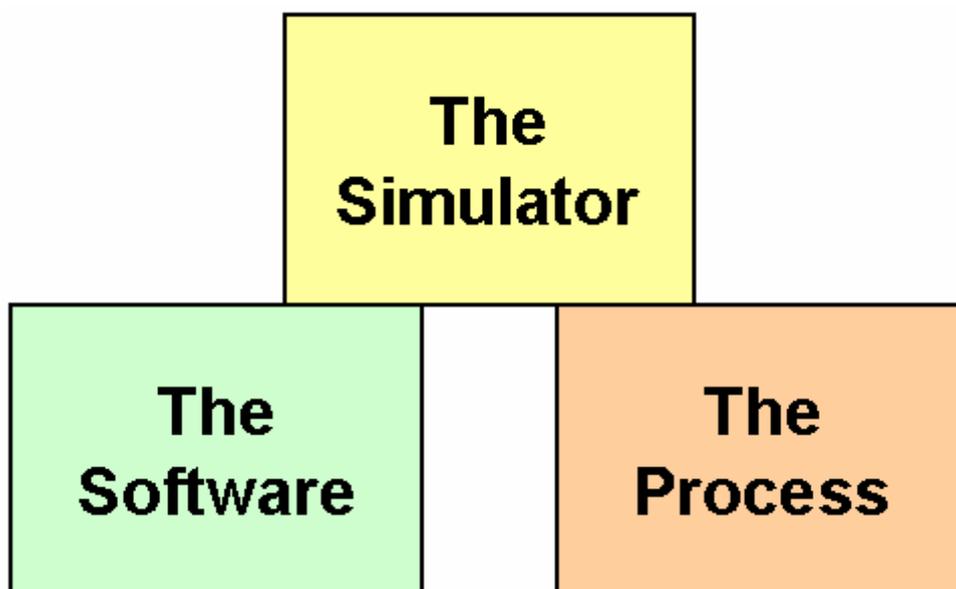


Figura 5 Elementos que intervienen en el proceso de simulación. Fuente: (Hui S. C., 2003)

Ambos se basan en un concepto similar. La filosofía es generar una serie de resultados a partir de varios programas que son generalmente aceptados que representan las bases técnicas consensuadas como válidas para los programas de simulación energética. El proceso de validación puede asegurar la fidelidad de las técnicas de modelado, establecer los datos de entrada y justificar los supuestos que son inherentes a cualquier proceso de modelado. Y lo que es más importante, puede dar a los usuarios la confianza de que el programa puede predecir con exactitud la energía del edificio consumo y el comportamiento térmico. Por supuesto, los respectivos funcionarios encargados de hacer cumplir los códigos (reglamentación) se sienten más cómodos con dichos requisitos reconocidos para la aceptación de un software de energía.

El objetivo de un programa de simulación consiste en que a partir de un modelo matemático se represente cada camino de flujo de energía posible y sus interacciones. En este sentido, la simulación es un intento de emular la realidad.

Ha habido una evolución de las herramientas de diseño, desde métodos manuales tradicionales a simuladores contemporáneos.

1st generation	Handbook orientated Simplified Piecemeal	Feedback loop	Indicative Application limited Difficult to use
2nd generation	Dynamics important Less simplified Still piecemeal		Increasing Integraty Vis a vis The real world
3rd generation	Field problem approach Move to numerical methods Integrated view of energy sub-system Heat & mass transfer considered Better used interface Partial CADB integration		
Next generation	CADB integration Advanced numerical methods Intelligent knowledge based Advanced software engineering		Leading to Predictive Generalized Easy to use

Tabla 2 Evolución de los modelos energéticos de edificios. Elaboración propia. Fuente: Clarke & Maver, 1991.

La eficiencia energética de los edificios es el resultado no sólo de una actitud responsable hacia la energía, sino también del grado de éxito que el profesional ha obtenido en la aplicación de la tecnología por una parte, y las herramientas de análisis de energía durante el proceso de diseño por otra.

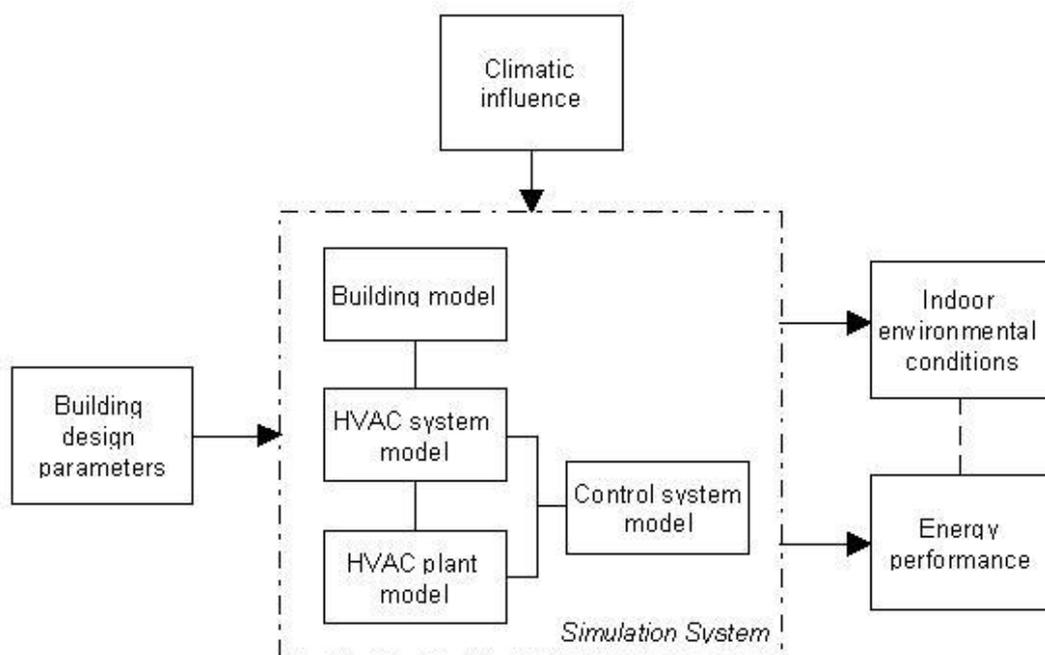


Figura 6 Principales elementos en la simulación energética. Fuente: Hui, 1998

En general, el diseño energético de edificios se basa en los métodos tradicionales de cálculos de carga y de energía en calefacción, ventilación y aire acondicionado

(HVAC) desarrollados por la Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción (ASHRAE) a partir de 1993 .El propósito es el cálculo de cargas térmicas pico para diseñar los sistemas de climatización con el fin de dimensionar el tamaño y el tipo de la maquinaria y equipo. El proceso de simulación energética se realiza para analizar la eficiencia energética de un edificio de forma dinámica y así entender la relación entre los parámetros de diseño y las características de consumo de energía del edificio. Los efectos de todo tipo de cambios pueden ser simulados y observados en una fracción de tiempo y por una fracción del coste que sería necesario para estudiar estas alternativas en la vida real.

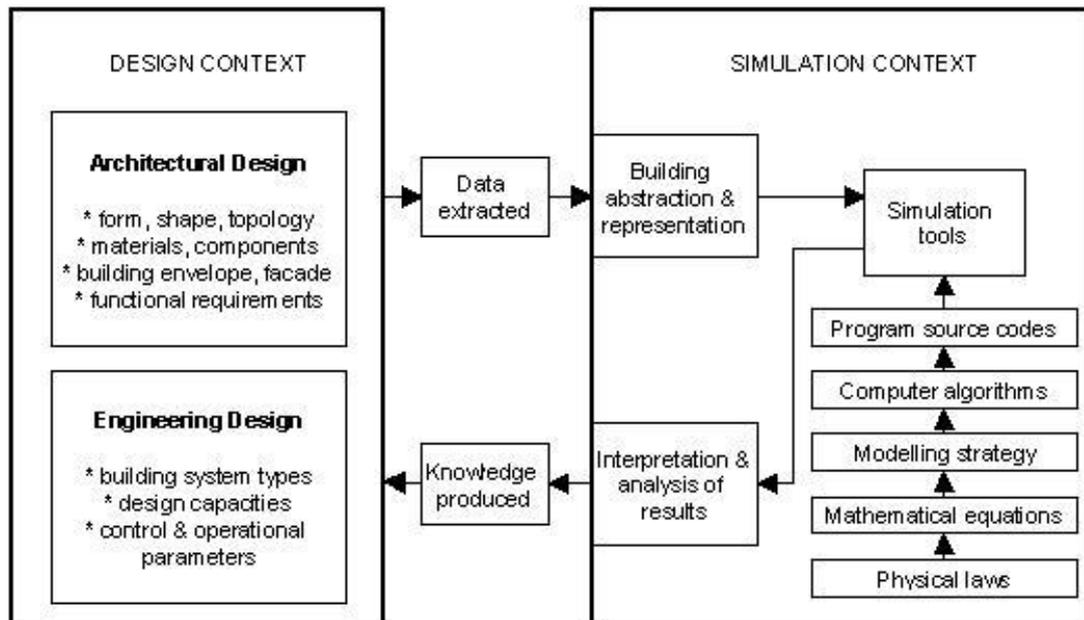


Figura 7 Relación entre partes involucradas en la simulación. Fuente: Hui, 1998

2.3 Herramientas de simulación

La información sobre los programas de simulación energética de edificios en el mercado es diversa y en rápida evolución. Para mantenerse actualizado en la constante evolución de las herramientas de cálculo, es posible consultar la base de datos desarrollada por el Departamento de Energía de Estados Unidos⁴, referencia del sector de la simulación energética de edificios.

Al mismo tiempo, también puede consultarse la base de datos de la Asociación Internacional Building Performance Simulation (IBPSA)⁵, donde además de un recopilatorio de herramientas, pueden consultarse publicaciones y artículos vinculados a la misma temática.

En 1970 aparece el primer software DOE⁶-2. Dicha aplicación se ha constituido como una herramienta de referencia para el análisis de los consumos energéticos en los

⁴Building Energy Software Tools Directory http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/

⁵International Building Performance Simulation Association <http://www.ibpsa.es/Software/tabid/59/Default.aspx>

⁶ Acrónimo inglés United States Department of the Energy.

edificios. Este programa fue desarrollado por el United States Department of Energy y es el motor de cálculo de las dos aplicaciones básicas relacionadas con el CTE: LIDER y CALENER. En 1976, ASHRAE se convierte en el organismo responsable del desarrollo de los algoritmos de cálculo de cargas del mismo.

En el mismo período, aparecen similares aplicaciones, como por ejemplo BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics), software encargado al National Institute of Standards and Technology (NIST) de E.E.U.U.

En 1975 surge TRNSYS (Transient Systems Simulation) desarrollado con soporte público por SEL (Solar Energy Lab, The University of Wisconsin-Madison) y vinculado al mundo universitario (PhD tesis de Sanford Klein de la Universidad de Wisconsin-Madison).

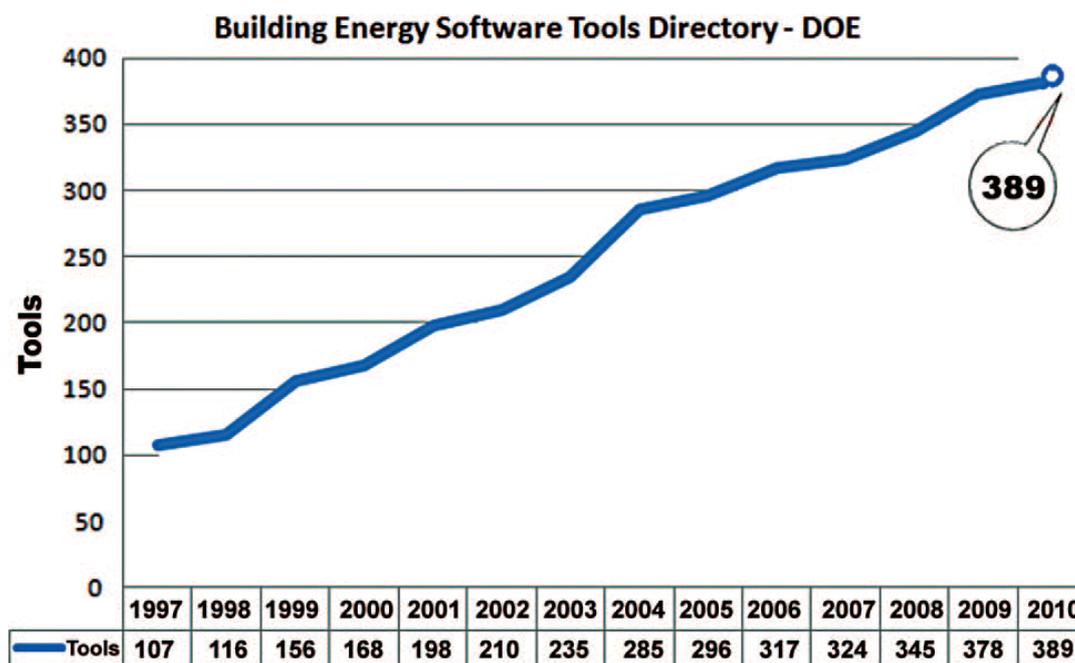


Figura 8 Herramientas desarrolladas entre 1997-2010. Fuente: Attia, Beltrán, De Herde, & Hensen, 2009

Ya en la actualidad existen aplicaciones que han comenzado a estar más orientadas hacia la empresa privada y la industria. Entre estos casos destaca SimCAD que con el objetivo de incrementar su rendimiento ha introducido nuevas funcionalidades que generan los modelos con mayor productividad. Otro caso reciente es el nuevo EnergyPlus, que ha sido generado para aprovechar tanto los mejores aspectos de DOE-2, como de BLAST. La diversidad de software disponible permite abarcar todo el espacio de trabajo en lo que a edificios de distintos usos se refiere. Para Europa, y debido a la falta de una organización que centralice los esfuerzos del desarrollo del software de simulación, no existe un claro modelo de éxito como en el caso americano. Sin embargo, se pueden remarcar algunos ejemplos: el BSIM desarrollado por el Danish Building Research Institute, el programa de código abierto ESP-r (Environmental System Performance) implementado por la University of Strathclyde (Glasgow, Reino Unido) o el ICE-Indoor Climate and Energy desarrollado en Suecia, y que está incluido en el IDA (Indoor Climate And Energy), un paquete comercial con un motor de simulación común y módulos con diversas aplicaciones. Por último, ha proliferado recientemente la creación de paquetes pasarela donde las empresas

producen programas comerciales destinados a la introducción del modelo del edificio en los programas americanos, de forma más cómoda para el usuario final (se debe recordar que generalmente todos ellos son “código abierto”⁷). Son claros ejemplos de ello el IISIBAT del Centre Scientifique et Technique du Bâtiment que utiliza como núcleo de cálculo el TRNSYS, o finalmente, el Design Builder que genera solo el fichero con extensión idf que describe el edificio y posteriormente utiliza el mencionado EnergyPlus (EE.UU.) para realizar las operaciones de cálculo

La evolución reciente de las herramientas de simulación se está centrando en el enriquecimiento de la información y el fomento de su aplicación.

Programa de Simulación	Organismo
BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)	Estadounidense.
BSIM (Building Simulation)	Danés. Instituto Danés de la construcción
DeST	China. Tsinghua University.
DOE2.1 (Department Of Energy)	Estadounidense
ECOTECT	Estadounidense. ECOTECT marca registrada de AutoDesk.
EnerWin	Estadounidense
EnergyExpress	Australiano.(Centro estudios CSIRO).
Energy-10	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories
EnergyPlus	Estadounidense.DOE. Lawrence Berkeley National Laboratory. Sucesor del DOE2 y BLAST.
eQUEST	Estadounidense.
ESP-r	Británico. Universidad Strathclyde Glasgow Escocia.
HAP (Hourly Analysis Program)	Estadounidense. Compañía que produce equipos CARRIER.
HEED (Home Energy Efficient Design)	Estadounidense. Departamento de Arquitectura de la Universidad de California.
IDA- ICE (Indoor Climate Energy)	Sueco. Instituto sueco de matemáticas aplicadas. En 1995 se fundó una empresa EQUA con origen en ese instituto.
IES <VE> Integrated Environment Solutions <Virtual Energy>	Británica. Empresa IES Ltd. Alianza con Google SketchUp.
PowerDomus	Brasileño.
SUNREL	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories
TAS Thermal Analysis of Buildings.	Británico.Compañía EDSL Ltd

⁷ “Open source” software distribuido y desarrollado libremente. Se focaliza más en los beneficios prácticos (acceso al código fuente) que en cuestiones éticas o de libertad que tanto se destacan en el software libre.

TRACE	Estadounidense. Compañía productora de equipos. TRANE
TRNSYS – Transient of Systems	Estadounidense. Universidad Wisconsin. NREL-National Renewable Energy Laboratories

Tabla 3 Relación de programas de simulación más frecuentes. Elaboración propia.

Fuente: Soto Francés, 2008

Antes de iniciar un análisis con un programa de simulación, se debe seleccionar el software apropiado. Esto puede ser una tarea bastante difícil porque hay muchos programas disponibles en el mercado y no es fácil compararlos.

Una tendencia importante para los códigos técnicos (reglamentación) en materia de energía de construcción en la actualidad es avanzar hacia un mayor uso de la construcción de técnicas de simulación y modelado. Esto puede ayudar los profesionales del sector a entender las complejas cuestiones de la construcción de la eficiencia energética y mejorar la flexibilidad, claridad y eficacia de los documentos normativos. Sin embargo, como la simulación energética de un edificio es un proceso complicado que involucra el modelado y la capacidad de análisis, los diseñadores de edificios y los profesionales a menudo tienen dificultades para llevar a cabo el análisis energético y comprender los resultados de la simulación. Incluso profesionales experimentados en este ámbito y funcionarios del gobierno responsables en la reglamentación de este sector a veces presentan cierto “desconcierto” por una amplia gama de software de simulación y sienten cierta incertidumbre acerca de la validez y la exactitud de los cálculos energéticos. Por lo general, los diseñadores seleccionarán un software específico basándose en su propia experiencia y familiaridad con el mismo, el tipo de características que se desean modelizar (datos y resultados), el nivel de detalle requerido, objetivos de la simulación y normativa de aplicación

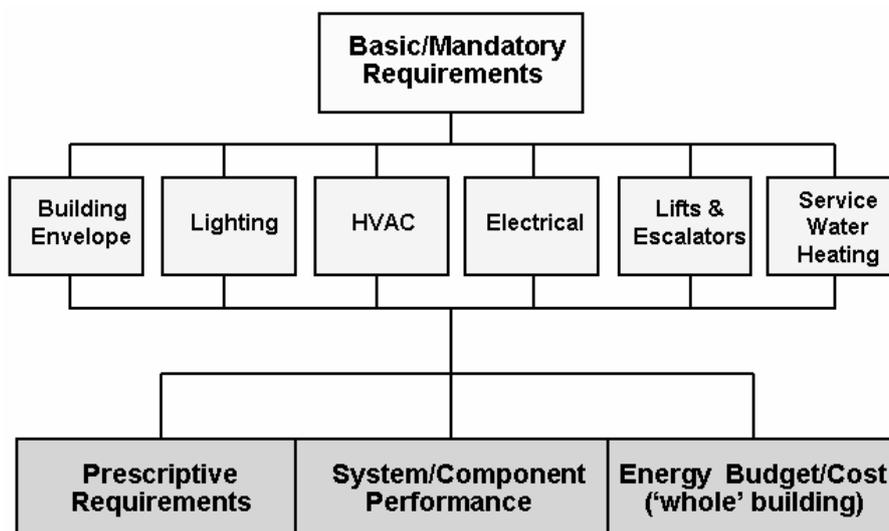


Figura 9 Elementos principales y opciones de cumplimiento en códigos de energía. Fuente: Hui S. C., 2003.

3 Transferencia de calor en cerramientos

3.1 Breve revisión de métodos

Los modelos de simulación para los edificios han sido objeto de estudio a lo largo de muchos años, a partir de modelos muy simples (Bruckmayer, 1940), que tratan de analizar el fenómeno de la conducción a través de un cerramiento. Estos modelos fueron completamente analíticos.

Más tarde, en los años 1970 y 1980, la investigación se centró en cuatro enfoques para la simulación de edificios:

1) Método de factor de respuesta (Mitalas, 1968). Una serie de tiempos de las respuestas se calculan a partir de una serie temporal de pulsos unitarios basados en las propiedades del cerramiento. Este procedimiento es lento y tedioso y está limitado por necesitar una tipificación exacta del cerramiento de referencia, por lo que ha sido desplazado por el *Método de transferencia*, que es un caso particular de éste.

2) Funciones de transferencia de conducción (Stephenson & Mitalas, 1971). Funciones de transferencia de Laplace que relacionan temperatura y flujo de calor. A semejanza del método del factor de respuesta, permite conocer el flujo de calor de una superficie interior de un cerramiento en función de su historia en periodos anteriores, considerando además de las temperaturas los flujos de calor de periodos anteriores, lo que permite reducir el número de coeficientes e intervalos.

3) Métodos de diferencias finitas (Clarke, 1985). Una pared se divide en un número finito de volúmenes de control para el que se resuelven la ecuación de balance de calor.

4) Métodos de resistencia interna despreciable (Clarke, 1985). La analogía eléctrica se utiliza para modelar un elemento del edificio utilizando resistencias y capacitancias. Una capacitancia representa la capacitancia térmica de (una capa de) una pared.

Según Hui & Cheung hay una gran cantidad de métodos para la determinación del comportamiento térmico de un edificio que se clasifican en: el método de respuesta de la habitación, el método de diferencia de temperatura equivalente, el método de descomposición de onda armonizada y el método de diferencias finitas .

Aunque la mayoría de autores coinciden en señalar que hoy en día, el "método de la función de transferencia" desarrollado por ASHRAE y basado en las teorías de Stephenson y Mitalas es el más comúnmente utilizado. Este método introduce el concepto de coeficiente, perturbación, respuesta y función de transferencia en la teoría de control y en el cálculo de la carga térmica de los edificios. Debido a que se emplea un proceso de iteración, el uso de ordenadores es imprescindible en el proceso de cálculo. Por tanto, con el desarrollo de procesadores y software, más y más profesionales han adoptado estos métodos de cálculo más complicados.

Un análisis más detallado (Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2005) nos permite conocer qué métodos se han utilizado en los programas de simulación actuales. Destacando por su frecuencia en uso el "Método de los factores de respuesta". (Nótese Tabla 4 Comparativa de modelos de cálculo programas de simulación. Elaboración propia.)

¿Cómo resuelve la transmisión por conducción?	BLAST	BSim	DeST	DOE-2.1E	ECOTECT ⁸	Ener-Win	Energy Express	Energy-10	EnergyPlus	eQUEST	ESP-r	HAP	HEED	IDA ICE	IES <VE>	PowerDomus	SUNREL	Tas	TRACE	TRANSYS	
Dominio de la frecuencia (método de la admitancia)					X								X	X	X						
Factor de respuesta temporal (funciones y transferencia)	X		X	X		X			X	X		X						X	X	X	
Diferencias finitas/volúmenes finitos								X			X		X	X	X ⁹	X					

Tabla 4 Comparativa de modelos de cálculo programas de simulación. Elaboración propia.

Fuente: Crawley, Hand, Kummert, & Griffith, 2005

⁸ ECOTECT exporta sus modelos a los formatos de archivo nativos de EnergyPlus, ESP-r, HTB-2, y Resplandor, invocando cálculos y luego importar los resultados para la visualización y análisis.

⁹ Como opción para el cálculo de cargas.

3.2 Método de Factores de respuesta

Muchas de las herramientas más frecuentes (EnergyPlus y Trnsys), usadas actualmente para calcular la transferencia de calor unidimensional por conducción a través de un cerramiento multicapa, se basan en el método de Mitalas & Stephenson . A pesar de la publicación de sus trabajos en 1968 y 1971, el método ha mantenido su interés a lo largo de los años (ver los años de las referencias). Ya Kusuda en 1977 explica cómo aplicarlo para calcular la transferencia de calor por conducción en los edificios.

Pero no sólo ha sido empleado para edificios o geometrías planas, Virsedaa & Pinazo en 1998, emplearon el método para refrigerar productos esféricos.

Spitler, Fisher, & Pedersen en 1997 utilizaron la metodología para el cálculo de carga máxima de climatización. Incluso hoy en día, se pueden encontrar nuevas aplicaciones basadas en este método como la de los autores que la utilizan para elaborar un modelo de transmisión de flujo de calor en elementos transparentes (Dai & Fang, 2014).

El método consiste en el muestreo, en un cierto intervalo de tiempo predeterminado, de la temperatura en ambos lados de un cerramiento y luego asumir que su evolución es lineal entre los puntos de muestreo. A fin de lograr tal perfil lineal se utiliza un triángulo como la función de formación básica entre puntos muestreados.

Hay que tener en cuenta que toda sollicitación térmica real, a que se encuentre sometida un cerramiento puede ser descompuesta en un conjunto de sollicitaciones elementales, cuya superposición origine la inicial. De esta manera, conociendo la respuesta global a una sollicitación unitaria puede generarse la excitación global. Este tipo de superposición es válida, en transferencia de calor a través de cerramientos, ya que pueden considerarse inalterables sus propiedades termofísicas en el rango de temperaturas de trabajo.

El impulso unitario tomado como base habitual es el triángulo $2\Delta t$, de esta forma cualquier excitación $E(t)$, función del tiempo, pasa a modelizarse por medio de una serie de excitaciones triangulares unitarias centradas en los instantes múltiplos de Δt .

Desde este modelo lineal, la respuesta a un tren de impulsos de triángulo, formado por retrasar un triángulo entre sí por un paso de tiempo, es simplemente una convolución o suma de las respuestas a cada triángulo. La secuencia de los triángulos compone una señal de temperatura lineal por tramos. La señal de respuesta buscada es el flujo de calor q [W/m^2], debido a las temperaturas cambiantes, a ambos lados del cerramiento estudiado.

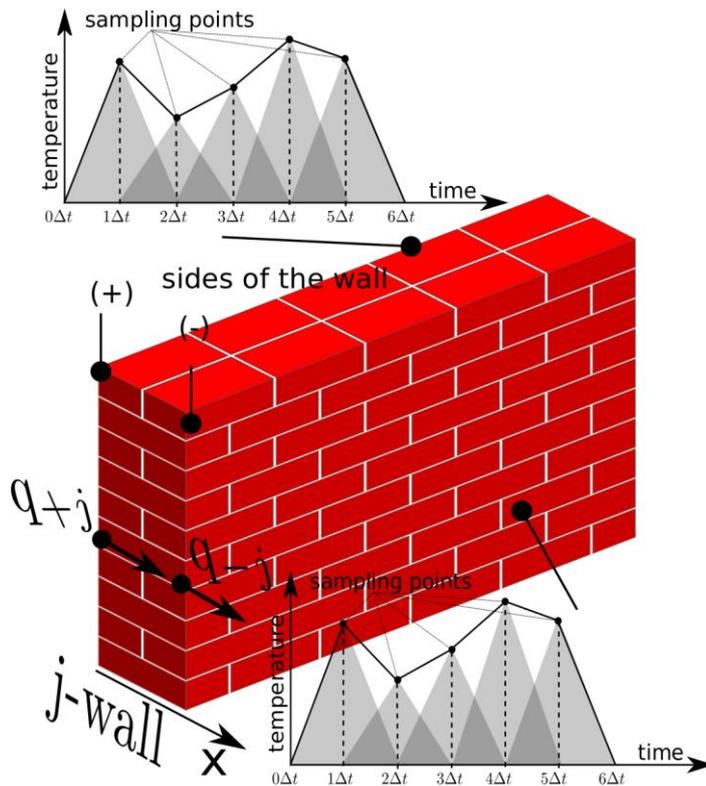


Figura 10 Evolución de la temperatura y la respuesta forzada flujo de calor en ambos lados (+ Y -) de un cerramiento usando la función lineal. Fuente : (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015)

Las funciones forzadas son perfiles lineales a trozos impuestas por el método. Estos perfiles lineales nada tienen que ver con el perfil real de las temperaturas. De alguna manera se puede decir que el método está buscando cuáles son las temperaturas en ambos lados del cerramiento a una cierta velocidad, si bien es “ciego” entre instantes distintos de muestreo. Por lo tanto, el objetivo de la función de convolución es llenar la brecha de la evolución de la temperatura cuando el método no se encuentra en un instante de muestreo.

Por tanto, los valores sólo se conocen en ciertos momentos. Se asemeja a “mirar al edificio” en ciertos momentos (muestreo) en el que del balance de potencias térmicas es impuesto. Esto lleva a que el balance de potencia sea cierto en los instantes de muestreo pero no fuera de ellos y por lo tanto el esquema de cálculo no conserva la energía, como posteriormente se demuestra.

Esta desventaja ha sido señalada muy recientemente por algunos autores (Chen, Athienitis, & Galal, 2013). Desde este punto de vista, a pesar de los años transcurridos desde la aparición del trabajo de Mittal y Stephenson, se ha prestado poca atención a esta hipótesis. Tal vez porque es sencilla, todo el mundo la asume y utiliza y, obviamente, el aumento de la frecuencia de muestreo reduce errores y resuelve el problema en parte. Así pues, una pregunta de interés sería ¿cómo se reduce el error de acuerdo con la frecuencia de muestreo?

En cualquier caso, ante un problema complejo, sería interesante disponer de un método que aumentara o, al menos, mantuviera la exactitud sin la necesidad de aumentar la tasa de muestreo.

En el método de Mittal, las temperaturas en el siguiente punto de muestreo no provienen, en general, de una medición. Para obtener las temperaturas en el siguiente punto de muestreo se establece un equilibrio de potencia térmica en las superficies (+ y -) en el punto de muestreo, como se ha comentado. En la realidad este equilibrio se verifica en cada instante de tiempo. Sin embargo, el método sólo obliga al equilibrio en los puntos de muestreo.

Este método se conoce en la literatura como el método de balance, definido por la ecuación:

$$q_{\text{cond}, \pm j}(t) + q_{\text{rad}, \lambda \uparrow, \pm e^r}(t) + q_{\text{rad}, \text{src } \pm j}(t) + q_{\text{rad}, \text{solar } \pm j}(t) = q_{\text{conv}, \pm j}(t) \quad (1)$$

Nota: j significa pared, y \pm significa cada lado de dicha pared

La ecuación (2) debe cumplirse en cada instante t pero sólo se aplica en puntos discretos en el tiempo ($t_n = n\Delta t$)

$$q_{\text{cond}, \pm j}(t_n) + q_{\text{rad}, \lambda \uparrow, \pm}(t_n) + q_{\text{rad}, \text{src } \pm j}(t_n) + q_{\text{rad}, \text{solar } \pm j}(t_n) = q_{\text{conv}, \pm j}(t_n) \quad (2)$$

El método no 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.

Si se busca una solución más precisa entonces la frecuencia de muestreo debe ser más alta (media hora, diez minutos, etc.), cuando generalmente son intervalos de 1 hora. Esto a su vez hace que el cálculo en el ordenador consuma más tiempo ya que el paso de tiempo no es intrínsecamente adaptativo.

3.3 El caso particular de EnergyPlus

3.3.1 Contexto



La transferencia de calor por conducción a través de la envolvente es uno de los principales componentes en el cálculo de cargas de calefacción y refrigeración y en definitiva de las necesidades energéticas.

Actualmente en programas de simulación tales como DOE-2, TRNSYS y EnergyPlus (Crawley, Lawrie, Winkelmann, & Pedersen, 2001) el comportamiento termodinámico de los datos constructivos del edificio incluyendo los factores de respuesta, los coeficientes de la función de transferencia por conducción (CTF) o los factores de respuesta periódicos son calculados por varios algoritmos, que luego con los datos climáticos sirven para el cálculo del flujo de calor a través de las construcciones.

La precisión de los datos del comportamiento termodinámico afecta directamente a la exactitud de la carga y el comportamiento energético del edificio.

Para más tarde hacer una revisión crítica del método actual así como una propuesta de mejora, se va a exponer a continuación, con algo más de detalle, como el Método de Factores de Respuesta es empleado en EnergyPlus. Se ha tomado EnergyPlus por ser uno de los programas de simulación más empleados por profesionales. EnergyPlus es utilizado para el diseño de edificios energéticamente eficientes, el cumplimiento de normativas y legislaciones, y la evaluación de medidas a adoptar en la mejora de la eficiencia energética.

Además, un estudio hecho a la Comunidad de Arquitectos en 2009 (Attia, Beltrán, De Herde, & Hensen, 2009) acerca de las herramientas de simulación empleadas establece que EnergyPlus junto con DOE2 son las únicas herramientas reconocidas por los encuestados para ser empleadas en una fase de diseño avanzado: desarrollo del diseño y fase de optimización de diseño.

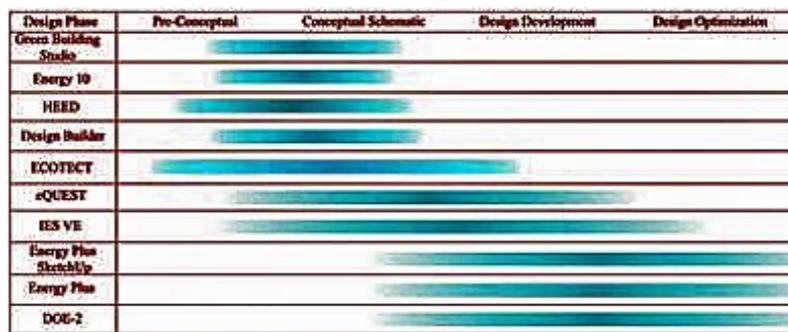


Figura 11 El uso de herramientas en diferentes fases de diseño.
Fuente: Attia, Beltrán, De Herde, & Hensen, 2009

Del mismo estudio realizado a profesionales arquitectos e ingenieros, se desprende que el criterio más relevante para los arquitectos en el uso de este tipo de herramientas es el poder crear escenarios con múltiples alternativas. Si este resultado lo trasladamos al campo de la rehabilitación energética, la relevancia de las estrategias de mejora de la envolvente revela la importancia de crear distintos escenarios donde la simulación produzca resultados razonables en periodos de tiempo prudentes.

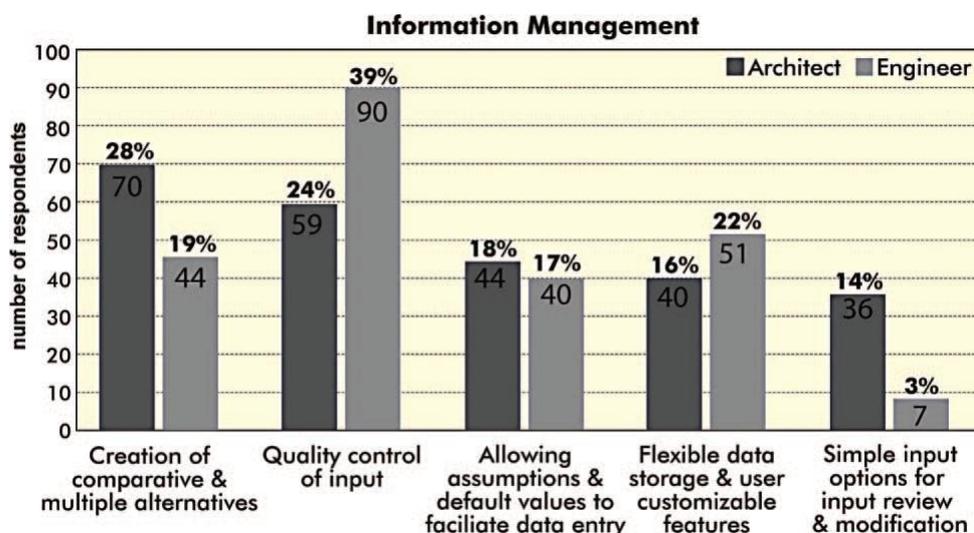


Figura 12 Criterios de relevancia. Fuente: Attia, Beltrán, De Herde, & Hensen, 2009

3.3.2 Fundamentos

EnergyPlus está basado en un enfoque integrado de motores de cálculo anteriores, lo que lleva a predicciones más exactas de las temperaturas de los espacios y por lo tanto una mejor estimación de varios parámetros resultantes, tales como el confort térmico. Los cálculos de carga están basados en los principales enfoques de balance de calor de ASHRAE, basados en DOE-2 y BLAST. También contiene flujos de aire entre zonas, absorción y desorción de humedad, definiciones de sistemas de control de HVAC más realistas y sistemas de calefacción y climatización radiante. Adicionalmente, permite el dimensionado automatizado de varios parámetros específicos de componentes. En resumen, los resultados son más exactos y fiables que con DOE-2 para la mayoría de las simulaciones y sistemas de edificios. EnergyPlus ha sido testado entre otros por:

- HVAC test, basado en ASHRAE –proyecto de investigación 865
- Building fabric tests, based on ASHRAE Research Project 1052 Comparative Tests
- ANSI/ASHRAE Standard 140-2004¹⁰.
- Program BESTest (Building Energy Simulation Test) método

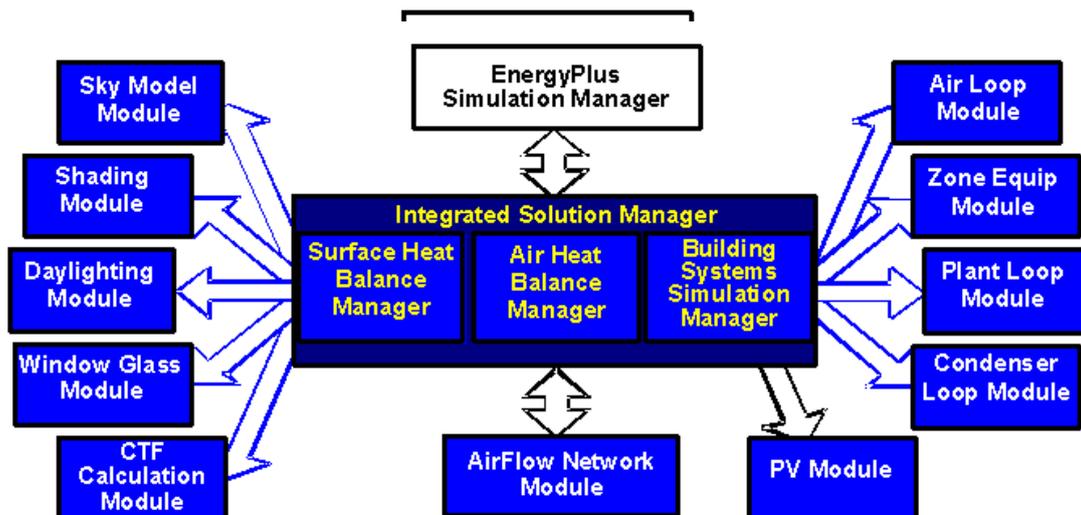


Figura 13 Fundamentos de ENERGYPLUS. Fuente:

¹⁰ ANSI/ASHRAE Standard 140-2001: standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs.

Hoy en día, se trabaja en entradas de datos con interface gráfica, más cómodas y “amigables” para el usuario, tipo DesignBuilder.

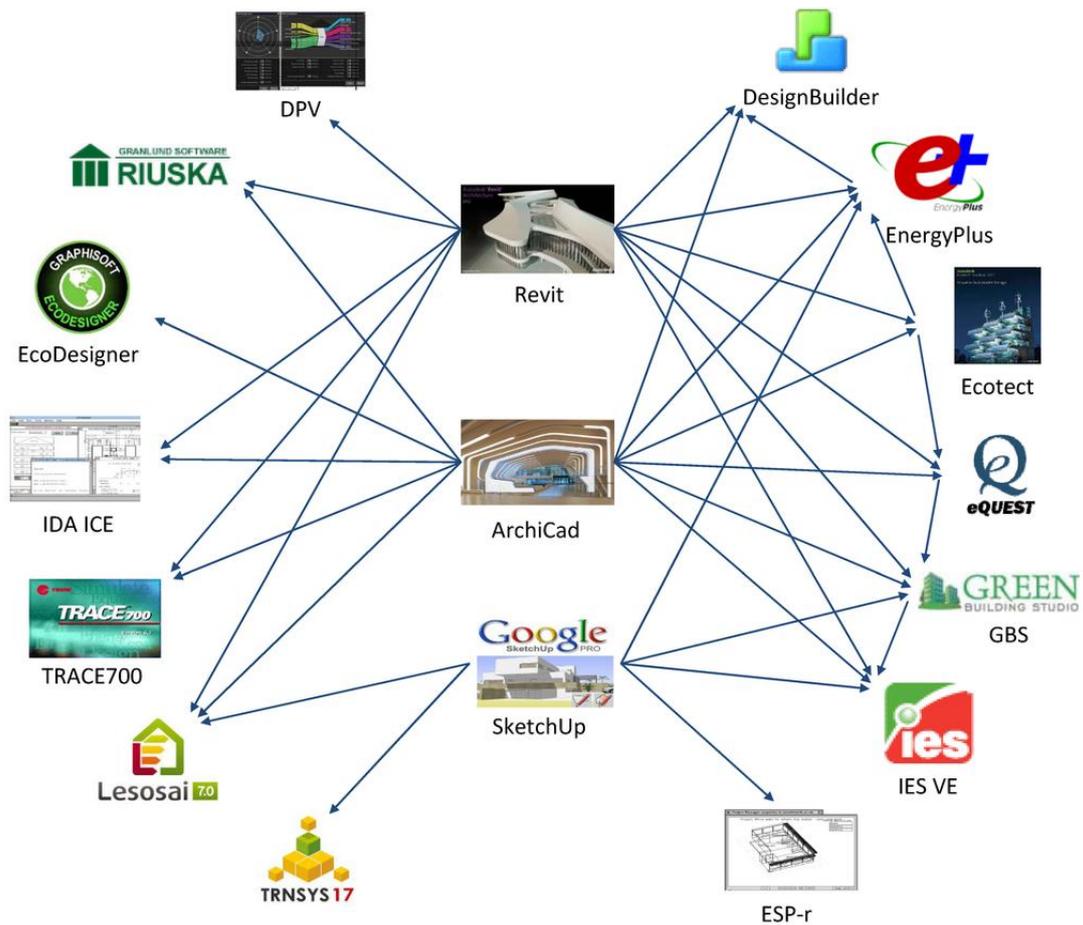


Figura 14 Resumen de intercambio de datos entre las herramientas de modelado y simulación térmica. Los enlaces incluyen aquellos como interfaz, complemento o plug-in. El intercambio de datos es llevado a cabo en varios formatos, principalmente por la IFC y gbXML. Fuente Nugraha Bahar, Pere, Landrieu, & Nicolle, 2013

3.3.3 Función de transferencia

Para calcular los flujos de calor a través de los cerramientos constructivos EnergyPlus emplea un sistema de Funciones de Transferencia de calor basado en un método conocido como *state space* el cual permite considerar los procesos dinámicos involucrados.

Las funciones de transferencia de calor por conducción son un método eficiente para calcular los flujos de calor de la superficie porque eliminan la necesidad de conocer las temperaturas y los flujos dentro del cerramiento. Sin embargo, la serie de la función de transferencia por conducción se vuelve cada vez más inestable cuando el paso de tiempo se reduce como ya se ha anticipado en capítulos anteriores. Este es un problema para los métodos de cálculo en pasos de tiempo cortos, ya que la inestabilidad en el cálculo produce que la simulación presente divergencias. Este fenómeno es más evidente para las construcciones térmicamente masivas con tiempos característicos largos y por tanto, requiriendo un gran número de términos de serie CTF. El método a adoptar ha sido dar una mayor precisión y estabilidad en intervalos de tiempo cortos que la actual técnica BLAST, ya que este método presenta todavía dificultades de estabilidad de las CTF series para intervalos de tiempo menores de $\frac{1}{4}$ de hora para las construcciones más masivas de la librería BLAST.

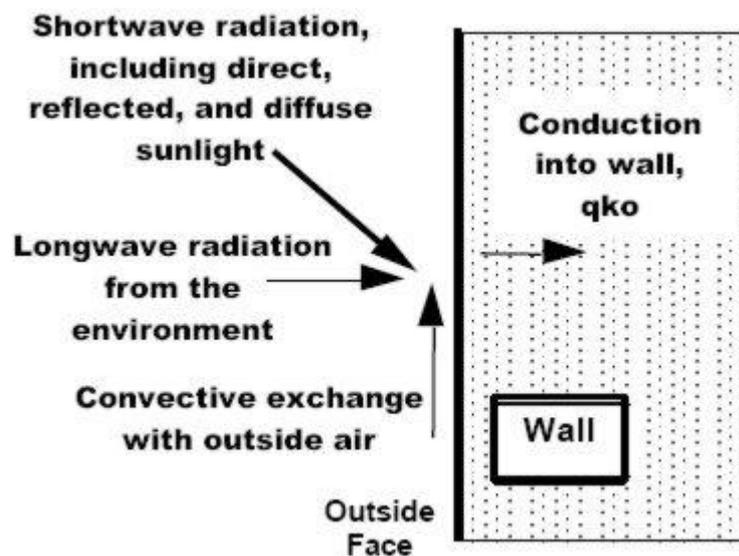


Figura 15 Esquema del balance en la cara exterior del muro. Fuente: University of Illinois , University of California & the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2014

Para el cálculo de las ganancias de calor de una zona se tiene en cuenta las cargas internas, el intercambio de calor por el aire entre zonas, y el calor transmitido por convección a través de las superficies de las zonas. De todos estos fenómenos, el intercambio por convección superficial requiere los cálculos más complejos porque se necesita un balance de energía detallado en la superficie interior y exterior de cada

cerramiento vertical, suelo y techo. Además, la conducción de calor en régimen transitorio entre las superficies también debe ser resuelta. Para este cálculo, las temperaturas interiores y exteriores y los flujos de calor deben ser conocidos para calcular la componente de convección para cada una de las superficies de la zona.

BLAST utiliza un método de función de transferencia por conducción (CTF¹¹) atribuido a Hittle (1980) para solucionar el problema de conducción transitoria para cada superficie.

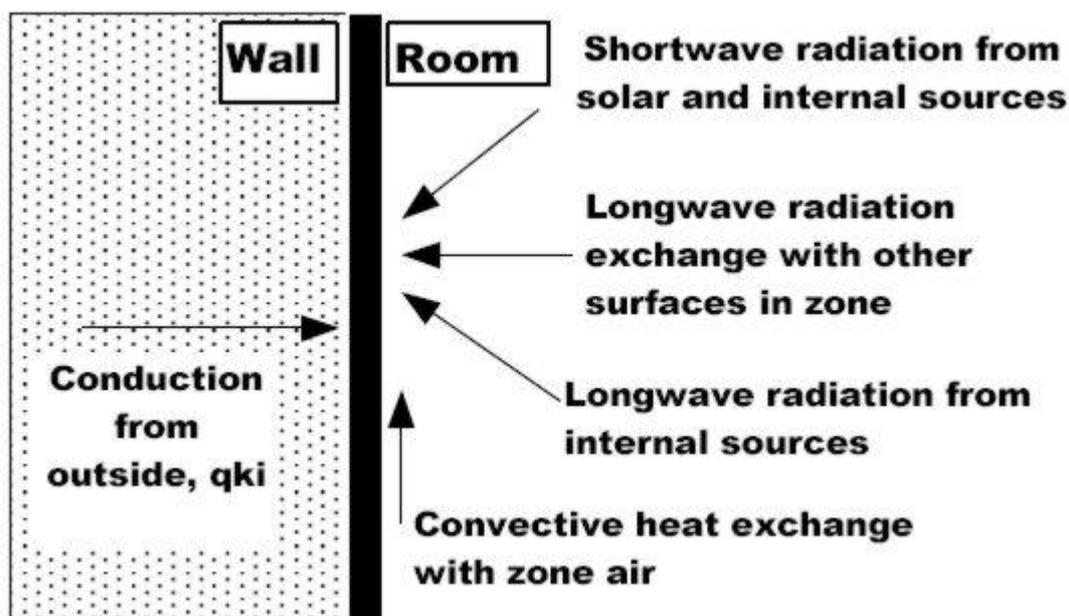


Figura 16 Esquema del balance en la cara interna del muro. Fuente: University of Illinois , University of California & the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory., 2014

Un problema de los métodos de cálculo de la CTF es que el paso de tiempo es fijo; es decir, una serie CTF calculada para un paso de tiempo de una hora toma la información en t-1 hora, t-2 horas, etc. y calcula condiciones en el momento actual t. A medida que avanza el tiempo, el término más antiguo de la serie de entrada se deja “caer” y así el historial de datos permite añadir el valor más reciente a la serie. Por coherencia, el paso de tiempo utilizado para determinar la serie CTF debe ser el mismo que el paso de tiempo utilizado para actualizar la zona de temperatura de aire en el balance energético. Pero, como el paso de tiempo utilizado para calcular la serie CTF se acorta, el número de términos en la serie crece. Finalmente, con suficientes términos, la serie se vuelve inestable debido al truncamiento y error de redondeo. Construcciones pesadas, tienen problemas de precisión y estabilidad en pasos de tiempo tan grandes como 0,5 horas calculados por el método de CTF de Hittle.

En un intento de superar este problema, el método de Hittle fue reemplazado por el método de Seem en 1987, en una nueva versión denominada iBlast. Esto dio lugar a alguna mejora en la estabilidad en las etapas de tiempo más cortas, pero no lo suficiente para permitir que iBlast funcione a un paso de tiempo 0,1 horas sin restringir los tipos de superficies que pueden ser utilizados.

¹¹Siglas en inglés de “Conduction Transfer Function”, cuya abreviatura de utilizará a partir de este momento.

A pesar de que los métodos del CTF requieren valores de las temperaturas de la superficie y los flujos sólo en los momentos de muestreo, la temperatura y las historias de flujo son, en realidad, las funciones continuas entre esos puntos discretos. Sin embargo, no hay manera de calcular la información en estos tiempos intermedios una vez una serie ha sido iniciada. Los términos en las historias de temperatura y de flujo están fuera de fase con estos puntos. Sin embargo, pueden ser calculados desplazando la fase de la temperatura y las historias de flujo una fracción de paso de tiempo. Este procedimiento permitiría que una serie CTF calculada para un paso de tiempo t , se utilizara para calcular información en momentos $t + t / 2$, $t + t / 3$, $t + t / 4$, o cualquier otra fracción arbitraria del paso de tiempo, siempre y cuando las temperaturas de la superficie y valores de flujo sean todavía una parte de t . A continuación se describen varias formas de hacer esto:

Método A : Historias fuera de fase unas respecto a otras

El método mostrado en la Figura 17 mantiene dos conjuntos de historias fuera de fase una respecto a otra. La figura muestra cómo funcionaría para dos conjuntos de historias fuera de fase, el desfase es la mitad del paso de tiempo. Más conjuntos de historias de temperatura y de flujo podrían ser utilizadas, lo que permite que el paso de tiempo de simulación pueda tomar valores: $1/3$, $1/4$, $1/5$, etc., del paso de tiempo mínimo permitido para los cálculos del CTF. El paso de tiempo más pequeño es aquel para el que las series de CTF son estables.

Este escenario se ilustra en esta figura por dos conjuntos separados de temperatura y flujo. Ir cíclicamente a través de cada historia, permite cálculos del balance energético que son simulados con la información actualizada de superficie en un intervalo de tiempo más corto que lo que permite la CTF. Este método no requiere la interpolación entre las series una vez que se ha iniciado cada conjunto de historias. Sin embargo, una gran cantidad de memoria es requerida para almacenar todos los conjuntos de historias.

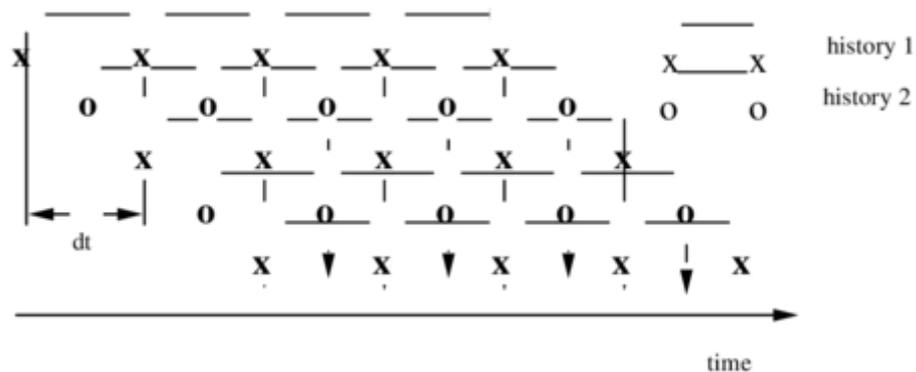


Figura 17 Esquema de 2 historias fuera de fase una respecto a otra. Fuente: The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through, 2011

Método B: Interpolación secuencial

Otro método se muestra en la Figura 18 mediante la interpolación secuencial de nuevas historias que a su vez utiliza interpolaciones sucesivas para determinar el siguiente conjunto de temperaturas y de historias de flujo. La historia actual se interpola directamente desde el anterior conjunto de historia usando el desplazamiento de fase de tiempo requerido entre los dos. Este método requiere almacenamiento

permanente para un único conjunto de temperatura y de historias de flujo a la vez, pero afina los valores de temperatura y de flujo cuanto más interpolaciones se realizan. Este método presentaba graves problemas de inestabilidad con las sucesivas interpolaciones.

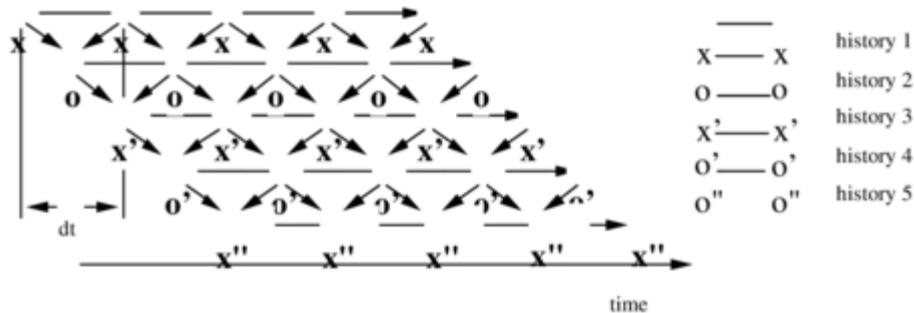


Figura 18 Interpolación secuencial de nuevas historias. Fuente: The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through, 2011

Método C: Híbrido - historia principal con ciertas interpolaciones

Un último método, que se muestra en la Figura 19 es utilizar la historia principal con interpolación, es decir, un híbrido de los dos métodos anteriores. Un conjunto principal es la “guía” de la historia que se mantiene y actualiza en todos los tiempos; esto resuelve el problema de que los acontecimientos actuales propaguen información hacia atrás en el tiempo. Cuando es necesario, los flujos de superficie se calculan fuera de fase respecto de la historia “guía”, se interpola a partir de los valores principales. Obtenido el valor buscado, éste se une a la historia principal y se desprecia la información anterior de esta interpolación.

Este método ha demostrado ser la mejor de las tres opciones descritas, ya que elimina la propagación de la información hacia atrás en el tiempo y sólo requiere el almacenamiento simultáneo de dos conjuntos de valores: temperatura y las historias de flujo.

Este método fue incorporado posteriormente en el programa iBlast .

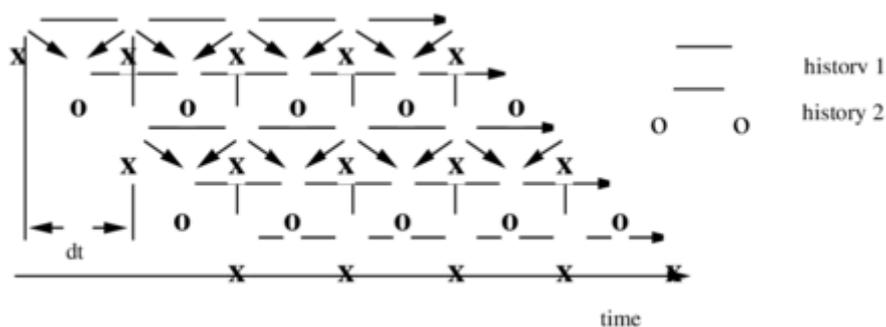


Figura 19 Historia principal con interpolación. Fuente:

Como se demuestra a través de EnergyPlus, se ha sido consciente del problema que presenta el método y las estrategias para resolver el problema no han obtenido el nivel de ajuste necesario para situaciones donde el paso de tiempo más corto es requerido porque el sistema presenta evoluciones más rápidas que deben ser “seguidas” con más precisión para que el modelo no pierda validez.

4 Revisión crítica y propuesta de modelo

Algunas herramientas de software implementan diferentes soluciones para conseguir un tiempo de adaptación al paso, para acortar el paso de tiempo (muestreo) en ciertos momentos en que se detecta que suceden en el sistema acciones que deben ser estudiadas con más detalle, como se ha expuesto en el caso de EnergyPlus. Ejemplo de ello es cuando el sistema de climatización se inicia y se detiene o la tasa del cambio de la temperatura del aire de una zona es demasiado alta dentro del paso de tiempo seleccionado por el usuario.

Desde el punto de vista del análisis y el estudio realizado, el aumento de la frecuencia de muestreo no tiene sentido, en general, ya que la mayoría de los modelos de sistemas de HVAC son ecuaciones algebraicas, y no incluyen su dinámica.

La motivación por tanto ha sido, como se ha mencionado anteriormente, obtener una herramienta lo suficientemente rápida permitiendo un método más exacto en el que se tenga en cuenta la conservación de la energía.

Para lograrlo, se propone cambiar la función de convolución para la evolución de temperaturas entre puntos de muestreo. Para ello se emplea una función de segundo orden, en concreto un polinomio de segundo orden. En este caso cuatro parámetros son necesarios:

- las temperaturas en ambos lados T_{-n} , T_{+n}
- y la semiaceleración de las temperaturas p_{-n} , p_{+n} en ambos lados. Ya que si éstas son cero, volvemos al método Mittal original.

Las cuatro ecuaciones planteadas para resolver esto son:

- las mismas ecuaciones de balance de potencia de energía (en los intervalos muestreados)

$$Q_{cond, \pm j}(t_n) + Q_{rad, \lambda \uparrow, \pm j}(t_n) + Q_{rad, src \pm j}(t_n) + Q_{rad, solar \pm j}(t_n) = Q_{conv, \pm j}(t_n) \quad (2)$$

- y por el otro el balance energético entre los punto de muestreo (n-1) y n en ambas caras del cerramiento.

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

$$Q_{rad, solar \pm j, (n-1) \rightarrow n} = Q_{conv, \pm j, (n-1) \rightarrow n} \quad (3)$$

O la ecuación escrito en forma integral:

$$\int_{t_{n-1}}^{t_n} q'_{cond, \pm j}(t) dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} q'_{rad, \lambda \uparrow, \pm j}(t) dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} q'_{rad, src, \pm j}(t) dt +$$

$$+ \int_{t_{n-1}}^{t_n} q'_{rad, solar, \pm j}(t) dt = \int_{t_{n-1}}^{t_n} q'_{conv, \pm j}(t) dt \quad (4)$$

En general, con el fin de determinar la energía intercambiada dentro de un intervalo de tiempo, es necesario conocer la evolución continua en el tiempo de las temperaturas. Cómo se ha mencionado estos valores sólo se conocen en determinados puntos de muestreo. Sólo se “miran” ciertos instantes de tiempo (muestreo) y en ellos se fuerza el balance de potencias. Por tanto, “entre” puntos de muestreo la temperatura “real” es desconocida.

Si la evolución lineal de las temperaturas superficiales se asume, entonces la transferencia de calor por conducción en el interior el intervalo se determina.

La intención de la metodología propuesta es dar un mayor grado de libertad a la hipótesis acerca de la evolución temporal de las temperaturas superficiales respecto al paso de tiempo. Esto es, un nuevo grado de libertad para la función de transferencia. Así pues, la nueva ecuación necesaria para determinar el nuevo grado de libertad, será el balance de energía en el paso de tiempo.

Varios autores (Maestre, Cubillas, & Pérez-Lombard, 2010) demostraron que el método de Laplace da muy buena precisión, y es el método que se utiliza en el modelo propuesto.

4.1 Ecuación de segundo grado

La evolución de las temperaturas superficiales se supone que sigue un polinomio de segundo grado dentro del intervalo de tiempo $t \in [0, t_e]$, donde t_e es el tiempo transcurrido desde el último punto de muestreo: Véase Ecuación (2)

$$T(t) = T_o + m_o t + p t^2 \quad (5)$$

Donde

- T_o temperatura previamente muestreada.
- m_o pendiente del cambio de temperatura al comienzo de la etapa de tiempo.
- p semiaceleración del cambio de temperatura dentro de 0 y T_e .

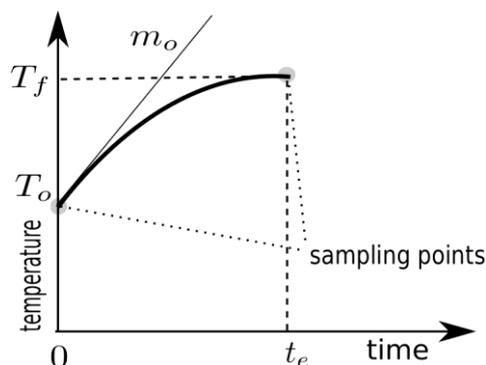


Figura 20 Nueva evolución de la temperatura impuesta por una ecuación de 2 grado. Fuente :Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015

Se observa que la forma de la función es muy versátil y simple. Si $p = 0$ se obtiene una forma trapezoidal. El trapecio es función de conformación diferente.

Varios autores (Hayashi, Urano, Watanabe, & Ryu, 1985 ;Yoshimi & Toshiyuki, 1981; Yoshimi & Toshiyuki, 1982) presentan ejemplos de aplicación a la transferencia de

calor en los edificios. Además de establecer $p = 0$, si se supone continuidad en el perfil de temperaturas superficiales, entonces recuperamos la solución de Mittal.

En los siguientes apartados de este capítulo se muestra cómo obtener las expresiones de la potencia de flujo térmico en conducción y la energía intercambiada por conducción a través de ambos lados de una pared de múltiples capas en las que las temperaturas en ambos lados siguen el perfil como Figura 20

4.2 Transformada de Laplace de 2º Orden

El perfil de la Figura 20 se puede descomponer como sigue:

Nota: El objetivo es dejar $\{T_f, T_o, p\}$ como parámetros.

Las excitaciones de la capa son debidas a cambios de temperatura (estrictamente de la superficie). Excitaciones fundamentales son:

- A. Un escalón (función de Heaviside) (Schwartz, 1966) unitario de temperatura.
- B. Una función escalón unitaria de temperatura negativa decalada .
- C. Una subida parabólica (semiaceleración) de temperatura con pendiente positiva y con inicio en el origen.
- D. Una función decalada en el tiempo parabólica con pendiente negativa

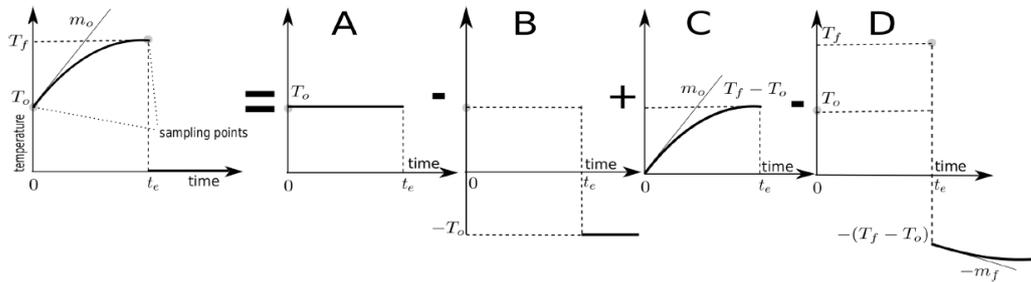


Figura 21 Descomposición de función de conformación de segundo grado o Holder2(t) en funciones simples $\{ f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t)\}$ Fuente : Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015

Parte A:

$$\mathcal{L}[f_1(t)] = \int_0^{\infty} f_1(t)e^{-st} dt = \int_0^{\infty} T_o e^{-st} dt = \frac{T_o}{s} \quad (6)$$

Parte B:

$$\mathcal{L}[f_2(t)] = \int_0^{\infty} f_2(t)e^{-st} dt = \int_0^{t_e} 0e^{-st} dt + \int_{t_e}^{\infty} T_o e^{-st} dt = \frac{T_o e^{-st_e}}{s} \quad (7)$$

Parte C

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f_3(t)] &= \int_0^{\infty} f_3(t)e^{-st} dt = \int_0^{\infty} (m_0 t + pt^2)e^{-st} dt = \\ &= \frac{m_0}{s^2} + \frac{2p}{s^3}\end{aligned}\quad (8)$$

Despejando de la ecuación (5) con $t=t_e$:

$$m_0 = \frac{T_f - T_o}{t_e} - p \cdot t_e \quad (9)$$

Y sustituyendo m_0 en la ecuación (8):

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f_3(t)] &= \frac{\left(\frac{T_f - T_o}{t_e} - pt_e\right)}{s^2} + \frac{2p}{s^3} = \\ &= p\left(-t_e \frac{1}{s^2} + 2 \frac{1}{s^3}\right) + T_f \left(\frac{1}{t_e s^2}\right) - T_o \left(\frac{1}{t_e s^2}\right)\end{aligned}\quad (10)$$

Parte (D):

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f_4(t)] &= \int_0^{\infty} f_4(t)e^{-st} dt = \int_0^{t_e} 0e^{-st} dt + \int_{t_e}^{\infty} (T_f - T_o + m_f(t - t_e) + \\ &+ p(t - t_e)^2)e^{-st} dt = (T_f - T_o) \frac{e^{-st_e}}{s} + m_f \frac{e^{-st_e}}{s^2} + 2p \frac{e^{-st_e}}{s^3}\end{aligned}\quad (11)$$

sustituyendo m_f (usando la ecuación (5) y sustituyendo en la ecuación (8)) se tiene:

$$m_f = \left. \frac{dT(t)}{dt} \right|_{t_e} = m_0 + 2p \cdot t_e = \frac{T_f - T_o}{t_e} + p \cdot t_e \quad (12)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L}[f_4(t)] &= (T_f - T_o) \frac{e^{-st_e}}{s} + \left(\frac{T_f - T_o}{t_e} + pt_e\right) \frac{e^{-st_e}}{s^2} + 2p \frac{e^{-st_e}}{s^3} = \\ &= p \left[t_e \frac{e^{-st_e}}{s^2} + 2 \frac{e^{-st_e}}{s^3} \right] + T_f \left[\frac{e^{-st_e}}{s} + \frac{e^{-st_e}}{t_e s^2} \right] - T_o \left[\frac{e^{-st_e}}{s} + t_e \frac{e^{-st_e}}{s^2} \right]\end{aligned}\quad (13)$$

Finalmente añadiendo todas las transformadas $\{ f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t) \}$ tenemos la Holder2(t) de la Figura 21 cuya transformada de Laplace es:

$$\mathcal{L}[\text{Holder2}] = \mathcal{L}[f_1(t)] - \mathcal{L}[f_2(t)] + \mathcal{L}[f_3(t)] - \mathcal{L}[f_4(t)] \quad (14)$$

que con algunas modificaciones algebraicas da:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}[\text{Holder2}] = & T_o \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{t_e s^2} + \frac{1}{t_e s^2} e^{-st_e} \right] + \\ & + T_f \left[\frac{1}{t_e s^2} - \frac{1}{s} e^{-st_e} - \frac{1}{t_e s^2} e^{-st_e} \right] + \\ & + p \left[-t_e \frac{1}{s^2} + 2 \frac{1}{s^3} - t_e \frac{1}{s^2} e^{-st_e} - 2 \frac{1}{s^3} e^{-st_e} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Esta es la nueva función de conformación que " tiene " la temperatura de señal entre puntos de muestreo.

La ecuación (15) se escribe simplemente como:

$$\mathcal{L}[\text{Holder2}] = \mathcal{L}[f_1(t)] + \mathcal{L}[f_3(t)] \quad (16)$$

Ó

$$\mathcal{L}[\text{Holder2}] = T_o \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{t_e s^2} \right] + T_f \left[\frac{1}{t_e s^2} \right] + p \left[-t_e \frac{1}{s^2} + 2 \frac{1}{s^3} \right] \quad (17)$$

4.3 Transformada de Laplace de flujo de calor por conducción

La siguiente figura muestra la respuesta de densidad de flujo de calor entre la excitación de la temperatura y el pulso de respuesta:

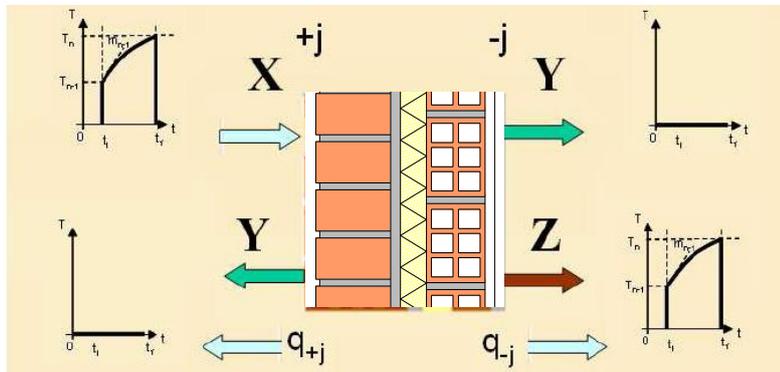


Figura 22 Funciones de transferencia de calor por conducción. Fuente: Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015. Elaboración propia

Si se tiene una pared de N-capas y se quiere calcular la transferencia de calor por conducción a ambos lados q_{+j} y q_{-j} cuando la temperatura superficial T_{+j} y T_{-j} evolucionar en función de algunos perfiles predefinidos debemos operar como sigue. La ecuación de conducción de calor para una capa es la ecuación ya conocida:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (18)$$

Si la coordenada temporal se utiliza como la variable de Laplace s y la resultante ecuación ordinaria en la coordenada espacial x se resuelve, la transformada de la respuesta de flujo de calor a ambos lados es la transformada de una función de temperaturas forzadas, y puede ser escrita en forma de matriz como sigue:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{L}[q_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[q_{-j}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{DD(s)}{BB(s)} & -\frac{1}{BB(s)} \\ \frac{1(s)}{BB(s)} & -\frac{AA(s)}{BB(s)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & Z(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \end{bmatrix} \quad (19)$$

Para cada i-capa es posible relacionar las condiciones en un lado a otro como:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{+i}(t)] \\ \mathcal{L}[q_{+i}(t)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i(s) & B_i(s) \\ C_i(s) & D_i(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{-i}(t)] \\ \mathcal{L}[q_{-i}(t)] \end{bmatrix} \quad (20)$$

Entonces la pared de múltiples capas está representada por la multiplicación de la matriz :

$$\begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0(s) & B_0(s) \\ C_0(s) & D_0(s) \end{bmatrix} \cdot \dots \cdot \begin{bmatrix} A_N(s) & B_N(s) \\ C_N(s) & D_N(s) \end{bmatrix} \quad (21)$$

donde los elementos de entrada para la matriz i-capa son:

$$\begin{aligned}
 A_i(s) &= Ch \left(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}} \right) \\
 B_i(s) &= - \frac{Sh \left(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}} \right)}{k \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}}} \\
 C_i(s) &= -k \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}} Sh \left(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}} \right) \\
 D_i(s) &= Ch \left(L_i \sqrt{\frac{s}{\alpha_i}} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Una vez que el producto de matrices se completa para conformar la pared multicapa, se obtiene la Ec. (14)

Si se multiplica la función de conformación por una función de transferencia $F(s) \in \{X(s), Y(s), Z(s)\}$ se obtiene la respuesta en una forma general que debe ser antitransformada para obtener la respuesta temporal. El resultado de este producto puede ser expresado de forma general por la Ec (23) cuya anti transformada de Laplace conduce a la respuesta en el tiempo:

$$q(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^m} \right] (t) \tag{23}$$

Si en la ecuación anterior aparece un factor e^{-st} , significa que la anti-transformación se retarda en el tiempo t_e .

El método directo ha sido empleado en la ecuaciones (13) (14) (15). Por tanto, los residuos en los polos se definen como

$$\begin{aligned}
 E_0(x_r) &= \frac{H(x_r)}{\left. \frac{dG(s)}{ds} \right|_{s=x_r}} \\
 E_1 &= \frac{H(0)}{G(0)} \\
 \forall n > 1 \Rightarrow E_n &= \frac{1}{n-1!} \left. \frac{d^{n-1}}{ds^{n-1}} \frac{H(s)}{G(s)} \right|_{s \rightarrow 0}
 \end{aligned} \tag{24}$$

donde x_r son las raíces de $G(s)$, es decir, $G(x_r) = 0$, también conocido como polos. Nótese que el cero es también un polo de la ecuación (23). Los anti-transformadas se calculan como:

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s} \right] (t) = E_1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r} e^{x_r t} = F_1(t) \quad (25a)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^2} \right] (t) = E_1 t + E_2 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^2} e^{x_r t} = F_2(t) \quad (25b)$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^3} \right] (t) = \frac{E_1}{2} t^2 + E_2 t + E_3 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^3} e^{x_r t} = F_3(t) \quad (25c)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^4} \right] (t) &= \frac{E_1}{6} t^3 + \frac{E_2}{2} t^2 + E_3 t + E_4 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^4} e^{x_r t} \\ &= F_4(t) \end{aligned} \quad (25d)$$

donde $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$, $F_4(t)$ son 0 para $t < 0$.

4.4 Flujo de transferencia de calor por conducción

La respuesta de flujo de transferencia de calor por conducción de segundo orden es:

$$\begin{aligned}
 q(t) = & T_o[F_1(t) - \frac{1}{t_e}F_2(t) + \frac{1}{t_e}F_2(t - t_e)] + \\
 & + T_f[\frac{1}{t_e}F_2(t) - F_1(t - t_e) - \frac{1}{t_e}F_2(t - t_e)] + \\
 & + p[-t_eF_2(t) + 2F_3(t) - t_eF_2(t - t_e) - 2F_3(t - t_e)]
 \end{aligned} \tag{26}$$

donde t es el tiempo transcurrido desde el último punto de muestreo o la hora local de paso.

En caso de un tren de pulsos de segundo orden (véase Figura 23), retrasado t_e entre sí, la respuesta $t \in [0, t_e]$ estaría dada por la ecuación (28).

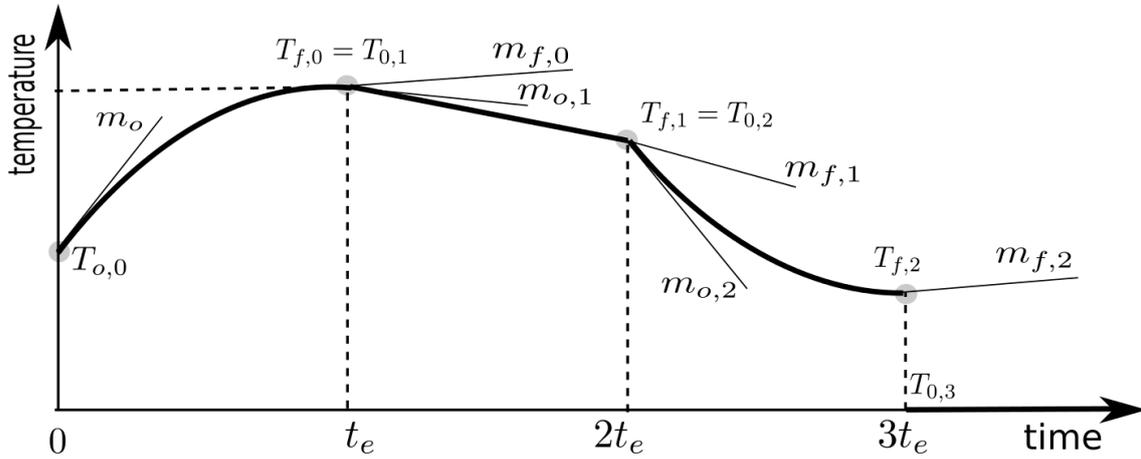


Figura 23. Tren o secuencia parabólica de pulsos. Fuente: Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015. Elaboración propia

Si definimos los coeficientes R como se muestra en la Ec (27)

$$R_{0,k} = \frac{1}{t_e} [F_2((k-1)t_e) - 2F_2(kt_e) + F_2((k+1)t_e)] \tag{27a}$$

$$R_{1,k} = [-t_eF_2((k+1)t_e) + 2F_3((k+1)t_e) - t_eF_2(kt_e) - 2F_3(kt_e)] \tag{27b}$$

Entonces la Ec.(26) puede ser escrita de manera más sencilla

$$q(t_n) = \sum_{k=0}^{\infty} T_{n-k} R_{0,k} + \sum_{k=0}^{\infty} p_{n-k} R_{1,k} \tag{28}$$

Los coeficientes R serán función de dónde excitamos la pared (lado + j o -j) y donde se busca la respuesta de flujo de calor (lado + j o -j). Esta dependencia está reflejada en la evaluación de los valores de funciones F que a su vez dependen de los residuos E, es decir, las funciones de H (s) y G (s), véase en las ecuaciones siguientes:

$$q_{+j}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{DD(s)}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \right) + \mathcal{L}^{-1} \left(-\frac{1}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \right) \quad (29a)$$

$$q_{-j}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \right) + \mathcal{L}^{-1} \left(-\frac{AA(s)}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \right) \quad (29b)$$

Por lo tanto, de acuerdo con el tipo de función de transferencia tenemos:

1. H (s) = -DD (s), G (s) = BB (s) y los coeficientes se denominan:

$$\begin{aligned} X_{T,j,k} &= R_{0,k} \\ X_{p,j,k} &= R_{1,k} \end{aligned} \quad (30)$$

2. H (s) = ± 1, G (s) = BB (s) y los coeficientes se denominan:

$$\begin{aligned} \pm Y_{T,j,k} &= R_{0,k} \\ \pm Y_{p,j,k} &= R_{1,k} \end{aligned} \quad (31)$$

3. H (s) = -AA (s), G (s) = BB (s) y los coeficientes se denominan:

$$\begin{aligned} Z_{T,j,k} &= R_{0,k} \\ Z_{p,j,k} &= R_{1,k} \end{aligned} \quad (32)$$

Por último, para las excitaciones de temperatura parabólicas en ambos lados, el flujo de calor por conducción en ambos lados a punto de muestreo n puede calcularse como:

$$q_{+j,n} = \sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} X_{T,j,k} + p_{+j,n-k-1} X_{p,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} Y_{T,j,k} + p_{-j,n-k-1} Y_{p,j,k}] \quad (33a)$$

$$q_{-j,n} = \sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} Y_{T,j,k} + p_{+j,n-k-1} Y_{p,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} Z_{T,j,k} + p_{-j,n-k-1} Z_{p,j,k}] \quad (33b)$$

Nota: si se desea una excitación de temperatura lineal, se debe imponer $p_{+j} = 0$ y $p_{-j} = 0$

Se observa que las ecuaciones anteriores (33) son lineales y se refieren a la historia de temperaturas y a sus semiaceleraciones p para el flujo de calor.

4.4.1 Energía entre intervalos de tiempo

La energía que atraviesa por conducción cualquier lado de una pared multicapa (Q_{+j} y Q_{-j}), es ahora una nueva señal de salida deseada. La propiedad de la transformada de Laplace se utiliza:

$$\mathcal{L}(Q(t)) = \mathcal{L}\left(\int_0^t q(\tau) d\tau\right) = \frac{1}{s}\mathcal{L}[q] = \frac{q(s)}{s} \quad (34)$$

La siguiente ecuación (35) muestra la nueva función transformada:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathcal{L}[Q_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[Q_{-j}(t)] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{DD(s)}{sBB(s)} & -\frac{1}{sBB(s)} \\ \frac{1(s)}{sBB(s)} & -\frac{AA(s)}{sBB(s)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} XX(s) & YY(s) \\ -YY(s) & ZZ(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \\ \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (35)$$

Por lo tanto la respuesta de la energía a una excitación de perfil parabólico de temperatura consigue un forma similar a la ecuaciones (26) simplemente aumentando el subíndice de las funciones F (ver ecuaciones (25a) y la ecuación (34)).

$$\begin{aligned} Q(t) &= T_o \left[F_2(t) - \frac{1}{t_e} F_3(t) + \frac{1}{t_e} F_3(t - t_e) \right] \\ &+ T_f \left[\frac{1}{t_e} F_3(t) - F_2(t - t_e) - \frac{1}{t_e} F_3(t - t_e) \right] + p[-t_e F_3(t) \\ &+ 2F_4(t) + t_e F_3(t - t_e) - 2F_4(t - t_e)] \end{aligned} \quad (36)$$

Al final del paso de tiempo, se tiene:

$$Q(t_e) = T_o \left[F_2(t_e) - \frac{1}{t_e} F_3(t_e) \right] + T_f \left[\frac{1}{t_e} F_3(t_e) \right] + p[-t_e F_3(t_e) + 2F_4(t_e)] \quad (37)$$

Aunque el método no obliga a que, si se supone que la temperatura sea una señal continua, entonces la temperatura al final del paso de tiempo anterior es el valor inicial de la siguiente: $T_{f,n} = T_{o,n+1}$ o, simplemente, T_n . (ver Figura 23).

Por lo tanto, se obtiene la energía por conducción a través de cualquiera de los lados dentro de la último paso de tiempo ($t_{n-1} \rightarrow t_n$, $Q(t_n) - Q(t_{n-1}) = Q_{(n-1 \rightarrow n)}$), como:

$$\begin{aligned}
 Q_{(n-1) \rightarrow n} = & +T_n \left[\frac{1}{t_e} F_3(t_e) \right] \\
 & + T_{n-1} \left[\frac{1}{t_e} F_3(2t_e) - \frac{3}{t_e} F_3(t_e) + \frac{2}{t_e} F_3(0) + F_2(0) \right] \\
 & + \sum_{k=0}^{\infty} T_{n-k-2} \left[\frac{1}{t_e} F_3((k+3)t_e) - \frac{3}{t_e} F_3((k+2)t_e) \right. \\
 & \left. + \frac{3}{t_e} F_3((k+1)t_e) - \frac{1}{t_e} F_3(kt_e) \right] + p_n [-t_e F_3(t_e) + 2F_4(t_e)] \\
 & + \sum_{k=0}^{\infty} p_{k-1} [-t_e F_3((k+2)t_e) + t_e F_3(kt_e) \\
 & + 2F_4((k+2)t_e) - 4F_4((k+1)t_e) + 2F_4(kt_e)]
 \end{aligned} \tag{38}$$

Si se define W como:

$$(k = 0) \Rightarrow W_{0,0} = \frac{1}{t_e} F_3(t_e) \tag{39a}$$

$$(k = 1) \Rightarrow W_{0,1} = \frac{1}{t_e} F_3(2t_e) - \frac{3}{t_e} F_3(t_e) + \frac{2}{t_e} F_3(0) + F_2(0) \tag{39b}$$

$$(k > 1) \quad W_{0,k} = \frac{1}{t_e} F_3((k+1)t_e) - \frac{3}{t_e} F_3(kt_e) + \frac{3}{t_e} F_3((k-1)t_e) - \frac{1}{t_e} F_3((k-2)t_e) \tag{39c}$$

$$(k = 0) \Rightarrow W_{1,0} = -t_e F_3(t_e) + 2F_4(t_e) \tag{39d}$$

$$(k > 0) \quad W_{1,k} = -t_e F_3((k+1)t_e) + t_e F_3((k-1)t_e) + 2F_4((k+1)t_e) - 4F_4(kt_e) + 2F_4((k-1)t_e) \tag{39e}$$

podemos expresar la cantidad de calor como:

$$Q_{(n-1) \rightarrow n} = \sum_{k=0}^{\infty} T_{n-k} W_{0,k} + \sum_{k=0}^{\infty} p_{n-k} W_{1,k} \quad (40)$$

Como anteriormente, la respuesta completa de la energía viene dada por:

$$Q_{+j}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \frac{DD(s)}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \right) + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \frac{-1}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \right) \quad (41a)$$

$$Q_{-j}(t) = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \frac{1}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{+j}(t)] \right) + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{s} \frac{(-AA(s))}{BB(s)} \mathcal{L}[T_{-j}(t)] \right) \quad (41b)$$

De acuerdo a la ubicación de la excitación y la respuesta se puede escribir:

- $H(s) = -DD(s)$, $G(s) = BB(s)$: $XX_{T,j,k} = W(0, k)$, $XX_{p,j,k} = W(1, k)$.
- $H(s) = \pm 1$, $G(s) = BB(s)$: $\pm YY_{T,j,k} = \pm W(0, k)$, $\pm YY_{p,j,k} = \pm W(1, k)$.
- $H(s) = -AA(s)$, $G(s) = BB(s)$: $ZZ_{T,j,k} = W(0, k)$, $ZZ_{p,j,k} = W(1, k)$.

Finamente, el calor conducido (energía) que atraviesa cualquier lado dentro de un intervalo de tiempo es dado entonces por la ecuación correspondiente

$$Q_{+j,(n-1) \rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} [T_{+j,n-r} \cdot XX_{T,j,r} + p_{+j,n-r} \cdot XX_{p,j,r}] + \sum_{r=0}^{\infty} [T_{-j,n-r} \cdot YY_{T,j,r} + p_{-j,n-r} \cdot YY_{p,j,r}] \quad (42a)$$

$$Q_{-j,(n-1) \rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} [T_{+j,n-r} \cdot YY_{T,j,r} + p_{+j,n-r} \cdot YY_{p,j,r}] + \sum_{r=0}^{\infty} [T_{-j,n-r} \cdot ZZ_{T,j,r} + p_{-j,n-r} \cdot ZZ_{p,j,r}] \quad (42b)$$

5 Aplicación y resultados a un cerramiento multicapa genérico

5.1 Aplicación

5.1.1 Definición del cerramiento

La composición del muro estudiado y su esquema es el siguiente:



Capa	k [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Espesor (m)	c _p [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	ρ[kgm ⁻³]
Ladrillo hueco 11.5	0.667	0.115	1000	1140
Poliestireno expandido	0.0375	0.05	1000	30
Ladrillo hueco 7	0.432	0.07	1000	930
Enlucido de yeso	0.3	0.015	1000	750

Para el cálculo de los factores de respuesta se ha utilizado un programa elaborado por el Departamento de Termodinámica Aplicada, grupo de investigación FRED SOL.

5.1.2 Coeficientes de respuesta (Mitalas)

Como se ha comentado toda sollicitación térmica real, a la que se encuentra sometido un muro, puede ser descompuesta en un conjunto de sollicitaciones elementales, cuya superposición origina la inicial. De esta manera, conociendo la respuesta a una sollicitación unitaria puede generarse la de la excitación global. Como se ha visto esta suposición es válida, en transferencia de calor a través de muros, ya que pueden considerarse inalterables sus propiedades termofísicas en el rango de temperaturas de trabajo.

En general, cabe recordar que se puede hablar de tres funciones de Transferencia básicas:

- Función Y(t), respuesta del sistema, en flujo de calor sobre la superficie interna, debido a una excitación base en temperatura superficial exterior (con temperatura de la superficie interior nula para cualquier instante).
- Función Z(t), respuesta del sistema en flujo de calor sobre la superficie interna, debida a la excitación base en temperatura superficial interior (con temperatura en la superficie exterior nula en el tiempo)
- Función X(t), respuesta del sistema, en flujo de calor sobre la superficie externa, debida a una excitación base en temperatura superficie exterior (con temperatura de la superficie interior nula en cualquier instante).

Nótese que es particularmente interesante la respuesta Z(t), ya que indica la densidad de flujo de calor interior debida a cambios de temperatura interiores. Esta respuesta sirve, en el método de las series temporales radiantes, para descubrir el ritmo al cual

La radiación que incide sobre la cara interior de un muro es devuelta en forma de convección al aire del volumen.

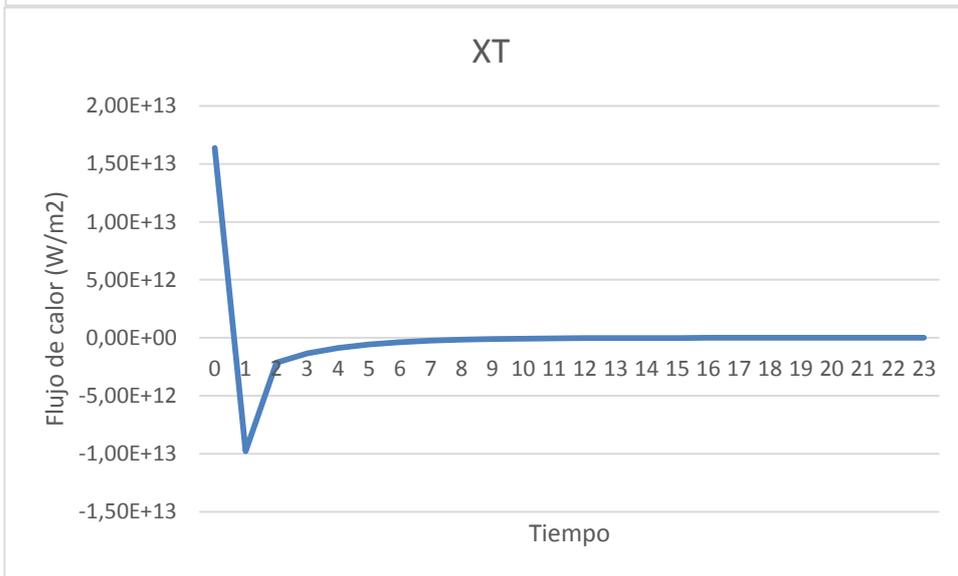
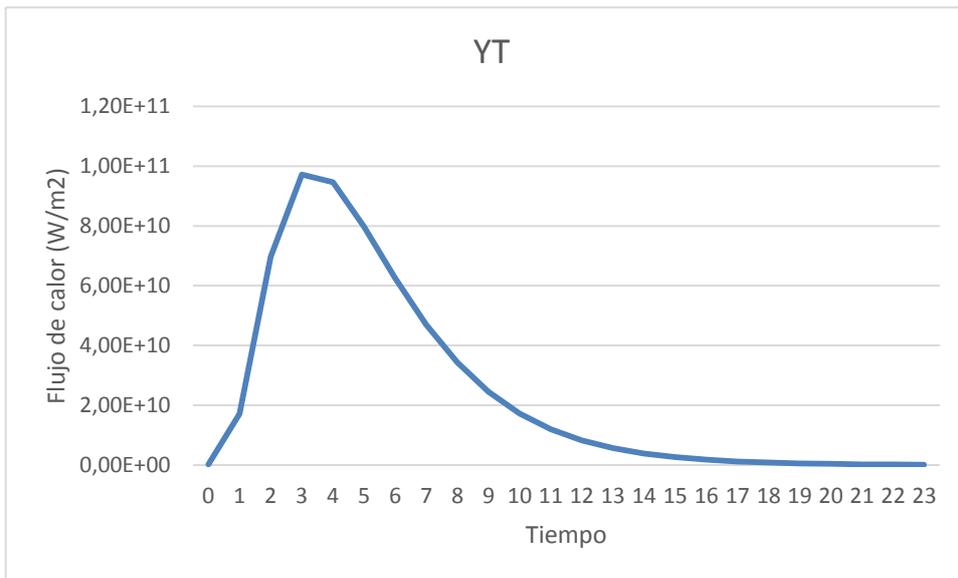
La función de transferencia establece la relación existente entre las respuestas en un instante dado y los valores de la excitación y en los precedentes. Para su resolución pues hay que evaluar la respuesta del sistema a lo largo del tiempo para una excitación unidad triangular en el caso del método de Mitalas, y los valores de esta función se les conoce como “factores de respuesta”.

Se muestra a continuación el resultado de dichos factores para el muro descrito:

time step	Y _T	X _T	Z _T
0	1,81E+08	1,64E+13	-1,01E+13
1	1,71E+10	-9,79E+12	5,72E+12
2	6,97E+10	-2,13E+12	1,60E+12
3	9,72E+10	-1,33E+12	9,19E+11
4	9,46E+10	-8,72E+11	5,34E+11
5	7,98E+10	-5,71E+11	3,11E+11
6	6,26E+10	-3,75E+11	1,82E+11
7	4,70E+10	-2,47E+11	1,07E+11
8	3,43E+10	-1,62E+11	6,31E+10
9	2,45E+10	-1,07E+11	3,74E+10
10	1,72E+10	-7,05E+10	2,23E+10
11	1,20E+10	-4,66E+10	1,34E+10
12	8,28E+09	-3,07E+10	8,09E+09
13	5,67E+09	-2,03E+10	4,91E+09
14	3,86E+09	-1,34E+10	3,00E+09
15	2,62E+09	-8,89E+09	1,85E+09
16	1,77E+09	-5,88E+09	1,14E+09
17	1,19E+09	-3,89E+09	7,11E+08
18	8,02E+08	-2,58E+09	4,45E+08
19	5,38E+08	-1,71E+09	2,80E+08
20	3,60E+08	-1,13E+09	1,77E+08
21	2,41E+08	-7,50E+08	1,13E+08
22	1,61E+08	-4,97E+08	7,22E+07
23	1,07E+08	-3,29E+08	4,63E+07
...

Tabla 5. Coeficientes de respuesta de flujo de calor para la temperatura - función de conformación parabólica (frecuencia de muestreo de una hora). Elaboración propia

5.1.3 Estructura de variación de las funciones (Método Mitalas)



Nótese ciertas apreciaciones sobre las gráficas de este apartado:

- La respuesta Y es la densidad de flujo de calor debida al cambio de temperatura fuera. Por eso inicialmente no sabe que ha habido un cambio y no hay flujo. Luego aparece el flujo hacia el interior (positivo), va creciendo hasta alcanzar un máximo y luego decrece hasta cero.

Para este muro, su valor máximo de calor se produce a las 3 u 4 horas de producirse el pico de temperatura fuera.

- La respuesta X es inicialmente positiva, muy rápida y grande, ya que el flujo de calor se mide en el mismo lado (fuera) donde se está produciendo el cambio de temperatura. A la hora la temperatura baja, el muro está caliente y empieza a perder calor por ese mismo lado (flujo negativo) y se va reduciendo hasta cero.
- La respuesta Z es inicialmente grande y negativa porque estamos mirando el flujo de calor en el interior ($x=L$) debido a un cambio interior. Es negativa porque el calor sale. Sin embargo, pasada una hora, cuando la temperatura dentro vuelve a bajar, el flujo se hace positivo (el muro está más caliente) y devuelve el calor al recinto de forma cualitativamente similar a X, pero no idéntica, ya que la composición del muro no es simétrica. Este comportamiento Z devolviendo energía pasado un tiempo se usa como base del método de las series radiantes, como ya se ha comentado.

5.1.4 Coeficientes de respuesta (Método propuesto)

Esta sección muestra los coeficientes de respuesta de segundo orden para obtener el flujo de calor y la cantidad de calor para el muro definido en el apartado 5.1.1. .

La teoría expuesta en los apartados anteriores se aplica a este ejemplo. Las Ecuaciones de respuesta. (22) y (21) para cada capa y para la pared multicapa respectivamente requeridos para la aplicación del método propuesto. Las raíces resultantes BB (s) se calculan. Esto caracteriza de forma única la dinámica del comportamiento de la pared de varias capas. Entonces, usando las Ecs. (24) y (25) es posible calcular los valores de la R y W coeficientes (ver las Ecs. (27) y (39) respectivamente). Distinguiendo las distintas respuestas y los lados de excitación, se puede obtener el siguiente conjunto de valores: $\{X_t, Y_t, Z_t\}$, $\{X_p, Y_p, Z_p\}$ y $\{XX_t, YY_t, ZZ_t\}$ r. $\{XX_p, YY_p, ZZ_p\}$

El primer par se utiliza para calcular la tasa de transferencia de calor térmico (véase la Ec. (33)). Sus valores exactos se puede encontrar en las Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente. El segundo conjunto par se utiliza para calcular el calor (energía) transferido por conducción (véase la Ec. (42)). Sus valores exactos se pueden encontrar en las Tabla 8 y Tabla 9 respectivamente.

time step	Y _T	X _T	Z _T
0	1,81E+08	1,64E+13	-1,01E+13
1	1,71E+10	-9,79E+12	5,72E+12
2	6,97E+10	-2,13E+12	1,60E+12
3	9,72E+10	-1,33E+12	9,19E+11
4	9,46E+10	-8,72E+11	5,34E+11
5	7,98E+10	-5,71E+11	3,11E+11
6	6,26E+10	-3,75E+11	1,82E+11
7	4,70E+10	-2,47E+11	1,07E+11
8	3,43E+10	-1,62E+11	6,31E+10
9	2,45E+10	-1,07E+11	3,74E+10
10	1,72E+10	-7,05E+10	2,23E+10
11	1,20E+10	-4,66E+10	1,34E+10
12	8,28E+09	-3,07E+10	8,09E+09
13	5,67E+09	-2,03E+10	4,91E+09
14	3,86E+09	-1,34E+10	3,00E+09
15	2,62E+09	-8,89E+09	1,85E+09
16	1,77E+09	-5,88E+09	1,14E+09
17	1,19E+09	-3,89E+09	7,11E+08
18	8,02E+08	-2,58E+09	4,45E+08
19	5,38E+08	-1,71E+09	2,80E+08
20	3,60E+08	-1,13E+09	1,77E+08
21	2,41E+08	-7,50E+08	1,13E+08
22	1,61E+08	-4,97E+08	7,22E+07
23	1,07E+08	-3,29E+08	4,63E+07
...

Tabla 6. Coeficientes de respuesta de flujo para la temperatura a la función de conformación parabólica (frecuencia de muestreo de una hora). Elaboración propia

time step	Y_p	X_p	Z_p
0	-1,86E+15	7,06E+19	-3,75E+19
1	-9,21E+16	5,98E+18	-4,54E+18
2	-1,96E+17	3,54E+18	-2,56E+18
3	-2,15E+17	2,30E+18	-1,49E+18
4	-1,91E+17	1,51E+18	-8,65E+17
5	-1,54E+17	9,89E+17	-5,05E+17
6	-1,17E+17	6,50E+17	-2,96E+17
7	-8,66E+16	4,28E+17	-1,74E+17
8	-6,24E+16	2,82E+17	-1,03E+17
9	-4,42E+16	1,86E+17	-6,14E+16
10	-3,09E+16	1,23E+17	-3,68E+16
11	-2,14E+16	8,09E+16	-2,21E+16
12	-1,47E+16	5,35E+16	-1,34E+16
13	-1,00E+16	3,53E+16	-8,17E+15
14	-6,82E+15	2,34E+16	-5,01E+15
15	-4,61E+15	1,55E+16	-3,09E+15
16	-3,11E+15	1,02E+16	-1,92E+15
17	-2,09E+15	6,78E+15	-1,20E+15
18	-1,41E+15	4,49E+15	-7,53E+14
19	-9,42E+14	2,97E+15	-4,75E+14
20	-6,30E+14	1,97E+15	-3,02E+14
21	-4,21E+14	1,31E+15	-1,93E+14
22	-2,81E+14	8,65E+14	-1,23E+14
23	-1,87E+14	5,73E+14	-7,94E+13
...

Tabla 7 coeficientes de respuesta de flujo para la semi-aceleración para la función de conformación parabólica (frecuencia de muestreo de una hora). Elaboración propia

time step	YYT	XXT	ZZT
0	6,69E+10	3,93E+16	-2,34E+16
1	1,89E+13	-6,92E+15	1,87E+15
2	1,54E+14	-1,28E+16	8,88E+15
3	3,12E+14	-6,07E+15	4,41E+15
4	3,51E+14	-3,91E+15	2,55E+15
5	3,16E+14	-2,56E+15	1,48E+15
6	2,56E+14	-1,68E+15	8,66E+14
7	1,97E+14	-1,10E+15	5,08E+14
8	1,45E+14	-7,25E+14	2,99E+14
9	1,05E+14	-4,78E+14	1,77E+14
10	7,45E+13	-3,15E+14	1,05E+14
11	5,21E+13	-2,08E+14	6,29E+13
12	3,61E+13	-1,37E+14	3,79E+13
13	2,48E+13	-9,06E+13	2,29E+13
14	1,70E+13	-5,99E+13	1,40E+13
15	1,15E+13	-3,96E+13	8,55E+12
16	7,81E+12	-2,62E+13	5,27E+12
17	5,27E+12	-1,74E+13	3,27E+12
18	3,55E+12	-1,15E+13	2,04E+12
19	2,38E+12	-7,61E+12	1,28E+12
20	1,59E+12	-5,04E+12	8,09E+11
21	1,07E+12	-3,34E+12	5,14E+11
22	7,13E+11	-2,21E+12	3,28E+11
23	4,76E+11	-1,47E+12	2,10E+11
...

Tabla 8. Coeficientes de respuesta de energía para la temperatura para la función de conformación parabólica (frecuencia de muestreo de una hora). Elaboración propia

time step	YY _p	XX _p	ZZ _p
0	-6,78E+17	-1,02E+23	6,58E+22
1	-1,25E+20	5,10E+22	-3,18E+22
2	-5,47E+20	1,64E+22	-1,24E+22
3	-7,59E+20	1,03E+22	-7,11E+21
4	-7,37E+20	6,76E+21	-4,13E+21
5	-6,21E+20	4,43E+21	-2,41E+21
6	-4,87E+20	2,91E+21	-1,41E+21
7	-3,65E+20	1,91E+21	-8,27E+20
8	-2,66E+20	1,26E+21	-4,88E+20
9	-1,90E+20	8,29E+20	-2,90E+20
10	-1,34E+20	5,47E+20	-1,73E+20
11	-9,31E+19	3,61E+20	-1,04E+20
12	-6,42E+19	2,38E+20	-6,26E+19
13	-4,40E+19	1,58E+20	-3,80E+19
14	-3,00E+19	1,04E+20	-2,32E+19
15	-2,03E+19	6,89E+19	-1,43E+19
16	-1,37E+19	4,56E+19	-8,84E+18
17	-9,25E+18	3,02E+19	-5,51E+18
18	-6,22E+18	2,00E+19	-3,45E+18
19	-4,17E+18	1,32E+19	-2,17E+18
20	-2,79E+18	8,77E+18	-1,37E+18
21	-1,87E+18	5,81E+18	-8,75E+17
22	-1,25E+18	3,85E+18	-5,59E+17
23	-8,31E+17	2,55E+18	-3,59E+17
...

Tabla 9. Coeficientes de respuesta de energía para el semi-aceleración para la función de conformación parabólica (frecuencia de muestreo de una hora).Elaboración propia

5.2 Resultados

5.2.1 Definición de condiciones de contorno

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 corto se acerca a la temperatura real del cerramiento. El paso de tiempo considerado para el caso lineal ha sido de: 1 hora, 15 minutos y 5 minutos, mientras que para el caso de solución de segundo orden se ha mantenido el paso siempre de 1 hora.

Las hipótesis de cálculo son las siguientes:

- fuente de radiación interna de las luces y la gente que inciden sobre la superficie interna durante 2 horas; $P_{SRC} = 10 \text{ [Wm}^{-2}] \cdot 1 \text{ [m}^2]$, después $P_{SRC} = 0$.
- Todo el resto de las superficies internas se mantienen a una temperatura constante; $T_r = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- La temperatura en el otro lado de la pared es constante; $T_{,j} = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- La temperatura del aire seco es constante; $T_a = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- Radiación coeficiente constante equivalente; $h_r = 5 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$.
- El coeficiente de convección es constante; $h_c = 3 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$

5.2.2 Calor liberado al aire

Con el fin de obtener el calor total transferido a lo largo del paso de tiempo, debido a los diferentes mecanismos de transferencia de calor, se aplican las ecuaciones de:

- conducción,
- transferencia de calor radiante por infrarrojos con las otras superficies,
- fuentes radiantes que inciden en la superficie,
- y la transferencia de calor por convección.

5.2.3 Calor liberado al aire (método lineal)

La temperatura de la superficie en cada punto de muestreo se obtiene del balance de energía térmica al final de la etapa.

$$\sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} Y_{T,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} Z_{T,j,k}] + hr_{-j,n} (T_{r,n} - T_{-j,n}) + hc_{-j,n} (T_{a,n} - T_{-j,n}) + P_{rad,src,j,n} = 0 \quad (43)$$

En el ejemplo $hr_{-j}(t) = hr$, $hc_{-j}(t) = hc$, $T_r(t) = T_r$, $T_a(t) = T_a$

$P_{rad,src,j,n} = P$ permanece constante

Despejando para $T_{-j,n}$:

$$T_{-j,n} = \left(\sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} \cdot Y_{T,j,k}] + \sum_{k=1}^{\infty} [T_{-j,n-k} \cdot Z_{T,j,k}] + hr \cdot T_r + hc \cdot T_a + P \right) / (-Z_{T,j,0} + hr + hc) \quad (44)$$

y la evolución de la temperatura superficial dentro del tiempo paso es lineal, es decir .:

$$T_{-j}(t) = T_{-j,n-1} + \frac{T_{-j,n} - T_{-j,n-1}}{t_e} t \quad (45)$$

En el ejemplo $hr_{-j}(t) = hr$, $hc_{-j}(t) = hc$, $T_r(t) = T_r$, $T_a(t) = T_a$ permanece constante

Con el fin de obtener el calor total transferido a lo largo del paso de tiempo, debido a los diferentes mecanismos de transferencia de calor, las ecuaciones siguientes se aplican:

- Calor transferido por conducción. En este caso es aplicable la ecuación 42b con $P_{+j,nr} = P_{-j,nr} = 0$

$$Q_{cond,(n-1) \rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} T_{+j,n-r} \cdot YY_{T,j,r} + \sum_{r=0}^{\infty} T_{-j,n-r} \cdot ZZ_{T,j,r} \quad (46)$$

- Transferencia de calor radiante por infrarrojos con las otras superficies:

$$Q_{rad,(n-1) \rightarrow n} = \int_{t_{n-1}}^{t_n} hr_{-j}(t) (T_r(t) - T_{-j}(t)) dt = hr \left(T_r - \frac{T_{-j,n} + T_{-j,n-1}}{2} \right) t_e \quad (47)$$

- Fuentes radiantes que inciden en la superficie:

$$Q_{src,(n-1) \rightarrow n} = P \cdot t_e \quad (48)$$

- Transferencia de calor por convección:

$$\begin{aligned} Q_{conv,(n-1) \rightarrow n} &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} hc_{-j}(t)(T_{-j}(t) - T_a(t))dt \\ &= hc \left(\frac{T_{-j,n} + T_{-j,n-1}}{2} - T_a \right) t_e \end{aligned} \quad (49)$$

La Tabla 10 muestra la evolución por hora de estos valores para la función lineal de conformación.

Eso significa que en algunos puntos de muestreo la energía ha desaparecido (observar la dos primeras horas), mientras que en algunos otros la energía de repente aparece. Esta compensación hace que la función de conformación lineal presente estabilidad, o en otras palabras, el error no se acumula catastróficamente.

La suma de las energías en cada intervalo debería ser nula si se conservase el 1º Principio de la Termodinámica, pero se observa (ver columna final de la Tabla 10) que no lo es

Hour	Tn[°C]	Qcond,n[Jm-2]	Qrad,n[Jm-2]	Qconv,n[Jm-2]	Qsrc,n[Jm-2]	SUM[Jm-2]
1	22,55	-12944	-4965	-2979	36000	15113
2	22,73	-15993	-11498	-6899	36000	1610
3	22,28	-274	-9033	-5420	0	-14726
4	22,18	5170	-4115	-2469	0	-1414
5	22,13	4247	-2821	-1693	0	-267
6	22,1	3306	-2131	-1278	0	-103
7	22,08	2554	-1638	-983	0	-67
8	22,06	1970	-1263	-758	0	-51
9	22,05	1520	-975	-585	0	-40
10	22,04	1171	-752	-451	0	-32
11	22,03	902	-580	-348	0	-26
12	22,02	694	-447	-268	0	-22
13	22,02	532	-344	-206	0	-18
14	22,01	407	-264	-158	0	-15
15	22,01	310	-202	-121	0	-13
16	22,01	234	-154	-92	0	-11
17	22,01	176	-116	-70	0	-10
18	22	130	-87	-52	0	-9
19	22	95	-65	-39	0	-8
20	22	68	-47	-28	0	-8
21	22	47	-34	-20	0	-7
22	22	30	-23	-14	0	-7
23	22	17	-15	-9	0	-7
24	22	7	-8	-5	0	-6
...

Tabla 10 Energía transferida entre instantes de muestreo para el método lineal. Muestreo cada hora. La Columna SUM muestra el desequilibrio de la energía dentro de cada intervalo de tiempo.
Fuente: Elaboración propia

5.2.4 Calor liberado al aire (función parabólica)

Este nuevo método tiene dos incógnitas en lugar de uno por cada lado de la pared. En nuestro ejemplo un lado ha fijado la temperatura por lo que tenemos sólo un lado en estudio. Las incógnitas son: la próxima temperatura y su semi-p aceleración (en el paso de tiempo). Por lo tanto dos ecuaciones se utilizan: el balance de energía en el paso de tiempo y la potencia térmica al final del tiempo. Eso es:

$$\sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} Y_{T,j,k} + p_{+j,n-k} Y_{p,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} Z_{T,j,k} + p_{-j,n-k} Z_{p,j,k}] + hr_{-j}(T_r - T_{-j,n}) + hc_{-j}(T_a - T_{-j,n}) + P_{rad,srcj} = 0 \quad (50)$$

$$\sum_{k=0}^{\infty} [T_{+j,n-k} YY_{T,j,k} + p_{+j,n-k} YY_{p,j,k}] + \sum_{k=0}^{\infty} [T_{-j,n-k} ZZ_{T,j,k} + p_{-j,n-k} ZZ_{p,j,k}] + \int_{t_{n-1}}^{t_n} hr_{-j}(t)(T_r(t) - T_{-j}(t))dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} hc_{-j}(t)(T_a(t) - T_{-j}(t))dt + \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_{rad,srcj}(t)dt = 0 \quad (51)$$

El perfil asumido para la temperatura superficial es parabólica, es decir .:

$$T_{-j}(t) = T_{-j,n-1} + \frac{T_{-j,n} - T_{-j,n-1}}{t_e} \cdot t - p_{-j,n} t_e \cdot t + p_{-j,n} \cdot t^2 \quad (52)$$

Recordando que $hr_{-j}(t) = hc_{-j}(t) = hc$ $T_r(t) = T_r$ $T_a(t) = T_a$ $P_{rad,srcj}(t) = P$ se mantiene fijo en el presente ejemplo, se necesita el valor integral de la temperatura superficial para cada paso de tiempo para computar la energía transferida. Esto puede ser calculado de la siguiente manera:

$$\int_{t_{n-1}}^{t_n} T_{-j}(t)dt = T_{-j,n-1}(t_e/2) + T_{-j,n}(t_e/2) + p_{-j,n} t_e^3 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) \quad (53)$$

Por tanto, se tienen dos expresiones que son función de $T_{-j,n}$ y $p_{-j,n}$ y que pueden resolverse fácilmente:

$$A_1 \cdot T_{-j,n} + B_1 \cdot p_{-j,n} + C_1 = 0 \quad (54)$$

$$A_2 \cdot T_{-j,n} + B_2 \cdot p_{-j,n} + C_2 = 0$$

Donde

$$A_1 = Z_{T,j,0} - hr - hc$$

$$B_1 = Z_{p,j,0}$$

$$C_1 = \sum_{k=0}^{\infty} T_{+j,n-k} Y_{T,j,k} + \sum_{k=0}^{\infty} p_{+j,n-k} Y_{p,j,k} + \sum_{k=1}^{\infty} T_{-j,n-k} Z_{T,j,k} \\ + \sum_{k=1}^{\infty} p_{+j,n-k} Z_{p,j,k} + hrT_r + hcT_a + P$$

$$B_2 = ZZ_{p,j,0} - hr \cdot t_e^3 \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\right) - hc \cdot t_e^3 \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\right)$$

$$C_2 = \sum_{k=0}^{\infty} T_{+j,n-k} YY_{T,j,k} + \sum_{k=0}^{\infty} p_{+j,n-k} YY_{p,j,k} + \sum_{k=1}^{\infty} T_{-j,n-k} ZZ_{T,j,k} \\ + \sum_{k=1}^{\infty} p_{-j,n-k} ZZ_{p,j,k} + hr \left(T_r - \frac{T_{-j,n-1}}{2}\right) t_e \\ + hc \left(T_a - \frac{T_{-j,n-1}}{2}\right) t_e + P * t_e \quad (55)$$

En este caso, el calor transferido es:

- Por conducción

$$Q_{cond,(n-1) \rightarrow n} = \sum_{r=0}^{\infty} [T_{+j,n-r} YY_{T,j,r} + p_{+j,n-r} YY_{p,j,r}] \\ + \sum_{r=0}^{\infty} [T_{-j,n-r} ZZ_{T,j,r} + p_{-j,n-r} ZZ_{p,j,r}] \quad (56)$$

- Por radiación a la superficie

$$Q_{src,(n-1) \rightarrow n} = P \cdot t_e \quad (57)$$

- Por radiación infrarroja al resto de superficies:

$$\begin{aligned}
 Q_{rad,(n-1) \rightarrow n} &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} hr_{-j}(t)(T_r(t) - T_{-j}(t))dt \\
 &= hr \left[T_r - \frac{T_{-j,n-1}}{2} - \frac{T_{-j,n}}{2} - p_{-j,n} t_e^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) \right] t_e
 \end{aligned} \tag{58}$$

- Por convección:

$$\begin{aligned}
 Q_{conv,(n-1) \rightarrow n} &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} hc_{-j}(t)(T_a(t) - T_{-j}(t))dt \\
 &= hc \left[T_a - \frac{T_{-j,n-1}}{2} - \frac{T_{-j,n}}{2} - p_{-j,n} t_e^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) \right] t_e
 \end{aligned} \tag{59}$$

En el caso del método propuesto, este es conservativo *per se* ya que una de las condiciones “impuestas” para determinar la evolución de temperaturas es precisamente que el balance de energía entre instantes de muestreo sea cero, condición imprescindible para “construir la parábola”.

Hour	Tn[°C]	Qcond,n[Jm-2]	Qrad,n[Jm-2]	Qconv,n[Jm-2]	Qsrc,n[Jm-2]	SUM[Jm-2]
1	22,70	-21300,80	-9187,00	-5512,20	36000	0
2	22,79	-14652,90	-13342,00	-8005,17	36000	0
3	22,17	9335,35	-5834,59	-3500,76	0	0
4	22,16	4904,05	-3065,03	-1839,02	0	0
5	22,12	3932,83	-2458,02	-1474,81	0	0
6	22,09	3049,91	-1906,19	-1143,72	0	0
7	22,07	2370,58	-1481,61	-888,97	0	0
8	22,06	1843,44	-1152,15	-691,29	0	0
9	22,04	1434,23	-896,40	-537,84	0	0
10	22,03	1116,32	-697,70	-418,62	0	0
11	22,03	869,18	-543,24	-325,94	0	0
12	22,02	676,95	-423,09	-253,85	0	0
13	22,02	527,36	-329,60	-197,76	0	0
14	22,01	410,91	-256,82	-154,09	0	0
15	22,01	320,23	-200,14	-120,09	0	0
16	22,01	249,59	-156,00	-93,60	0	0
17	22,01	194,56	-121,60	-72,96	0	0
18	22,00	151,68	-94,80	-56,88	0	0
19	22,00	118,26	-73,91	-44,35	0	0
20	22,00	92,21	-57,63	-34,58	0	0
21	22,00	71,90	-44,94	-26,96	0	0
22	22,00	56,07	-35,04	-21,03	0	0
23	22,00	43,73	-27,33	-16,40	0	0
24	22,00	34,10	-21,31	-12,79	0	0
...

**Tabla 11 Energía transferida entre instantes de muestreo para el método parabólico. Muestreo cada hora. La Columna SUM muestra el equilibrio de la energía dentro de cada intervalo de tiempo.
Fuente: Elaboración propia**

5.2.5 Comparación del calor liberado al aire de acuerdo con el método empleado.

Se ha resuelto el método lineal para intervalos de muestreo de 5min, 15 min y 1 hora, y el método parabólico para un intervalo de 1 hora, en la Figura 26 se representa la evolución de la temperatura de la pared y el calor cedido por convección al aire en los primeros intervalos se representa en la Figura 24.

Nótese en ambas figuras que los valores del método lineal que más se aproximan al método parabólico en base de 1h son aquellos calculados para un intervalo de 5 minutos. El método propuesto permite una precisión similar a aumentar la frecuencia de muestreo con un tiempo inferior de cálculo.

Finalmente en la Figura 25 se representan los errores relativos que se tienen con el método lineal y parabólico con intervalos horarios, dando por evolución certera la simulación lineal con intervalos de 5 minutos

Tiempo	Parabólico 1 (h)	Lineal 1 (h)	Lineal 15 (min)	Lineal 5 (min)
0-3600	5508	2979	4857	5377
3600-7200	7997	6899	7702	7806
7200-10800	3484	5420	3999	3517
10800-14400	1810	2469	2003	1905
14400-18800	1438	1693	1497	1428
18800-21600	1104	1278	1149	1088
21600-25200	849	983	885	827
...

Figura 24 Calor transferido al aire en [J / m2] dentro de un intervalo de una hora. Fuente: Elaboración propia Fuente: Elaboración propia

time[s]	Error Parabolic[%]	Error Linear[%]
3600	2,44	-44,6
7200	2,45	-11,62
10800	-0,93	54,09
14400	-4,97	29,6
18000	0,71	18,54
21600	1,49	17,55
25200	2,6	18,77
...

Figura 25 Errores relativos en porcentaje del calor transferido al aire con respecto a la método lineal y parabólico cuando la frecuencia de muestreo es de una hora. Fuente: Elaboración propia

5.3 Conclusiones de la aplicación

Los métodos tradicionales para calcular el fenómeno de la conducción en la transferencia de calor en un muro de varias capas se basan en linealidad de la función para perfilar la evolución de la temperatura superficial en ambos lados del muro. Los métodos basados en esta hipótesis incumplen el principio de conservación de la energía dentro de los puntos de muestreo. Se basan en un equilibrio de potencia térmica en los puntos de muestreo. Sin embargo el método compensa los errores que conduce el modelo, acortando en ciertos casos el periodo de muestreo hasta alcanzar esquemas numéricos estables. Sin embargo, este es un inconveniente cuando la acción de los sistemas de aire acondicionado deben ser incluidos (los modelos de éstos son ecuaciones algebraicas, y no incluyen la dinámica de los sistemas) y la energía debe tenerse en cuenta (cuándo y cuánta energía y potencia).

Por otra parte los flujos de energía aparecen y desaparecen de repente.

Es importante hacer hincapié en que el propósito de la función de transferencia de calor en cualquiera de los casos; si lineal, parabólica o cualquier otro, es el perfil de la evolución de las temperaturas superficiales de las paredes cuando no estamos muestreando todos los instantes.

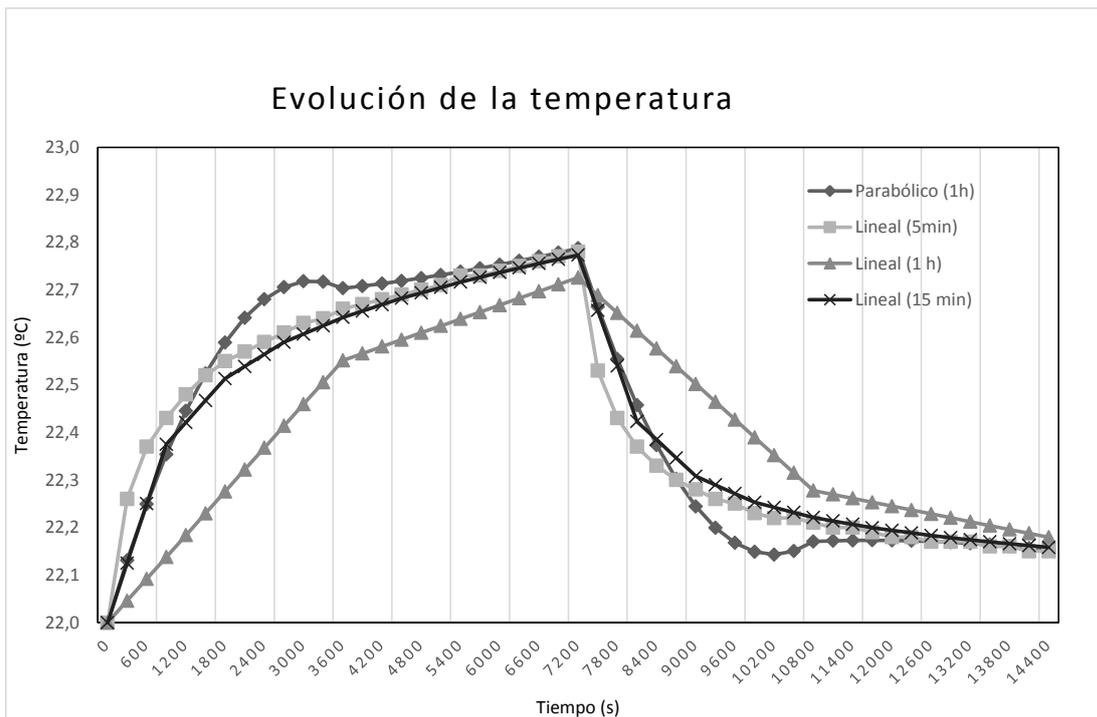


Figura 26 Evolución de la temperatura superficial de la pared para una función parabólica para un intervalo de 1 hora, así como para la función lineal para intervalos de: 1 hora, 15 minutos y 5 minutos. Elaboración propia

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.

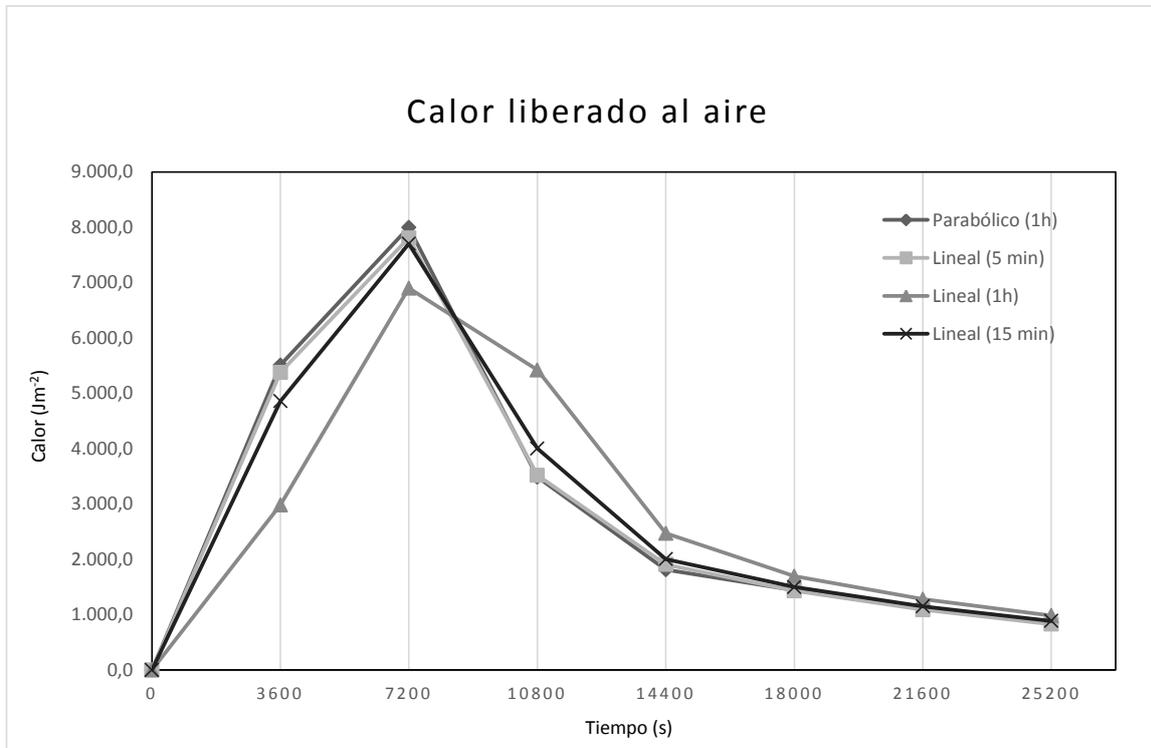


Figura 27 El calor liberado por convección al aire por la pared ejemplo para para la función parabólica con frecuencia de muestreo de 1h y para la función lineal con 1 hora, 15 minutos y 5 minutos de frecuencia de muestreo. Fuente: Elaboración propia.

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.

Se propone substituir el elemento formador de orden 1 por otro de orden 2. Por lo que para dar forma a la evolución de temperaturas a cada lado del cerramiento, además del balance de potencias se requiere el balance de energía para que el esquema de cálculo sea conservativo. La función que propone el método tiene como fin conseguir un esquema horario tan preciso (de temperatura y energía transferida) como sea posible a otros métodos de frecuencia de muestreo más altas.

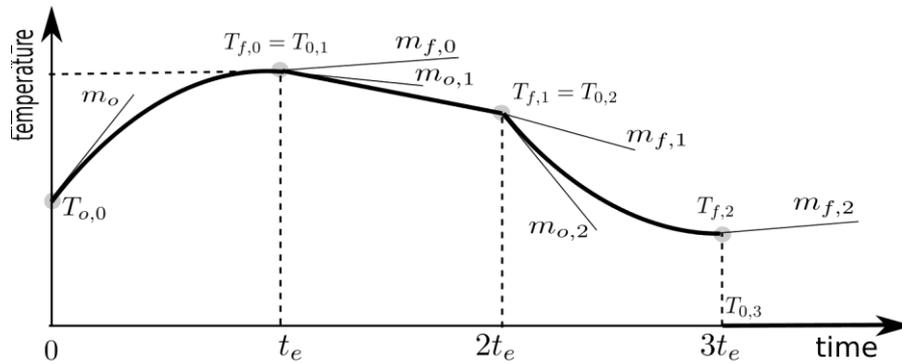


Figura 28 Esquema de secuencia de la evolución de la temperatura teniendo en cuenta la convolución parabólica propuesta

El objetivo es conseguir un método de simulación más rápido y preciso. El esquema debe conservar la energía para permitir la toma de saltos por hora de las cargas internas u otras excitaciones y la acción de los sistemas de climatización. La dinámica de HVAC es rara vez considerado y su tiempo de respuesta es más rápido que el edificio y es por eso nos centramos en una frecuencia de muestreo de hora. Resumiendo se puede decir:

1. Se ha demostrado cómo aplicar el método de los factores de respuesta a más funciones de conformación complejas (un polinomio de segundo orden en este caso).
2. El esquema resultante conserva la energía dentro de los puntos de muestreo. El perfil parabólico permite cumplir esta condición entre los puntos de muestreo.
3. Se demuestra que para la misma frecuencia de muestreo de la función parabólica da mejores resultados que la lineal. Existe una mayor precisión en la temperatura y la energía transferida al aire.

5.4 Otros intercambios de calor

Con el fin de completar la comparación entre el método parabólico y lineal, el presente apartado incluye dos tablas de resultados acerca de la radiación infrarroja y la conducción de transferencia de calor, respectivamente. Esto permite comparar el flujo de energía en diferentes puntos de muestreo (paso 1 h), mostrando las dos últimas columnas las diferencias con el caso lineal y parabólico respecto al caso lineal de 5 [min] paso de tiempo. Estas tablas aportan más información sobre el comportamiento de ambos esquemas de simulación.

Time (s)	Parabolic 1 (h)	Linear 1 (h)	Linear 15 (min)	Linear 5 (min)	Error parabolic (%)	Error linear (%)
3600	9179	4965	8096	8961	2,44	-44,60
7200	13329	11498	12837	13010	2,45	-11,62
10800	5807	9033	6665	5862	-0,93	54,09
14400	3017	4115	3338	3175	-4,97	29,60
18000	2397	2821	2495	2380	0,71	18,54
21600	1840	2131	1916	1813	1,49	17,55
25200	1415	1638	1475	1379	2,60	18,77
...

Tabla 12 El calor transferido por radiación infrarroja (J / m2) dentro de intervalo de una hora. Los errores son para la (h) Caso 1 se refiere a la (min) caso lineal 5. Fuente: (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015)

Time (s)	Parabolic 1 (h)	Linear 1 (h)	Linear 15 (min)	Linear 5 (min)	Error parabolic (%)	Error linear (%)
3600	21313	12944	18735	20200	5,51	-35,92
7200	14674	15993	15381	15175	-3,30	5,39
10800	-9292	274	-6373	-7910	17,47	-103,46
14400	-4828	-5170	-5276	-5070	-4,77	1,98
18000	-3835	-4247	-3979	-3803	0,82	11,67
21600	-2943	-3306	-3057	-2896	1,62	14,14
25200	-2264	-2554	-2353	-2203	2,75	15,92
...

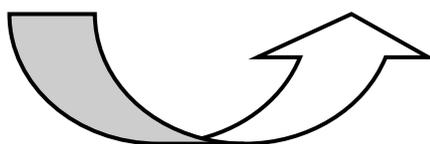
Tabla 13 El calor transferido por conducción (J / m²) dentro de intervalo de una hora. Los errores son para la 1 (h) caso se refirió a la (min) caso lineal 5. Fuente: (Pinazo Ojer, Soto Francés, Sarabia Escriva, & Soto Francés, 2015)

6 Aplicación y resultados a distintas soluciones constructivas

6.1 Introducción

Se trata de comprobar la fiabilidad del método a través de su aplicación a distintas soluciones constructivas. 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.

Paso de tiempo de 1h	Paso de tiempo de 5min
Método lineal 1h	Método lineal 5min
Método parabólico 1h	



Se proponen ciertas preguntas a responder tras la aplicación a los distintos tipos:

- ¿depende la precisión del método del tipo de solución? ¿es más preciso en soluciones másicas?
- ¿existe algún patrón en la precisión del modelo?
- ¿para una misma solución constructiva (mismas capas) la situación de aislante influye en los resultados de manera concluyente?

Para responder a estas preguntas dentro del ámbito de la rehabilitación energética, objeto de interés como se ha mencionado al comienzo del presente documento, se realiza una breve reseña histórica de los tipos constructivos en la edificación residencial en España. De estos tipos se toman algunos representativos y sus opciones de soluciones de mejora, para que los tipos testeados tengan correspondencia con modelos reales de la práctica habitual de la arquitectura y en el sector de la rehabilitación.

6.2 Breve reseña

Las soluciones testeadas han sido tomadas del Catálogo de Soluciones Constructivas de Rehabilitación elaborado por el Instituto Valenciano de la Edificación, que surge como un instrumento de ayuda para el técnico que ha de enfrentarse a la rehabilitación energética de edificios. Se centra en el desarrollo de propuestas de intervención, dentro del ámbito de las medidas pasivas, afectando a los elementos constructivos que componen la envolvente térmica del edificio (fachadas, cubiertas, huecos,...).

Una idea fundamental de partida en la concepción del documento es que, para proponer actuaciones futuras de mejora energética en edificios existentes, se hace

necesario conocer cómo se construyeron en el pasado. También es sustancial el poder cuantificar dichas mejoras para garantizar los posibles ahorros energéticos y optimizar los costes económicos de las intervenciones. Es evidente que el objetivo principal es reducir el consumo de energía y de emisiones de CO₂, pero se ha de plantear intentando que la relación coste/ahorro sea razonable. Por ello el modelo propuesto puede contribuir a mejoras desde el punto de vista cuantitativo los futuros estudios de escenarios de mejora.

El Catálogo contiene un amplio abanico de las tipologías de soluciones constructivas, que componen la envolvente térmica de los edificios, utilizados en el parque edificatorio español desde 1940 hasta 1980, fecha en la que entra en vigor la Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas de los edificios (NBE-CT-79) y, a partir de la cual, se empiezan a diseñar fachadas y cubiertas incorporando aislante térmico de forma sistemática. En consecuencia, existe un gran número de edificios construidos con anterioridad a la citada norma que carecen de aislante térmico en su envolvente. Este Catálogo también incluye las tipologías resultantes de mejorar energéticamente dichas soluciones, con la información relativa a las prestaciones térmicas alcanzadas, incluyendo los correspondientes detalles constructivos y dando criterios para la selección de cada una de las soluciones propuestas desde un punto de vista no sólo técnico, sino también económico, de ejecución y, por supuesto, desde el punto de vista de la sostenibilidad. De estas soluciones de mejora que se citan de manera genérica, se tomarán aislantes concretos en conductividad y espesor para realizar el testeo de la metodología propuesta.

Este documento al que se hace referencia, y en el que se ha basado para escoger las soluciones tipo, se ha elaborado, no sólo mediante consulta de bibliografía específica, sino que también se han entrevistado a constructores y arquitectos que trabajaron en el periodo señalado. Además se han analizado bases de datos oficiales con información relativa a inspecciones de edificios y se ha consultado datos de proyectos de rehabilitación de fachadas y cubiertas, que se están desarrollando actualmente.

Por lo tanto, el documento referenciado da información en dos aspectos fundamentales dentro del campo de la rehabilitación energética. Por un lado la caracterización de las tipologías constructivas de las soluciones que componen la envolvente térmica de los edificios a rehabilitar (con su descripción hoja a hoja necesarios para realizar los cálculos de transferencia de calor), y por otro lado, propone diferentes soluciones para mejorar energéticamente el estado inicial de los mismos (para poder estudiar algunas variables que influyan en la rigurosidad del método planteado).

A continuación se detalla según épocas, a modo de resumen, las soluciones constructivas más habituales. Parte de ellas se tomarán para verificar el modelo propuesto, para que tengan correspondencia con soluciones y estrategias de mejora reales. Este trabajo de síntesis (evolución de las soluciones constructivas tipo por años) procede de uno de los documentos desarrollados por el Instituto Valenciano de la Edificación dentro del marco del proyecto europeo EPISCOPE (Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks).

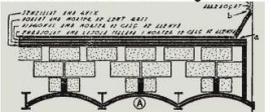
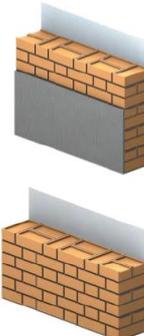
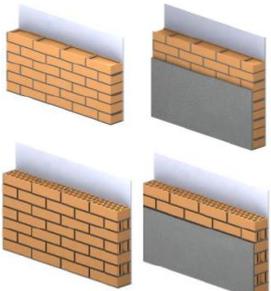
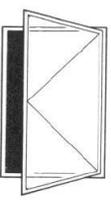
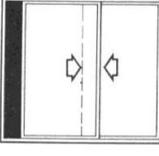
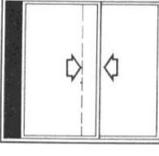
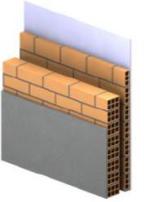
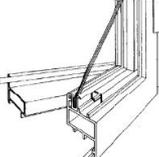
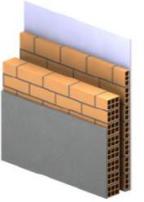
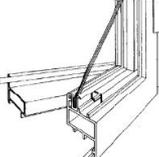
YEAR	ROOFING		EXTERIOR WALLS		WINDOWS			
	Type	U W/m ² K	Type	U W/m ² K	Type	U glass W/m ² K	U Frame W/m ² K	g.L
1900	<p>In the early twentieth century the most common pitched roofs were a set of wooden trusses which supported one or more ceramic pieces layers, as support for the tiles. Often the attic space was closed with a straw ceiling covered with plaster to create a ventilated chamber.</p> 	4,17	<p>In the early twentieth century, especially in buildings of short height and in small towns, the load-bearing walls of stone are still been used, either limestone or granite.</p> 	2,63	<p>Wooden swing windows with monolithic glass.</p> 	5,7	2,2	0,80 - 0,85
	<p>In the early twentieth century, the most common solution of flat roofs were the ventilated flat roofs generated by brick partitions. This brick partitions had hollows to permit ventilation and they were leaned on metal or wood structures. These structures had brick vaulting between.</p> 		<p>Although in Europe framed structures have been introduced, in Spain, the load-bearing walls are still in use until the 1940s. The facade usually consisted in a single wall of brick of a foot or a foot and a half, either coated or uncoated. The slab was supported by the entire sheet thickness. Sometimes a thin brick wall was built as an interior skin.</p> 		<p>When the metalwork window appeared, they came to be used in the main facade, placing the wooden windows in the courtyards facades.</p> 			
1940	<p>After the reinforced concrete framed structures proliferation, the brick partitions of the ventilated flat or pitched roofs now lean on unidirectional slabs. These slabs had mostly plaster joist infill blocks as a lightning between joists.</p> 	1,67	<p>From 1940 framed structures are begun to be used, usually of reinforced concrete, with lights of 3-4 meters. From the sixties these structures were the most common. The facade is released from its structural function, so in most cases the thickness of the facade was reduced to half a foot of solid or perforated bricks. The slabs were supported by big beams in which the factory fully rested. There was no movement joints between structural components and facades which has caused numerous cracks and fissures in the brick walls.</p> 	3,03	<p>Folding steel window with monolithic glass.</p> 	5,7	5,7	0,80 - 0,85
	<p>In the forties, the advent of lightweight concrete, allowed the introduction of an insulating body which replaced in many cases the air chambers in flat roofs. The roof becomes a single sheet multi-layer: slab, concrete slope, waterproofing and protection.</p> 		<p>In the sixties, coinciding with the development of waterproofing, flat roof extends to populations with a tradition of pitched roof. The ceramic joint infill blocks take greater prominence to the time the concrete ones start to enter in the market.</p> 		<p>Aluminum sliding window with monolith glass.</p> 			
1960	<p>In the sixties, coinciding with the development of waterproofing, flat roof extends to populations with a tradition of pitched roof. The ceramic joint infill blocks take greater prominence to the time the concrete ones start to enter in the market.</p> 	1,92	<p>In the sixties the framed structures grow in height and raise the lights to 4-5 m. A hollow brick inner sheet is added to the existing brick wall, leaving a cavity in the middle. With the entry into force of the Standard NBE-CT-79 thermal insulating are into the air chambers.</p> 	1,43	<p>Aluminum sliding window with monolith glass.</p> 	5,7	5,7	0,80 - 0,85
	<p>Ventilated roofs are still used frequently. NBE-CT-79 Standard entry into force in 1979 and insulation begins to be putted in the air chambers of the ventilated roofs and under the pavement of non-ventilated roofs.</p> 		<p>The cheapest alternative to perforated brick was used in the outer sheet: a half foot hole brick wall covered and painted. In many buildings, combining both options.</p> 		<p>Aluminum sliding window with monolith glass.</p> 			
1980	<p>Ventilated roofs are still used frequently. NBE-CT-79 Standard entry into force in 1979 and insulation begins to be putted in the air chambers of the ventilated roofs and under the pavement of non-ventilated roofs.</p> 	2,33	<p>The cheapest alternative to perforated brick was used in the outer sheet: a half foot hole brick wall covered and painted. In many buildings, combining both options.</p> 	1,33	<p>Aluminum sliding window with monolith glass.</p> 	5,7	5,7	0,80 - 0,85

Tabla 14 Caracterización tipológica en estado actual del parque residencial edificatorio existente por épocas

6.3 Rehabilitación energética: fachadas y cubiertas

El máximo potencial de ahorro según diversos autores se encuentra en fachadas y cubiertas, y es por ello que los máximos esfuerzos en la actuación de mejora de la envolvente se centran en estos elementos.

La razón del enorme potencial de ahorro frente a otros elementos reside principalmente en que el porcentaje de superficie de un edificio se corresponde mayoritariamente con fachadas y cubiertas.

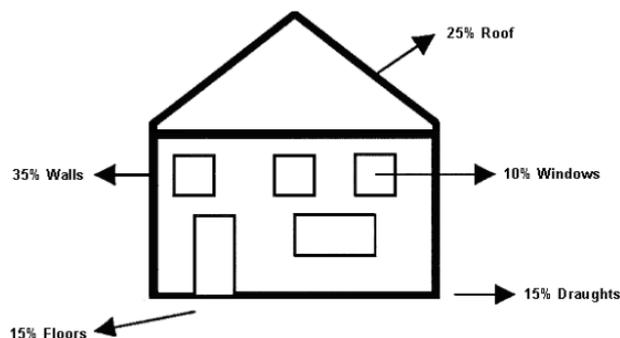


Figura 29 Esquema de porcentaje de pérdidas habituales por elemento en régimen de invierno.
Fuente: Tipperary Energy Agency

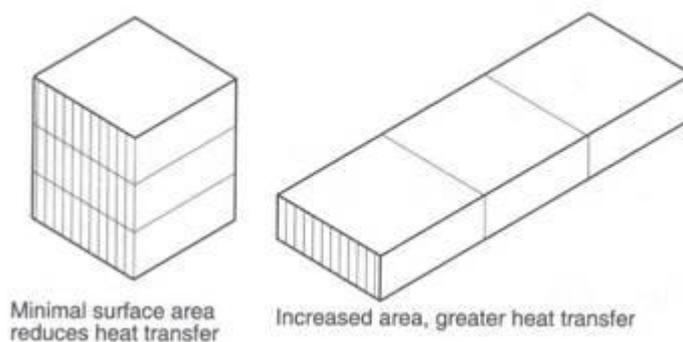


Figura 30 Esquemas de cómo el área expuesta influye en la transferencia de calor con el exterior.
Fuente: Low Energy Architecture Research Unit (LEARN) of London Metropolitan University

También es cierto que en la práctica habitual de la rehabilitación, acuden otros factores que provocan la intervención en fachadas y cubiertas:

- Habitualmente otros elementos como huecos son intervenidos de manera parcial por los distintos usuarios que suelen ser propietarios de los edificios.
- Las intervenciones en fachadas y cubiertas suelen ocasionarse en origen por otras patologías como filtraciones, fisuras, etc. Por lo que son elementos más intervenidos.

Por ello, se han tomado como soluciones constructivas ciertos elementos de fachada y cubiertas que como se justificará (breve reseña histórica) por ser representativos del parque residencial actual.

6.3.1 Aplicación: Muros másticos con distinta posición de aislante

Se estima que los primeros ladrillos fueron creados alrededor del 6.000 a. C. El ladrillo constituyó el principal material en la construcción de las antiguas Mesopotamia y Palestina, donde apenas se disponía de madera y piedras. En el curso de la Edad Media en España, por influencia musulmana, el uso del ladrillo alcanzó gran difusión, sobre todo en Castilla, Aragón y Andalucía.

A mediados del siglo XIX las fachadas de ladrillo, estaban constituidas por muros de carga gruesos de hasta 6 plantas de altura, generalmente de ladrillo visto. El grueso de las plantas inferiores tenía hasta 2 pies y en las superiores se reducía a 1 pie. Los forjados apoyaban sobre los muros con apoyo simple sin generar torsión. La fachada era un elemento estructural que se rigidizaba con muros ortogonales. Una consecuencia directa de esta tipología era la diferencia de superficie útil en las diferentes plantas, factor muy trascendente con la aparición de la vivienda social.

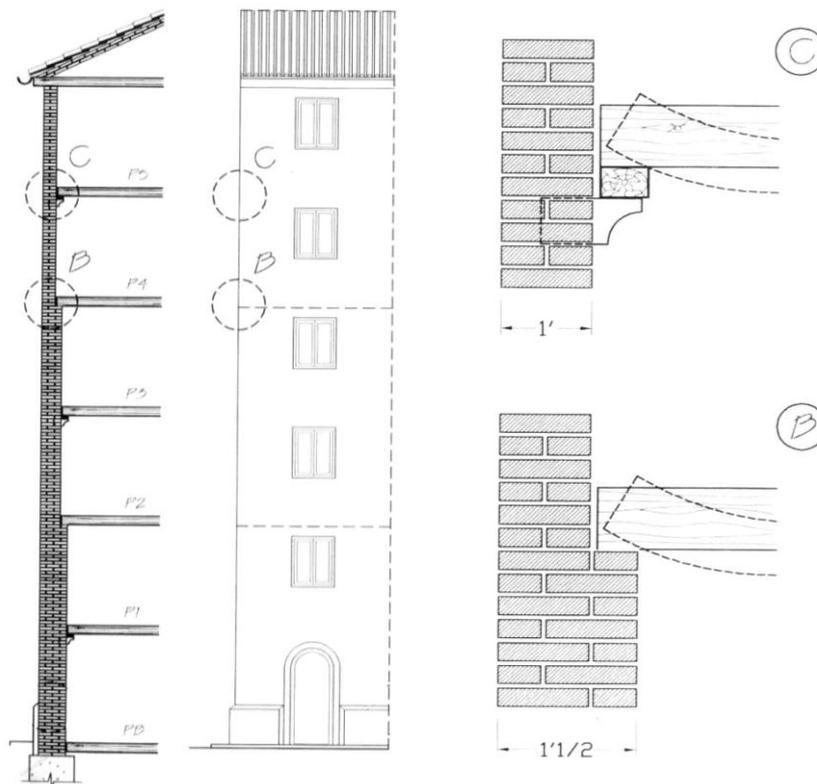


Figura 31. Evolución de mediados del S.XIX. Muro de distintos gruesos y forjado con apoyo simple. Fuente: Serrano Lantarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

Por tanto, se ha tomado como fachada a testear la representativa de 1900.

Base: HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA (Sin aislante/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja)

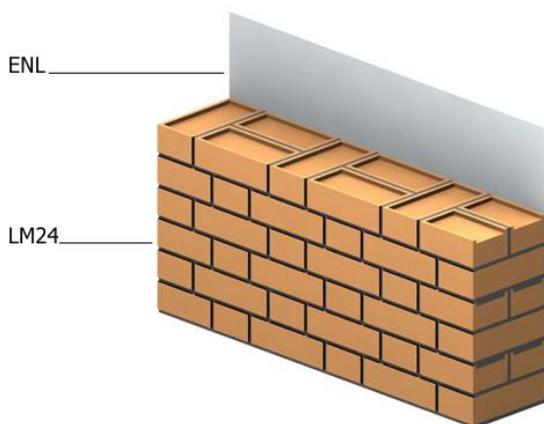


Figura 32. Vista de la sección de la solución constructiva FC01 para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
LM24	Fábrica 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 15. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La fachada del edificio, cualquiera que sea su tipología constructiva, es un elemento constructivo muy expuesto a los agentes externos. Por ese motivo es muy importante un adecuado mantenimiento preventivo de cara a prevenir posibles lesiones cuya reparación posterior supondría un mayor coste.

Existen dos alternativas a la hora de acometer la rehabilitación energética este tipo de fachadas:

- Aislamiento de la fachada implementado por el exterior del inmueble.
- Aislamiento de la fachada implementado por el interior del inmueble.

Las soluciones que aquí se recogen son las más habituales. Esto no significa que no existan otras soluciones o materiales aplicables igualmente válidos.

Rehabilitación por el exterior

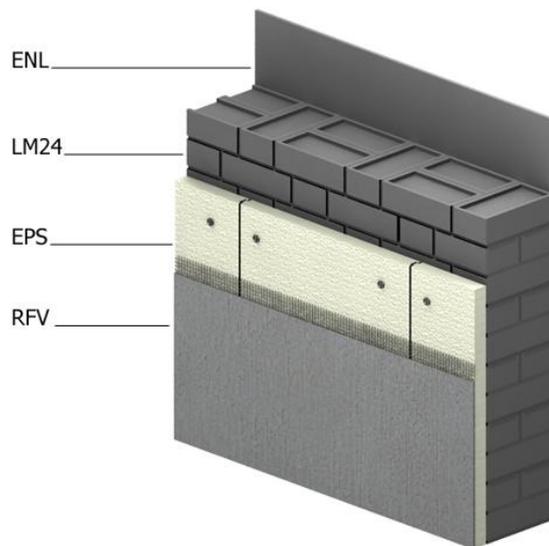


Figura 33 Vista de la sección de la solución constructiva FC01 rehabilitada por el exterior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
RFV	Revoco y adhesivo cementoso armado con malla de fibra de vidrio	5
EPS	Poliestireno expandido	Variable
LM24	Fábrica de 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 16. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la fachada por el exterior presenta las siguientes ventajas:

- Si hay que reparar lesiones en el exterior de la fachada, es la solución más aconsejable.
- Se aprovecha la inercia térmica del soporte resistente.
- No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.
- Se corrigen los puentes térmicos, de modo que se evitan las paredes “frías” y el riesgo de formación de condensaciones superficiales e, incluso, moho.
- Reduce la sollicitación térmica de la estructura y por lo tanto las dilataciones.
- El DB-HS1 considera una barrera de resistencia alta a la filtración un aislante no hidrófilo dispuesto por el exterior de la hoja principal.
- No se reduce la superficie útil del edificio o vivienda.

Protege el cerramiento original del edificio, incrementando su vida útil y por lo tanto la vida útil del edificio.

La intervención de la fachada por el exterior presenta los siguientes inconvenientes:

- En general, la intervención por el exterior exige un mayor coste económico que si se realiza por el interior. No es rentable para edificios de baja altura.
- Implica modificaciones en una serie de detalles: aleros voladizos, ventanas, puertas y lugares donde la envoltura exterior se atravesase, para la adecuación al nuevo espesor de fachada.
- En necesario montar andamios.
- Tiene mucho impacto estético.
- Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos.
- En el caso de edificios con un grado de protección como parte del patrimonio histórico-artístico, será muy difícil o incluso imposible practicar la intervención por el exterior.

Rehabilitación por el interior

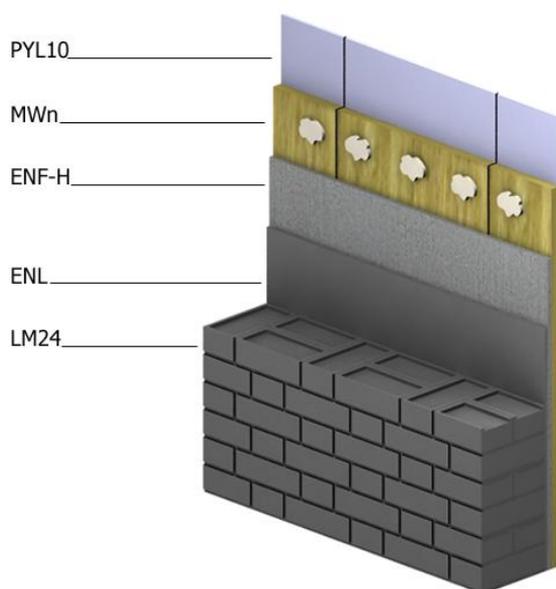


Figura 34 Vista de la sección de la solución constructiva FC01 rehabilitada por el interior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
LM24	Fábrica de 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15
ENF-H	Enfoscado de mortero con aditivos hidrofugantes de 15 mm.	15
MWn	Lana mineral no hidrófila	Variable
PYL10	Placa de yeso laminado	10

Tabla 17 Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la fachada por el interior presenta las siguientes ventajas:

- Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica, siempre que no sea necesaria intervención alguna por el exterior debido a lesiones preexistentes.
- Posibilita la rehabilitación desde el punto de vista estético del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura.
- Permite sanear los muros de fábrica cuando éstos presentan defectos.
- Puede aplicarse a cualquier tipo de soporte.
- Se puede aplicar individualmente a cada vivienda, no es necesario el consentimiento de la comunidad.
- Las soluciones por el interior permiten un mejor mantenimiento.
- No se modifica la apariencia estética exterior.
- No es necesario montar medio auxiliares como andamios.

La intervención de la fachada por el interior presenta los siguientes inconvenientes:

- No es una solución adecuada cuando es necesario efectuar trabajos de impermeabilización o modificación de la fachada del edificio.
- Existe riesgo de condensaciones.
- No se eliminan los puentes térmicos existentes en la fachada original.
- No se aprovecha la inercia térmica del cerramiento.
- Zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos deben volverse a colocar
- Se pierde superficie útil de la vivienda.

6.3.2 Aplicación: Muros doble hoja con distinta posición de aislante

Muro base (fachada cara vista, dos hojas, sin aislante y con cámara no ventilada)

En los años setenta las estructuras porticadas crecen en altura a la vez que aumentan las luces a 4-5 metros. Los paños de fachadas pierden espesor y la hoja exterior se coloca semivolada con medio pie de espesor para aislar térmicamente el forjado. La hoja interior pasa a ser revocada para protegerla de la humedad generada por la disminución de espesor de la hoja exterior.

No era costumbre diseñar juntas de movimiento entre cerramiento y estructura. La hoja exterior se construye semiempotrada en el pórtico, que impide su movimiento pero soporta la acción del viento.

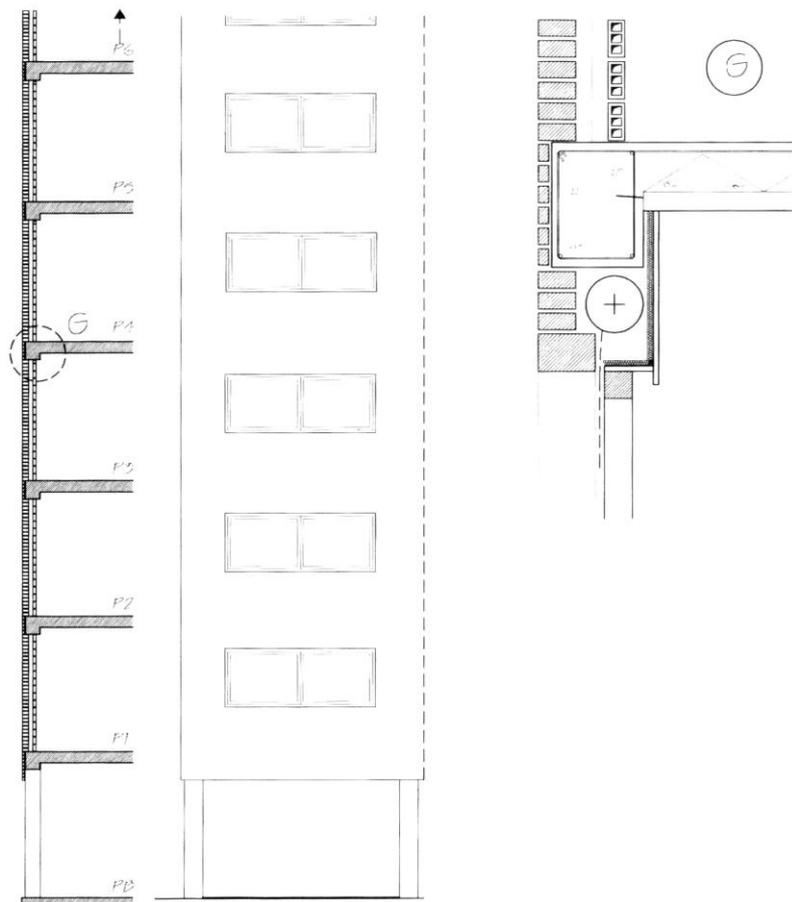


Figura 35 Años 70: Estructura de hormigón. Hoja exterior semivolada de 1/2' pie. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

Por tanto, se ha tomado como fachada a testear la representativa de 1960.

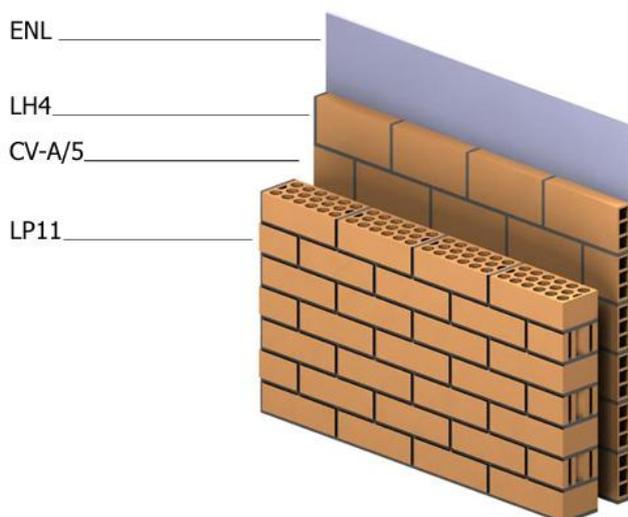


Figura 36. Vista de la sección de la solución constructiva FC02 para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado doble de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 18. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La fachada del edificio, cualquiera que sea su tipología constructiva, es un elemento constructivo muy expuesto a los agentes externos. Por ese motivo es muy importante un adecuado mantenimiento preventivo de cara a prevenir posibles lesiones cuya reparación posterior supondría un mayor coste.

Existen tres alternativas a la hora de acometer la rehabilitación energética de una fachada:

- Aislamiento de la fachada implementado por el exterior del inmueble.
- Aislamiento de la fachada implementado en el interior de la cámara de aire.
- Aislamiento de la fachada implementado por el interior del inmueble.

Las soluciones que aquí se recogen son las más habituales. Esto no significa que no existan otras soluciones o materiales aplicables igualmente válidos.

Rehabilitación aislante por el exterior

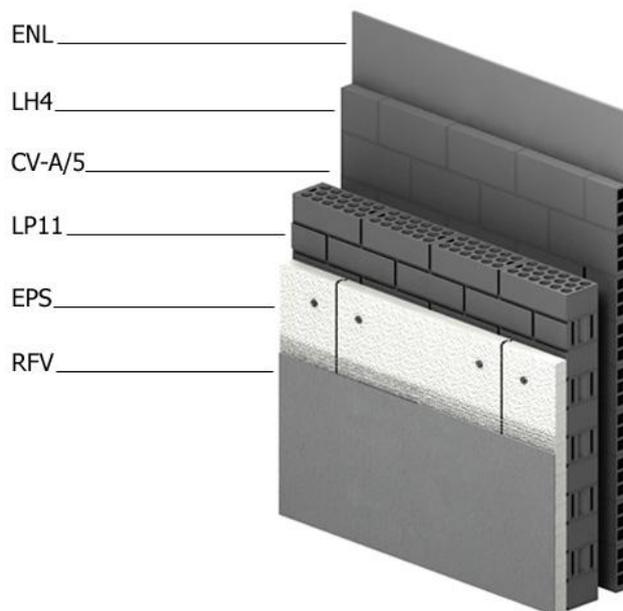


Figura 37. Vista de la sección de la solución constructiva FC02 rehabilitada por el exterior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
RFV	Revoco y adhesivo cementoso armado con malla de fibra de vidrio	5
EPS	Poliestireno expandido	Variable
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 19. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la fachada por el exterior presenta las siguientes ventajas:

- Si hay que reparar lesiones en el exterior de la fachada, es la solución más aconsejable.
- Se aprovecha la inercia térmica del soporte resistente.
- No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.
- Se corrigen los puentes térmicos, de modo que se evitan las paredes “frías” y el riesgo de formación de condensaciones superficiales e, incluso, moho.
- Reduce la sollicitación térmica de la estructura y por lo tanto las dilataciones.
- El DB-HS1 considera una barrera de resistencia alta a la filtración un aislante no hidrófilo dispuesto por el exterior de la hoja principal.
- No se reduce la superficie útil del edificio o vivienda.

Protege el cerramiento original del edificio, incrementando su vida útil y por lo tanto la vida útil del edificio.

La intervención de la fachada por el exterior presenta los siguientes inconvenientes:

- En general, la intervención por el exterior exige un mayor coste económico que si se realiza por el interior. No es rentable para edificios de baja altura.
- Implica modificaciones en una serie de detalles: aleros voladizos, ventanas, puertas y lugares donde la envoltura exterior se atravesase, para la adecuación al nuevo espesor de fachada.
- En necesario montar andamios.
- Tiene mucho impacto estético.
- Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos.
- En el caso de edificios con un grado de protección como parte del patrimonio histórico-artístico, será muy difícil o incluso imposible practicar la intervención por el exterior.

Rehabilitación aislante en cámara

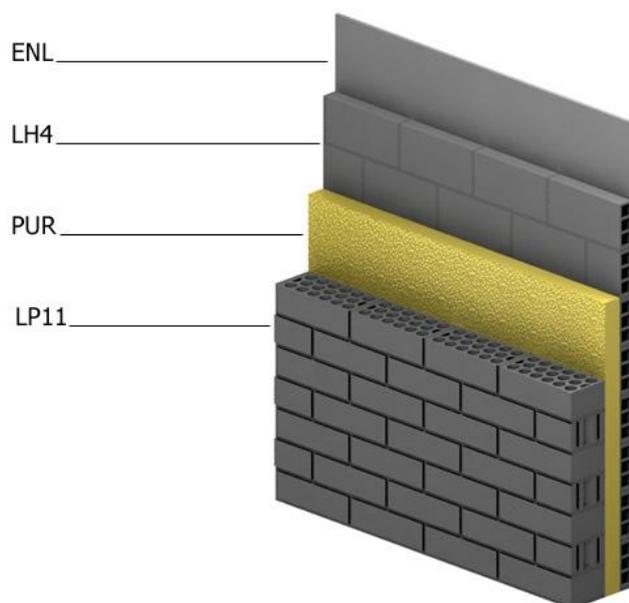


Figura 38. Vista de la sección de la solución constructiva FC02 rehabilitada con aislante en cámara para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
PUR	Espuma rígida de poliuretano	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco doble de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 20. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la fachada en el interior de la cámara de aire presenta las siguientes ventajas:

- No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.
- Ausencia de enfoscado, costes indirectos bajos.
- No se pierde superficie útil de la vivienda.
- Tiene baja repercusión en la apariencia estética del edificio.
- No es necesario montar medio auxiliares como andamios.

La intervención de la fachada en el interior de la cámara de aire presenta los siguientes inconvenientes:

- La presencia de instalaciones dificulta su aplicación.
- Esta técnica es la que requiere más precisión y especialización por parte del aplicador.
- Requiere un control de obra muy intenso para garantizar la continuidad de la cámara.
- El aislante no es accesible para operaciones de inspección y mantenimiento.
- La aplicación de esta solución conlleva la creación de numerosos puentes térmicos.

Rehabilitación aislante por el interior

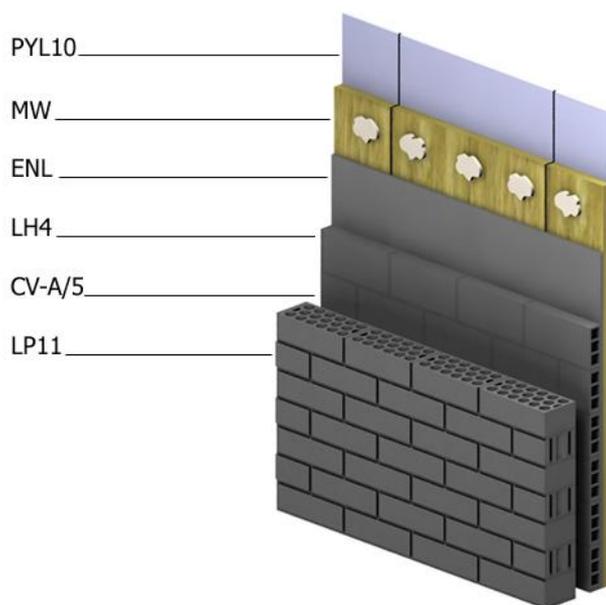


Figura 39. Vista de la sección de la solución constructiva FC02 rehabilitada por el interior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15
MW	Lana mineral	Variable
PYL10	Placa de yeso laminado	10

Tabla 21 Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la fachada por el interior presenta las siguientes ventajas:

- Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica, siempre que no sea necesaria intervención alguna por el exterior debido a lesiones preexistentes.
- Posibilita la rehabilitación desde el punto de vista estético del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura.
- Permite sanear los muros de fábrica cuando éstos presentan defectos.
- Puede aplicarse a cualquier tipo de soporte.
- Se puede aplicar individualmente a cada vivienda, no es necesario el consentimiento de la comunidad.

- Las soluciones por el interior permiten un mejor mantenimiento.
- No se modifica la apariencia estética exterior.
- No es necesario montar medio auxiliares como andamios.

La intervención de la fachada por el interior presenta los siguientes inconvenientes:

- No es una solución adecuada cuando es necesario efectuar trabajos de impermeabilización o modificación de la fachada del edificio.
- Existe riesgo de condensaciones.
- No se eliminan los puentes térmicos existentes en la fachada original.
- No se aprovecha la inercia térmica del cerramiento.
- Zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos deben volverse a colocar
- Se pierde superficie útil de la vivienda.

6.4 Rehabilitación energética: cubiertas

6.4.1 Aplicación: Cubiertas con distinta posición de aislante

La cubierta plana es una de las aportaciones más destacables del Movimiento Moderno, pero no fue hasta el momento en el que los sistemas de impermeabilización evolucionaron, cuando se pudo consolidar como sistema constructivo en la arquitectura residencial de nuestro país.

Cómo se ha comentado para las cubiertas inclinadas, hasta el siglo XIX la estructura soporte de las cubiertas era principalmente de madera. A finales de este mismo siglo la madera comienza a ser sustituida por el hierro. El hormigón armado pese a surgir a mitad siglo XIX, no será hasta principios del siglo XX cuando se introduzca en España. Fue ya en la década de los sesenta, con la expansión económica española cuando debido al aumento considerable en el ritmo de construcción del país, el hormigón armado toma un papel protagonista. En los polígonos residenciales, fruto de esta situación, la cubierta plana responde con mayor facilidad a las necesidades de industrialización. La azotea se extiende a zonas con tradición de cubierta inclinada, especialmente en las ciudades, donde hay una mayor demanda.

En relación a la evolución en el sistema constructivo empleado en cubiertas, las primeras cubiertas planas conocidas se construyeron en la antigua Mesopotamia. Eran cubiertas con vigas de madera, cañizo de caña de palma, tela y tierra compactada. Ésta última capa se protegía con un mortero de cal y barro armado con paja o pelo de palmera. De éstas primeras cubiertas planas permanece el nombre de terraza o terrado. Su principal ventaja era la inercia térmica, y su principal inconveniente es que eran muy pesadas. Siglos más tarde, la tierra se sustituye por tableros multicapa de losa pétreo o rasilla cerámica directamente sobre las vigas. En esta solución, en contraste con la anterior, se disminuye el peso a la vez que se reduce el aislamiento. Con el paso del tiempo, para mejorar el comportamiento de este tipo de cubiertas, se implementa el sistema con una cámara de aire entre la cubierta y el falso techo de la última planta, se recupera de esta forma el aislamiento térmico. El siguiente paso consistió en desplazar la cámara de aire encima del forjado resistente, sujetando el solado sobre tabiquillos palomeros que descansaban en el forjado. La hoja superior consistía generalmente en un tablero de tres roscas de rasilla plana. Esta solución de cubierta fue llamada en un principio “a la madrileña” para pasar más tarde a denominarse “a la catalana”. Hasta los años cuarenta es este tipo de cubierta el que se utilizaba con más frecuencia. Las primeras láminas impermeabilizantes se intentaron colocar sobre el tablero cerámico, pero las grandes variaciones de temperatura deterioraban rápidamente la impermeabilización y provocaba deformaciones diferenciales que no hacían efectiva esta solución.

En los años cuarenta, la aparición de hormigones aligerados, permite introducir un cuerpo aislante que sustituye a las cámaras de aire. La cubierta plana de dos hojas, pasa a ser de una sola hoja multicapa: forjado horizontal, hormigón aislante y de pendiente, membrana impermeabilizante y protección. Las enormes superficies se dividen dando lugar a limahoyas y limatesas. La unión con la solera se empotra en todo su perímetro, por lo que no garantiza la dilatabilidad de la misma haciéndose inevitable la fisuración y por tanto perdiendo la estanquidad. La solución al problema fue la construcción del mimbel a cajón abierto, de esta forma la solera quedó separada del perímetro permitiendo la dilatabilidad.

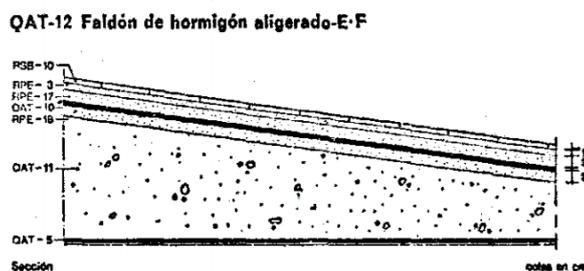


Figura 40. Azotea transitable- esquema. Fuente: ORDEN de 6 de junio de 1973. NORMA TECNOLÓGICA DE LA EDIFICACIÓN NTE-QAT/1973, "CUBIERTAS: AZOTEAS TRANSITABLES". Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

En los años cincuenta, con la generalización de la calefacción, aumenta la presión de vapor en el interior de las viviendas, haciéndose necesaria una barrera contra el vapor entre el forjado y el hormigón de formación de pendientes, para evitar humedades bajo la lámina impermeable. Avances científicos como el diagrama de Glaser permitieron estudiar el orden de las capas que componían la cubierta prediciendo si se iban a producir condensaciones intersticiales. Fue en este momento cuando se pudo comprobar la eficacia de la cubierta invertida: forjado, hormigón de pendiente, membrana impermeable, aislante térmico y protección del aislamiento, generalmente cantos rodados. Pese a que en Estados Unidos este tipo de cubierta plana se comenzó a aplicar en la década de los cincuenta, no será hasta los años setenta cuando se asiente en España coincidiendo con la introducción de patentes de impermeabilización como la Calandrita, el cartón-cuero, o el cemento volcánico.

En la actualidad, debido a la necesidad de protección de las láminas impermeables y con la intención de solventar los problemas derivados de pequeña pero existente pendiente en las cubiertas planas, la solución de pavimento flotante está tomando cierto protagonismo.

En relación a la constitución del forjado de cubierta como elemento resistente, a principios del siglo XX, cuando el envigado era de madera o en mayor frecuencia metálico, el entrevigado estaba constituido por revoltones de ladrillo tomados con yeso o directamente se colocaba un cielo raso de cañizo y yeso sin ningún tipo de aislante intermedio. La evolución del revoltón derivó en el uso de bovedillas por reducir considerablemente la mano de obra necesaria y el peso de los elementos de entrevigado, convirtiéndose en el elemento de entrevigado por excelencia. Este sistema ha ido evolucionando a lo largo de los años persiguiendo disminuir el peso de la estructura y el coste de producción, tendiéndose siempre a la industrialización del proceso. Según los datos obtenidos en las inspecciones realizadas en los últimos veinte años en la Comunidad Valenciana las primeras bovedillas se fabricaban de yeso in situ sustituyendo al revoltón de ladrillo. El yeso fue el material predominante desde su aparición hasta los años sesenta, cuando, debido al mal comportamiento del yeso en ambientes húmedos y por ser un elemento de construcción a pie de obra en un momento que se abogaba por la industrialización, las bovedillas de yeso se sustituyeron por bovedillas mayoritariamente de hormigón y en un porcentaje menor, cerámicas.

Por tanto, para comprobar el método se ha tomado una de las cubiertas representativas del periodo de 1940.

Base: Cubierta plana transitable con solado fijo (Sin aislante/ No ventilada)

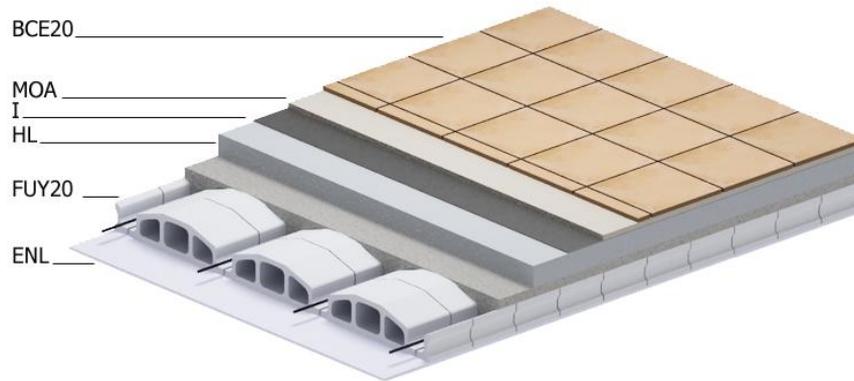


Figura 41. Vista de la sección de la solución constructiva QB01 para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
BCE20	Baldosa cerámica de 20 mm	20
MOA	Mortero de agarre	20
I	Capa de impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entrevigado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 22. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La cubierta del edificio, cualquiera que sea su tipología constructiva, es el elemento constructivo más expuesto a los agentes externos. Por ese motivo es muy importante un adecuado mantenimiento preventivo de cara a prevenir posibles lesiones cuya reparación posterior supondría un mayor coste. Cuando, por motivos de mantenimiento o reparación, se haga necesario intervenir en la cubierta, es importante contemplar la posibilidad de implementar el aislamiento térmico. El coste de la intervención, dependiendo de la tipología edificatoria, se puede recuperar en aproximadamente 5 años.

Existen dos alternativas a la hora de acometer la rehabilitación energética de una cubierta:

- Aislamiento de la cubierta desde el exterior del inmueble.
- Aislamiento de la cubierta desde el interior del inmueble.

Las soluciones que aquí se recogen son las más habituales. Esto no significa que no existan otras soluciones o materiales aplicables igualmente válidos.

Rehabilitación por el exterior

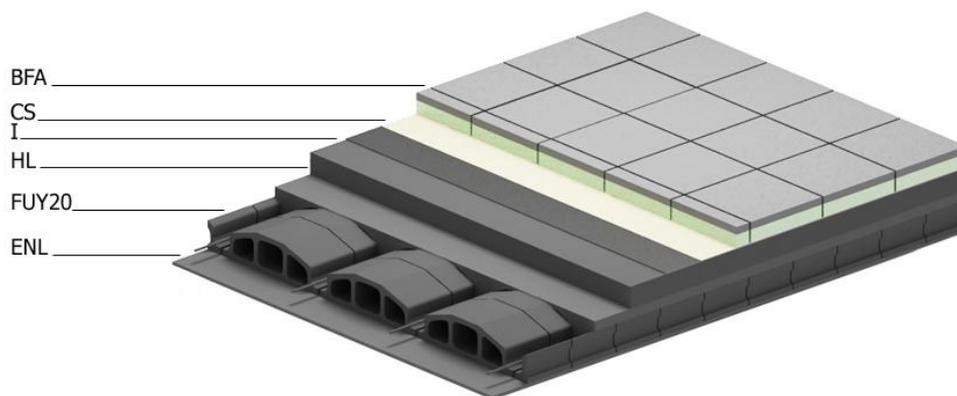


Figura 42. Vista de la sección de la solución constructiva QB01 rehabilitada por el exterior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
BFA	Baldosa filtrante aislante (hormigón + XPS)	35+variable
CS	Capa separadora	1
I	Impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entrevigado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15

Tabla 23. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la cubierta por el exterior presenta las siguientes ventajas:

- Si hay que reparar lesiones en el exterior, es la solución más aconsejable.
- Se aprovecha la inercia térmica del soporte resistente.
- No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.
- No se reduce la altura libre del bajo cubierta.

La intervención de la cubierta por el exterior presenta los siguientes inconvenientes:

- Habrá que tener en cuenta el drenaje y los encuentros con elementos de la cubierta.
- Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos.
- En general, la intervención por el exterior exige un mayor coste económico que si se realiza por el interior.

Rehabilitación por el interior

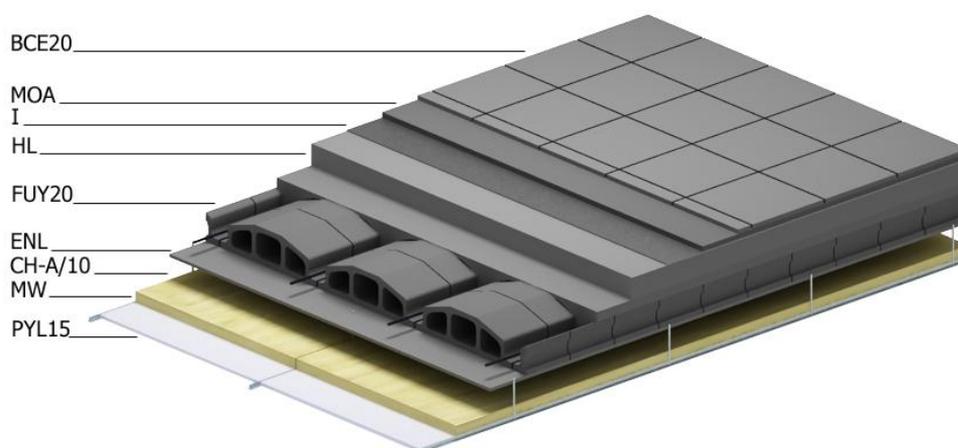


Figura 43. Vista de la sección de la solución constructiva QB01 rehabilitada por el interior para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

LEYENDA		Espesor
BCE20	Baldosa cerámica	20
MOA	Mortero de agarre	20
I	Impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entrevigado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15
CH-A/10	Cámara de aire horizontal de 100 mm Grado de ventilación Caso A	100
MW	Lana mineral	Variable
PYL15	Placa de yeso laminado	15

Tabla 24. Composición por hojas del elemento constructivo. Fuente: Serrano Lanzarote, Ortega Madrigal, & García-Prieto Ruiz, 2011

La intervención de la cubierta por el interior presenta las siguientes ventajas:

- Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica, siempre que no sea necesaria intervención alguna por el exterior debido a lesiones preexistentes.
- Evita el levantamiento de la cubrición.
- Posibilita la rehabilitación desde el punto de vista estético del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura, nuevos sistemas de iluminación y/o climatización.

La intervención de la cubierta por el interior presenta los siguientes inconvenientes:

- No es una solución adecuada cuando es necesario efectuar trabajos de impermeabilización o modificación de la cubierta externa del edificio.
- Existe riesgo de condensaciones.
- Debe disponerse de una altura mínima de aproximadamente 100 mm. Para facilitar el montaje de los sistemas de anclaje y su nivelación.
- Se pierde altura libre de la vivienda.

6.5 Tipos constructivos modelizados

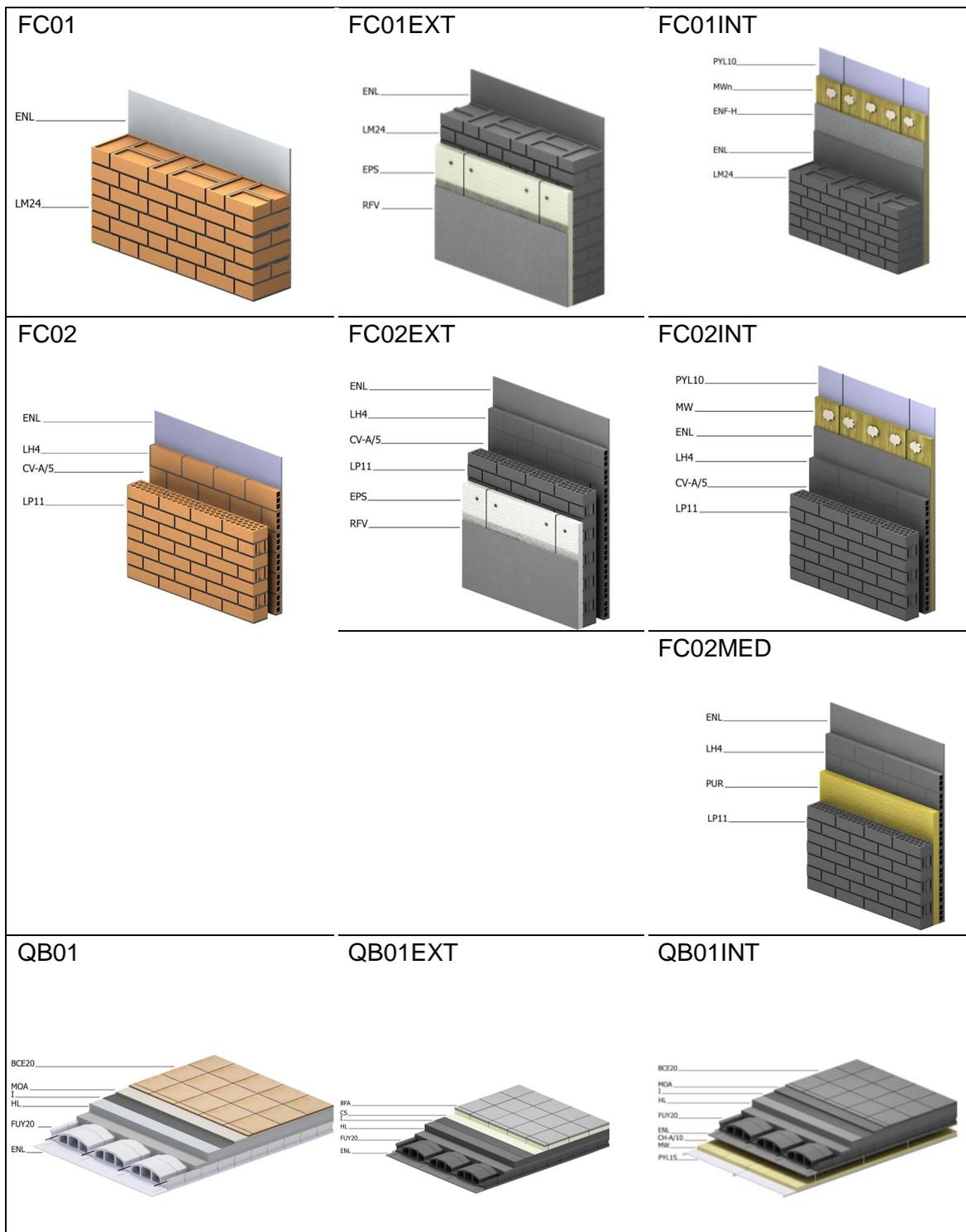


Tabla 25. Vista de la sección de las soluciones constructivas escogidas para el análisis en la etapa de comprobación y verificación del modelo propuesto. Fuente: elaboración propia

6.6 Resultados de la aplicación

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

El paso de tiempo corto se acerca a la temperatura real del cerramiento. El paso de tiempo considerado para el caso lineal ha sido de: 1 hora, 15 minutos y 5 minutos, mientras que para el caso de solución de segundo orden se ha mantenido el paso siempre de 1 hora.

Las hipótesis de cálculo son las siguientes:

- fuente de radiación interna de las luces y la gente que inciden sobre la superficie interna durante 2 horas; $P_{\text{SRC}} = 10 \text{ [Wm}^{-2}] \cdot 1 \text{ [m}^2\text{]}$, después $P_{\text{SRC}} = 0$.
- Todo el resto de las superficies internas se mantienen a una temperatura constante; $T_r = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- La temperatura en el otro lado de la pared es constante; $T_j = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- La temperatura del aire seco es constante; $T_a = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$.
- Radiación coeficiente constante equivalente; $h_r = 5 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$.
- El coeficiente de convección es constante; $h_c = 3 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$

6.6.1 Precisión del método

En el presente apartado se pretende presentar un esquema relativamente sencillo y adecuado para demostrar si los métodos son equivalentes y conducen a resultados similares.

Este estudio consiste en comparar si los resultados obtenidos por el método lineal con intervalo de muestreo de 1 h (el empleado de manera generalizada) para determinar la evolución de la temperatura en muros, basado en método de los factores de respuesta (REF) (Mitalas & Stephenson, 1967) mediante el elemento formador (EF) o sostenedor de la señal muestreada de orden 1, es similar a los obtenidos mediante la aplicación del método de los factores de respuesta mediante un polinomio de segundo orden.

En general, el método propuesto parabólico con un intervalo de 1h se ajusta en todos los casos estudiados con mayor precisión que el método lineal con intervalo de 1 hora, por tanto presenta resultados que se acercan más al método lineal con frecuencia de paso de 5 min.

Este hecho se constata por la diferencia calculada mediante diferencia entre el valor del método y el de referencia (cada 5 min):

FCO1						
Qconducción (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	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	842	808	801	-5	41
43200-46800	709	749	720	713	-4	36
46800-50400	633	669	643	637	-4	32
50400-54000	567	598	575	570	-3	28
54000-57600	508	535	515	510	-2	25
57600-61200	455	480	461	457	-2	23
61200-64800	408	430	414	410	-2	20
64800-68400	366	386	371	368	-2	18
68400-72000	328	346	333	330	-2	16
7200-75600	294	311	299	296	-2	15
75600-79200	264	279	268	265	-1	14
79200-82800	237	250	240	238	-1	12
82800-86400	213	224	216	214	-1	10

Tabla 26. Diferencia de cantidades de calor transferido al aire con respecto al método lineal y frecuencia de muestreo de 5 [min]. Fuente: elaboración propia

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 FCO1 y al calor transferido por conducción, pero puede comprobarse en el resto de soluciones y por tipo de calor transferido (véase anexo de resultados).

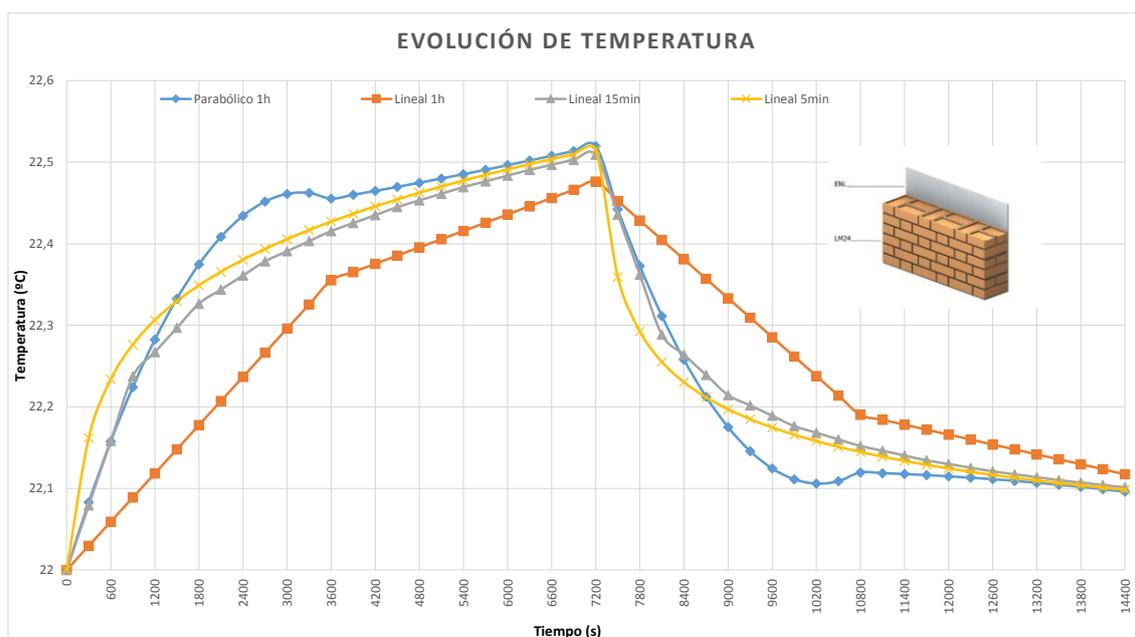


Figura 44. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución FC01. Fuente: elaboración propia

En la Figura 44 se observa la evolución de la temperatura entre los distintos métodos. 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.

Aunque existen diferencias por el tipo de solución y la posición del aislante, las gráficas muestran la misma tendencia en todos los casos a modo de ejemplo se recogen aquí la Figura 45 y la Figura 45 (Véase anexo de resultados).

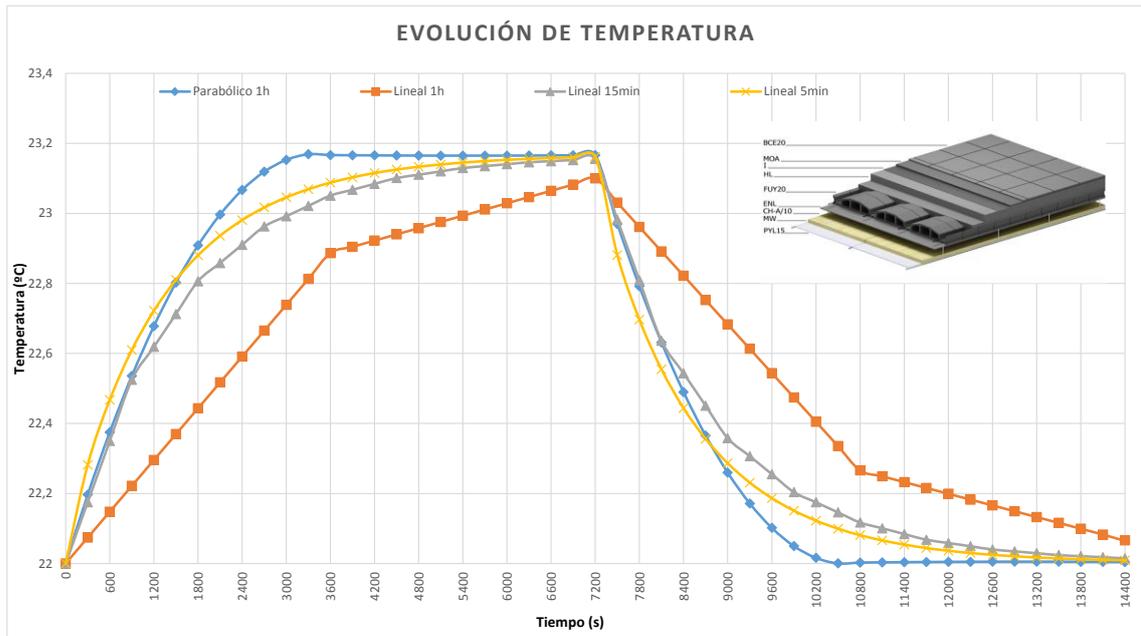


Figura 45. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución QB01. Fuente: elaboración propia

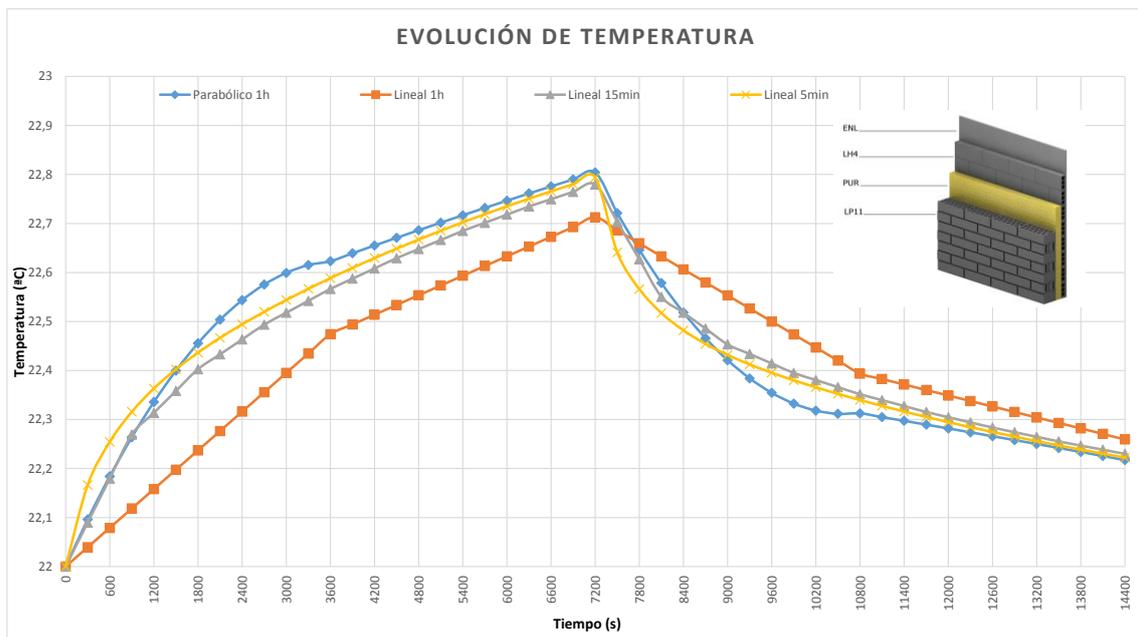


Figura 46. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución QB01. Fuente: elaboración propia

Como muestra la Figura 47, las menores diferencias respecto al método lineal de 5 min las presenta el método propuesto con paso de tiempo de 1h, estas diferencias son más notables para el calor por conducción y radiación.

		Frente a lineal 5 min (valor-referencia)					
		Q cond (J/m2)		Q conv (J/m2)		Q rad (J/m2)	
Intervalo		Qcond Dif. Parab. 1 h	Qcond Dif. lineal 1h	Q conv Dif. Parab. 1 h	QconvDif. lineal 1h	Qrad Dif. Parab. 1 h	Qrad Dif. lineal 1h
1	0-3600	-1285	9387	-67	1532	-113	2552
2	3600-7200	290	-49	-114	645	-191	1075
3	7200-10800	1385	-9879	28	-1160	46	-1933
4	10800-14400	-222	-414	88	-385	146	-641
5	14400-18000	-48	95	19	-173	33	-287
6	18000-21600	-29	120	12	-98	19	-164
7	21600-25200	-18	101	7	-65	12	-107
8	25200-28800	-12	82	5	-46	8	-77
9	28800-32400	-9	67	4	-34	6	-57
10	32400-36000	-7	55	3	-27	4	-46
11	36000-39600	-5	48	2	-23	4	-37
12	39600-43200	-5	41	2	-19	3	-32
13	43200-46800	-4	36	2	-15	3	-26
14	46800-50400	-4	32	1	-14	2	-23
15	50400-54000	-3	28	1	-12	2	-20
16	54000-57600	-2	25	1	-11	2	-18
17	57600-61200	-2	23	0	-10	2	-16
18	61200-64800	-2	20	1	-8	1	-15
19	64800-68400	-2	18	1	-8	1	-13
20	68400-72000	-2	16	1	-7	1	-12
21	7200-75600	-2	15	1	-6	1	-10
22	75600-79200	-1	14	1	-5	1	-9
23	79200-82800	-1	12	0	-5	1	-8
24	82800-86400	-1	10	0	-5	1	-7

Tabla 27. Diferencias de calor por conducción, convección y radiación de los métodos con intervalo de paso de 1h lineal y parabólico frente al lineal de 5 min. Fuente: elaboración propia

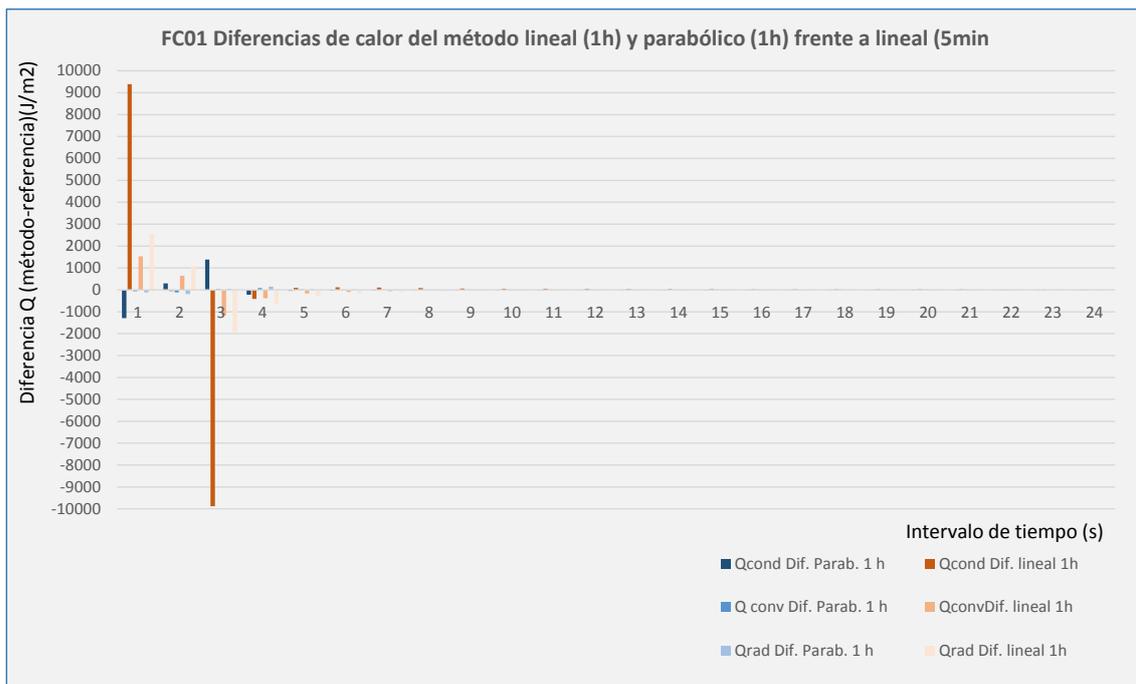


Figura 47. Diferencias de calor por conducción, convección y radiación de los métodos con intervalo de paso de 1h lineal y parabólico frente al lineal de 5 min. Fuente: elaboración propia

La función que propone el método consigue un esquema horario tan preciso (cerca de temperatura y energía transferida) como otros métodos de frecuencia de muestreo más altas. Las diferencias por los distintos tipos de intercambio de calor respecto al método de referencia empiezan a ser imperceptibles para el método parabólico, mientras que para el método lineal de 1h todavía son perceptibles, aunque van descendiendo.

6.6.2 Patrones de precisión

Los resultados de esta comparación, expresados en forma cuantitativa, están en línea, refuerzan y confirman lo expresado en la Sección 1 cuando se habló sobre los objetivos de este trabajo.

En la Tabla 29 se muestran los valores en detalle de la evolución de la temperatura según el modelo parabólico de 1h, lineal de 1h y lineal de 5min para la solución constructiva FC01 y sus variables de mejora energética.

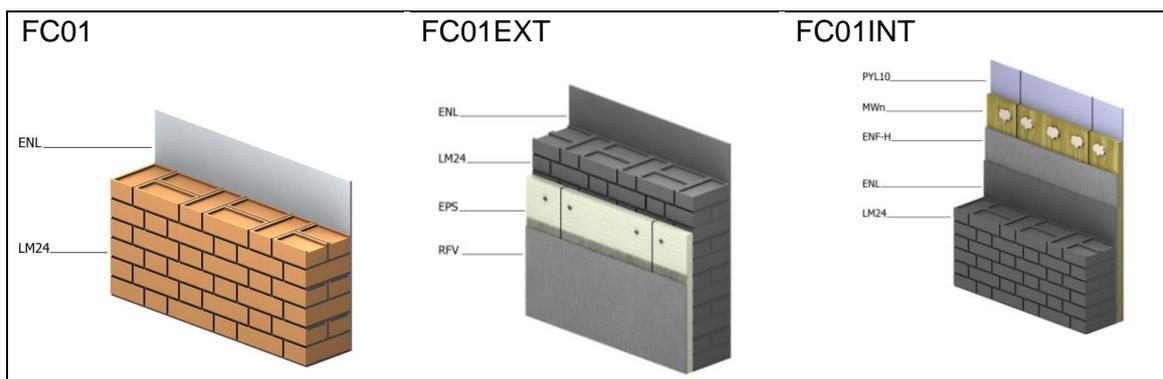


Tabla 28. Vista de la sección de las soluciones constructivas FC01 y sus variables de mejora energética. Fuente: elaboración propia

Nótese que debido a que la excitación es breve y por el interior y que el tiempo de observación de muro es limitado, la evolución de la temperatura es similar para el muro base y el muro con el aislante por el exterior (columnas en amarillo, azul y verde en la Tabla 29 y representadas en la Figura 48 (amarillo, verde y azul claro), que aparecen superpuestas en dicha gráfica debido a que los valores son diferentes por el tercer decimal y no se aprecia en la representación.

En la Figura 48 se representa la evolución de la temperatura tanto para la solución existente FC01 como para sus dos opciones de mejora (por el exterior y por el interior mediante aislante). Para las 3 soluciones se representan los tres modelos analizados: el propuesto parabólico de una hora, el actual lineal de 1 hora y el de referencia lineal de 5 minutos. En aquellas soluciones donde no aparece aislante o este está situado en el exterior, la evolución de la temperatura es más suave, y la diferencia entre los métodos es menor. En cambio en aquellas soluciones en que presentan aislante por el interior (incluso para soluciones másicas como la FC01) la evolución de temperaturas es más brusca y existen más diferencias de ajuste entre los distintos métodos

tiempo (s)	Evolucion de la temperatura								
	FC01			FC01 EXT			FC01 INT		
	P(1h)-FC01	L(1h)-FC01	L(5min)-FC01	P(1h)-FC01EXT	L(1h)-FC01EXT	L(5min)-FC01EXT	P(1h)-FC01INT	L(1h)-FC01INT	L(5min)-FC01INT
0	22	22	22	22	22	22	22	22	22
300	22,0829	22,0296	22,1619	22,0828	22,0296	22,1616	22,1986	22,0747	22,2833
600	22,1576	22,0592	22,2337	22,1575	22,0592	22,2334	22,379	22,1494	22,4704
900	22,2241	22,0888	22,2763	22,2239	22,0887	22,2759	22,5411	22,2241	22,6149
1200	22,2824	22,1184	22,3063	22,2823	22,1183	22,3058	22,685	22,2988	22,7285
1500	22,3326	22,148	22,3297	22,3324	22,1479	22,3292	22,8107	22,3735	22,8184
1800	22,3747	22,1776	22,349	22,3744	22,1775	22,3485	22,9182	22,4482	22,89
2100	22,4085	22,2072	22,3657	22,4083	22,2071	22,3651	23,0074	22,5229	22,947
2400	22,4342	22,2368	22,3804	22,4339	22,2367	22,3798	23,0784	22,5976	22,9926
2700	22,4517	22,2664	22,3937	22,4514	22,2662	22,3931	23,1312	22,6723	23,0291
3000	22,4611	22,296	22,4057	22,4608	22,2958	22,4051	23,1657	22,747	23,0583
3300	22,4623	22,3256	22,4169	22,462	22,3254	22,4162	23,182	22,8217	23,0817
3600	22,4553	22,3552	22,4272	22,455	22,355	22,4265	23,1801	22,8964	23,1005
3900	22,46	22,3853	22,4368	22,4597	22,3851	22,4362	23,1792	22,9143	23,1156
4200	22,4648	22,3754	22,4459	22,4645	22,3751	22,4452	23,1785	22,9321	23,1277
4500	22,4697	22,3855	22,4544	22,4694	22,3852	22,4537	23,1778	22,9499	23,1374
4800	22,4748	22,3956	22,4625	22,4745	22,3953	22,4618	23,1773	22,9677	23,1452
5100	22,48	22,4056	22,4702	22,4797	22,4054	22,4695	23,1768	22,9855	23,1514
5400	22,4853	22,4157	22,4775	22,485	22,4155	22,4768	23,1764	23,0033	23,1565
5700	22,4907	22,4258	22,4845	22,4904	22,4256	22,4837	23,1762	23,0211	23,1605
6000	22,4963	22,4359	22,4912	22,496	22,4356	22,4904	23,176	23,039	23,1638
6300	22,502	22,446	22,4976	22,5017	22,4457	22,4968	23,176	23,0568	23,1665
6600	22,5078	22,4561	22,5038	22,5075	22,4558	22,503	23,176	23,0746	23,1686
6900	22,5137	22,4662	22,5097	22,5134	22,4659	22,5089	23,1762	23,0924	23,1703
7200	22,5198	22,4763	22,5154	22,5194	22,476	22,5146	23,1764	23,1102	23,1717
7500	22,4422	22,4524	22,3591	22,4419	22,4521	22,3583	22,978	23,0398	22,8895
7800	22,3727	22,4286	22,2926	22,3724	22,4283	22,2918	22,7978	22,9694	22,7034
8100	22,3113	22,4047	22,2551	22,3109	22,4044	22,2543	22,6358	22,899	22,5596
8400	22,2578	22,3809	22,2302	22,2575	22,3806	22,2294	22,492	22,8285	22,4466
8700	22,2124	22,3571	22,2117	22,2121	22,3567	22,2109	22,3665	22,7581	22,3572
9000	22,1751	22,3332	22,1971	22,1747	22,3329	22,1962	22,2591	22,6877	22,286
9300	22,1457	22,3094	22,185	22,1454	22,3091	22,1841	22,17	22,6173	22,2293
9600	22,1244	22,2855	22,1747	22,1241	22,2852	22,1739	22,0991	22,5469	22,184
9900	22,1112	22,2617	22,1658	22,1108	22,2614	22,165	22,0464	22,4764	22,1478
10200	22,1059	22,2379	22,158	22,1056	22,2375	22,1571	22,012	22,406	22,1188
10500	22,1088	22,214	22,151	22,1084	22,2137	22,1501	21,9957	22,3356	22,0955
10800	22,1196	22,1902	22,1447	22,1192	22,1898	22,1438	21,9977	22,2652	22,0769
11100	22,1187	22,1841	22,139	22,1183	22,1838	22,1381	21,9986	22,2484	22,062
11400	22,1176	22,1781	22,1337	22,1172	22,1777	22,1329	21,9994	22,2317	22,05
11700	22,1163	22,172	22,129	22,1159	22,1717	22,1281	22,0002	22,2149	22,0404
12000	22,1148	22,166	22,1245	22,1144	22,1656	22,1236	22,0008	22,1982	22,0327
12300	22,1131	22,1599	22,1204	22,1127	22,1595	22,1195	22,0013	22,1814	22,0265
12600	22,1113	22,1538	22,1166	22,1109	22,1535	22,1157	22,0017	22,1646	22,0215
12900	22,1092	22,1478	22,1131	22,1088	22,1474	22,1122	22,002	22,1479	22,0175
13200	22,1069	22,1417	22,1097	22,1066	22,1414	22,1088	22,0022	22,1311	22,0143
13500	22,1045	22,1357	22,1066	22,1041	22,1353	22,1057	22,0023	22,1144	22,0117
13800	22,1019	22,1296	22,1037	22,1015	22,1292	22,1027	22,0023	22,0976	22,0096
14100	22,099	22,1236	22,1009	22,0986	22,1232	22,1	22,0021	22,0808	22,008
14400	22,096	22,1175	22,0983	22,0956	22,1171	22,0973	22,0019	22,0641	22,0066

(...)

Tabla 29. Comparativa de evolución de la temperatura FC01 FCO1 EXT F01 INT. Fuente: elaboración propia

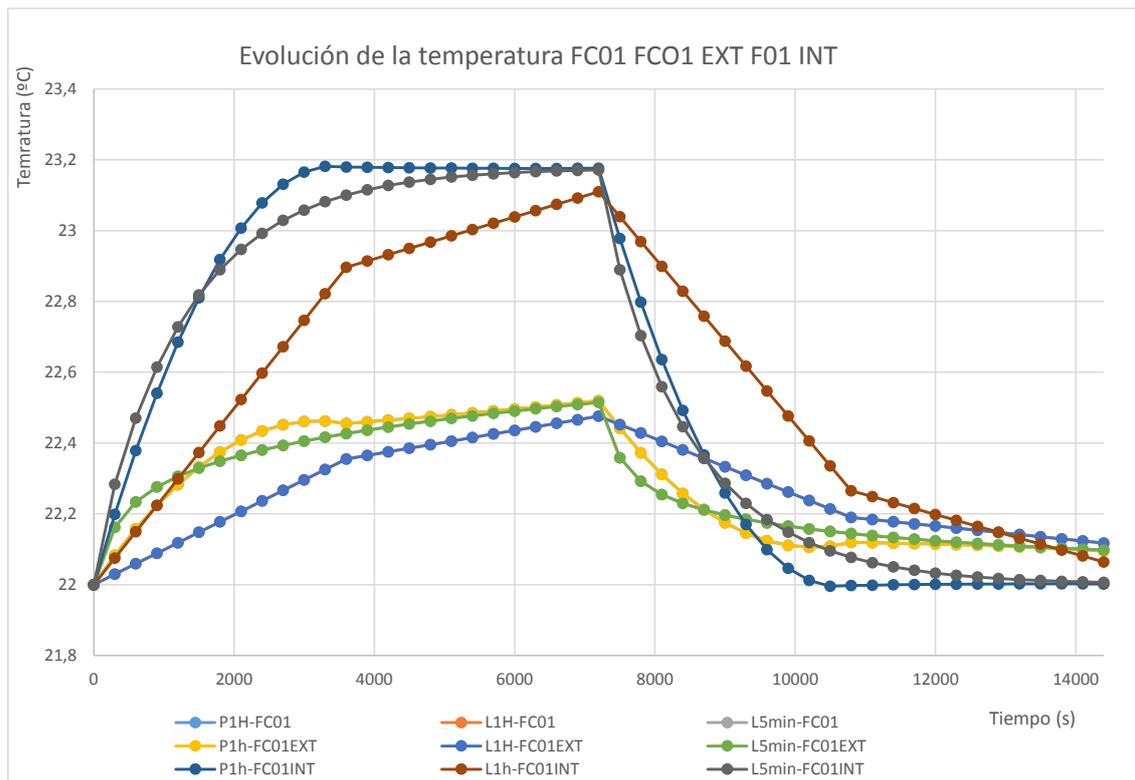


Figura 48. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución FC01 y sus variaciones. Fuente: elaboración propia

En el caso FC01 y FCO1EXT, que son soluciones compactas y pesadas, la evolución de la temperatura refleja el fenómeno de que se calientan lentamente (pendiente de aumento de temperatura más suave) y mantienen durante más tiempo el calor (pendiente de pérdida de temperatura más suave).

En el caso de la solución constructiva FC01 INT, al colocar el aislamiento térmico en la cara interior del muro, se actúa con una estrategia conservativa respecto a la energía aportada por una fuente adicional interior. El aislamiento térmico colocado en la cara interior permite que la superficie interior alcance pronto una temperatura similar a la del ambiente interior, pero al mismo tiempo se pierde con mayor rapidez la temperatura alcanzada.

En la Tabla 31 se muestran los valores en detalle de la evolución de la temperatura según el modelo parabólico de 1h, lineal de 1h y lineal de 5min para la solución constructiva FC02 y sus variables de mejora energética.

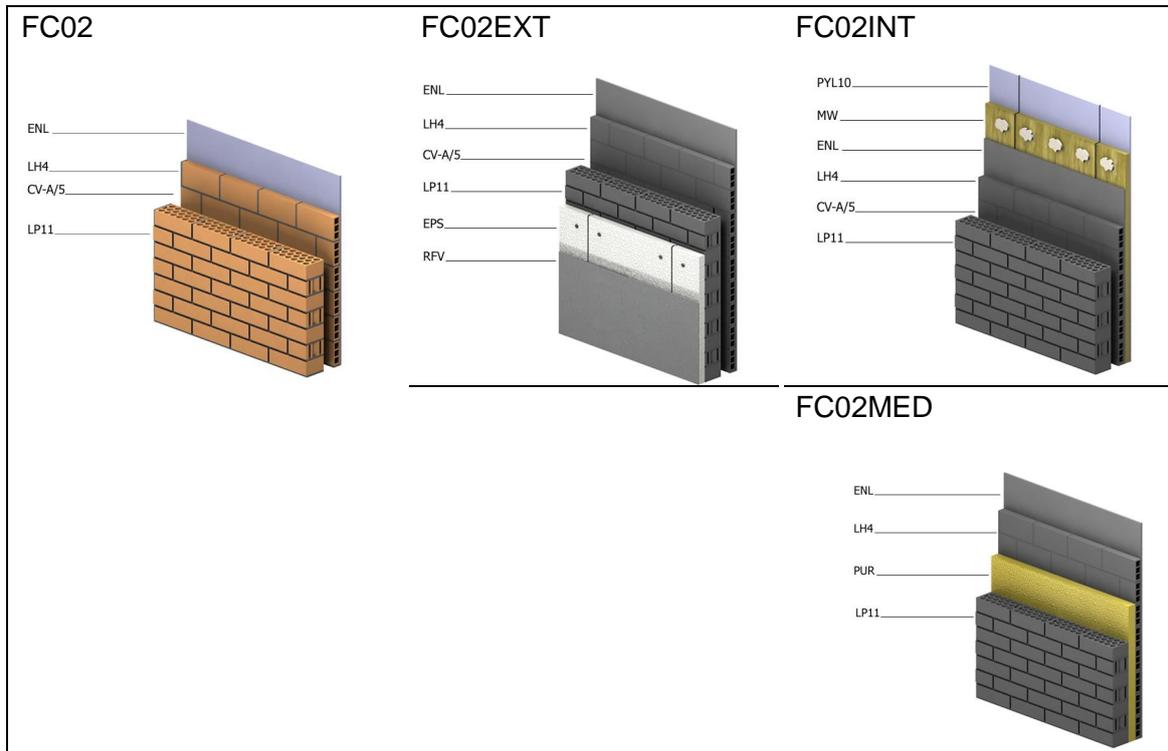


Tabla 30. Vista de la sección de las soluciones constructivas FC02 y sus variables de mejora energética. Fuente: elaboración propia

Nótese que debido a que la excitación es breve y por el interior y que el tiempo de observación de muro es limitado, la evolución de la temperatura es similar para el muro base y el muro con el aislante por el exterior así como para los primeros intervalos de tiempo para la solución de aislante intermedio (columnas azul y verde), valores reflejados y resaltados en la Tabla 31 y representadas en la Figura 49 , que aparecen superpuestas en algunas partes.

En la Figura 49 se representa la evolución de la temperatura tanto para la solución existente FC02 como para sus tres opciones de mejora (por el exterior, por el interior y en cámara mediante aislante). Para las 4 soluciones se representan los tres modelos analizados: el propuesto parabólico de una hora, el actual lineal de 1 hora y el de referencia lineal de 5 minutos. En aquellas soluciones donde no aparece aislante o este está situado en el exterior o intermedio, la evolución de la temperatura es más suave, y la diferencia entre los métodos es menor. En cambio en aquellas soluciones en que presentan aislante por el interior la evolución de temperaturas es más brusca y existen más diferencias de ajuste entre los distintos métodos

tiempo (s)	Evolución de la temperatura											
	FC02			FC02 EXT			FC02 INT			FC02 MED		
	P(1h)-FC02	L(1h)-FC02	L(5min)-FC02	P(1h)-FC02EXT	L(1h)-FC02EXT	L(5min)-FC02EXT	P(1h)-FC02INT	L(1h)-FC02INT	L(5min)-FC02INT	P(1h)-FC02MED	L(1h)-FC02MED	L(5min)-FC02MED
0	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
300	22,0965	22,0392	22,1665	22,0965	22,0392	22,1663	22,1986	22,0747	22,2833	22,096	22,0395	22,1665
600	22,1847	22,0783	22,2544	22,1847	22,0783	22,2542	22,379	22,1494	22,4704	22,1839	22,079	22,2544
900	22,2648	22,1175	22,3157	22,2648	22,1175	22,3154	22,5412	22,2241	22,6149	22,2639	22,1185	22,3157
1200	22,3367	22,1566	22,3633	22,3367	22,1566	22,363	22,6851	22,2988	22,7285	22,3358	22,1581	22,3633
1500	22,4004	22,1958	22,4026	22,4004	22,1958	22,4022	22,8108	22,3735	22,8185	22,3998	22,1976	22,4026
1800	22,456	22,2349	22,4363	22,456	22,2349	22,4359	22,9182	22,4482	22,89	22,4557	22,2371	22,4365
2100	22,5033	22,2741	22,4661	22,5033	22,2741	22,4657	23,0075	22,523	22,9471	22,5036	22,2766	22,4667
2400	22,5425	22,3133	22,4931	22,5425	22,3133	22,4926	23,0785	22,5977	22,9927	22,5435	22,3161	22,4943
2700	22,5735	22,3524	22,5178	22,5735	22,3524	22,5173	23,1312	22,6724	23,0291	22,5755	22,3556	22,5198
3000	22,5963	22,3916	22,5407	22,5963	22,3916	22,5402	23,1658	22,7471	23,0584	22,5993	22,3952	22,5439
3300	22,6109	22,4307	22,5621	22,6109	22,4307	22,5616	23,1821	22,8218	23,0818	22,6152	22,4347	22,5667
3600	22,6174	22,4699	22,5821	22,6174	22,4699	22,5816	23,1802	22,8965	23,1006	22,6231	22,4742	22,5885
3900	22,6311	22,4874	22,601	22,6311	22,4874	22,6004	23,1793	22,9143	23,1156	22,6392	22,4941	22,6094
4200	22,6446	22,505	22,6188	22,6446	22,505	22,6182	23,1786	22,9322	23,1277	22,6551	22,5139	22,6294
4500	22,6577	22,5225	22,6355	22,6577	22,5225	22,635	23,1779	22,95	23,1375	22,6708	22,5338	22,6487
4800	22,6705	22,54	22,6514	22,6705	22,54	22,6508	23,1774	22,9678	23,1453	22,6863	22,5537	22,6672
5100	22,683	22,5576	22,6664	22,683	22,5576	22,6658	23,1769	22,9856	23,1516	22,7017	22,5735	22,6851
5400	22,6951	22,5751	22,6807	22,6951	22,5751	22,68	23,1766	23,0035	23,1566	22,7168	22,5934	22,7024
5700	22,707	22,5927	22,6941	22,707	22,5927	22,6935	23,1764	23,0213	23,1607	22,7318	22,6133	22,719
6000	22,7185	22,6102	22,7069	22,7185	22,6102	22,7063	23,1762	23,0391	23,164	22,7466	22,6331	22,7351
6300	22,7297	22,6277	22,7191	22,7297	22,6277	22,7184	23,1762	23,057	23,1667	22,7613	22,653	22,7506
6600	22,7405	22,6453	22,7306	22,7405	22,6453	22,7299	23,1763	23,0748	23,1688	22,7757	22,6729	22,7656
6900	22,7511	22,6628	22,7415	22,7511	22,6628	22,7409	23,1765	23,0926	23,1706	22,79	22,6927	22,7801
7200	22,7613	22,6804	22,7519	22,7613	22,6804	22,7513	23,1768	23,1105	23,172	22,8041	22,7126	22,794
7500	22,6741	22,651	22,5954	22,6741	22,651	22,5947	22,9784	23,0401	22,8899	22,7212	22,686	22,641
7800	22,5947	22,6216	22,5168	22,5947	22,6216	22,5161	22,7982	22,9697	22,7037	22,646	22,6595	22,5661
8100	22,5232	22,5922	22,4645	22,5232	22,5922	22,4638	22,6362	22,8993	22,56	22,5783	22,6329	22,5173
8400	22,4595	22,5628	22,4254	22,4595	22,5628	22,4247	22,4925	22,8289	22,4471	22,5183	22,6063	22,4819
8700	22,4036	22,5334	22,3943	22,4036	22,5335	22,3936	22,367	22,7585	22,3577	22,4659	22,5798	22,4543
9000	22,3556	22,504	22,3683	22,3556	22,5041	22,3676	22,2597	22,6881	22,2866	22,4211	22,5532	22,4317
9300	22,3154	22,4746	22,3459	22,3155	22,4747	22,3452	22,1706	22,6177	22,2299	22,384	22,5266	22,4124
9600	22,2831	22,4452	22,3259	22,2832	22,4453	22,3253	22,0998	22,5474	22,1847	22,3544	22,5	22,3954
9900	22,2586	22,4158	22,3079	22,2587	22,4159	22,3073	22,0471	22,477	22,1485	22,3325	22,4735	22,38
10200	22,242	22,3864	22,2914	22,2421	22,3866	22,2908	22,0127	22,4066	22,1195	22,3182	22,4469	22,3658
10500	22,2332	22,357	22,2762	22,2333	22,3572	22,2755	21,9965	22,3362	22,0963	22,3116	22,4203	22,3524
10800	22,2322	22,3277	22,262	22,2324	22,3278	22,2614	21,9985	22,2658	22,0777	22,3125	22,3938	22,3398
11100	22,2236	22,3159	22,2487	22,2239	22,3161	22,2482	21,9995	22,2491	22,0628	22,3049	22,3826	22,3278
11400	22,2152	22,3041	22,2363	22,2155	22,3044	22,2358	22,0004	22,2323	22,0509	22,2973	22,3714	22,3163
11700	22,2069	22,2923	22,2246	22,2073	22,2927	22,2241	22,0011	22,2156	22,0413	22,2896	22,3602	22,3053
12000	22,1988	22,2806	22,2136	22,1992	22,281	22,2132	22,0017	22,1989	22,0336	22,2818	22,349	22,2947
12300	22,1908	22,2688	22,2033	22,1913	22,2693	22,2029	22,0023	22,1822	22,0275	22,2739	22,3378	22,2845
12600	22,183	22,257	22,1935	22,1835	22,2576	22,1932	22,0027	22,1654	22,0225	22,266	22,3266	22,2747
12900	22,1753	22,2453	22,1843	22,176	22,2458	22,1841	22,003	22,1487	22,0185	22,2581	22,3154	22,2652
13200	22,1678	22,2335	22,1756	22,1685	22,2341	22,1755	22,0033	22,132	22,0154	22,2501	22,3042	22,256
13500	22,1605	22,2217	22,1674	22,1613	22,2224	22,1674	22,0034	22,1152	22,0128	22,242	22,2931	22,2472
13800	22,1532	22,21	22,1597	22,1541	22,2107	22,1598	22,0034	22,0985	22,0107	22,2338	22,2819	22,2387
14100	22,1461	22,1982	22,1523	22,1472	22,199	22,1526	22,0033	22,0818	22,0091	22,2256	22,2707	22,2305
14400	22,1392	22,1864	22,1454	22,1404	22,1873	22,1458	22,0031	22,0651	22,0077	22,2173	22,2595	22,2225

Tabla 31. Comparativa de evolución de la temperatura FC02 FC02 EXT F02 INT FC02INT. Fuente: elaboración propia

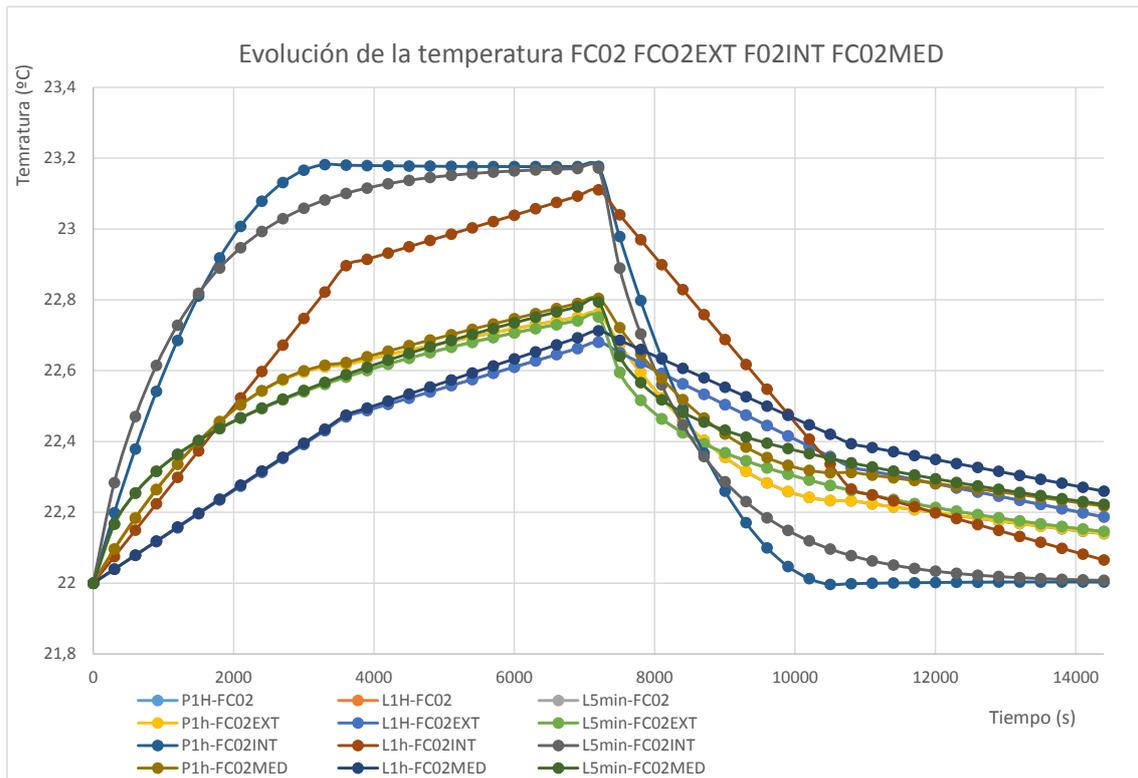


Figura 49. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución FC02 y sus variaciones. Fuente: elaboración propia

En el caso FC02 y FC012EXT y FC02INT la evolución de la temperatura refleja el fenómeno de que se calientan lentamente (pendiente de aumento de temperatura más suave) y mantienen durante más tiempo el calor (pendiente de pérdida de temperatura más suave) pero con evoluciones sustancialmente distintas respecto a la FC02INT.

En el caso de la solución constructiva FC01 INT, al colocar el aislamiento térmico en la cara interior del muro, se actúa con una estrategia conservativa respecto a la energía aportada por una fuente adicional interior. El aislamiento térmico colocado en la cara interior permite que la superficie interior alcance pronto una temperatura similar a la del ambiente interior, pero al mismo tiempo se pierde con mayor rapidez la temperatura alcanzada.

En la Tabla 31 se muestran los valores en detalle de la evolución de la temperatura según el modelo parabólico de 1h, lineal de 1h y lineal de 5min para la solución constructiva FC02 y sus variables de mejora energética.

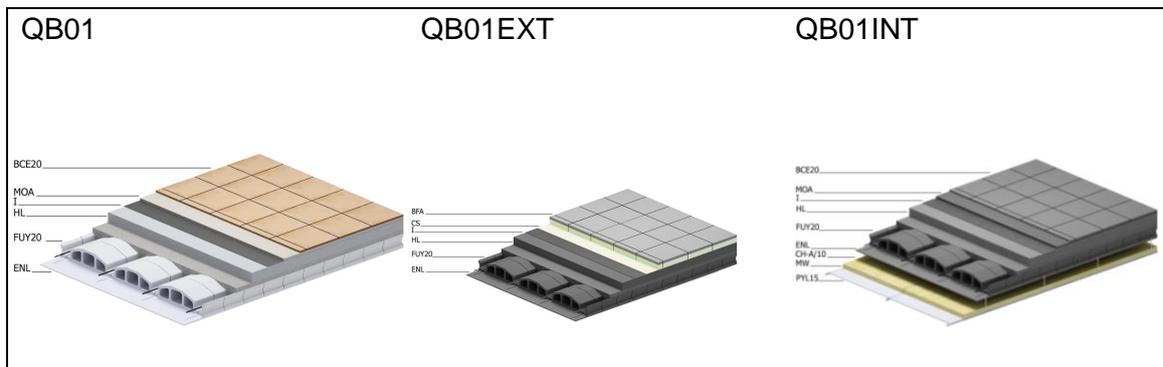


Tabla 32. Vista de la sección de las soluciones constructivas QB1 y sus variantes de mejora energética. Fuente: elaboración propia

Nótese que debido a que la excitación es breve y por el interior y que el tiempo de observación de muro es limitado, la evolución de la temperatura es similar para la cubierta base y la cubierta con el aislante por el exterior (columnas en amarillo, azul y verde en la Tabla 35 y representadas en la Figura 50 (amarillo, verde y azul claro), que aparecen superpuestas en dicha gráfica debido a que los valores son diferentes por el tercer decimal y no se aprecia en la representación.

En la Figura 51 se representa la evolución de la temperatura tanto para la solución existente QC01 como para sus dos opciones de mejora (por el exterior y por el interior mediante aislante). Para las 3 soluciones se representan los tres modelos analizados: el propuesto parabólico de una hora, el actual lineal de 1 hora y el de referencia lineal de 5 minutos. En aquellas soluciones donde no aparece aislante o este está situado en el exterior, la evolución de la temperatura es más suave, y la diferencia entre los métodos es menor. En cambio en aquellas soluciones en que presentan aislante por el interior la evolución de temperaturas es más brusca y existen más diferencias de ajuste entre los distintos métodos

tiempo (s)	Evolución de la temperatura								
	QB01			QB01 EXT			QB01 INT		
	P(1h)-QB01	L(1h)-QB01	L(5min)-QB01	P(1h)-QB01EXT	L(1h)-QB01EXT	L(5min)-QB01EXT	P(1h)-QB01INT	L(1h)-QB01INT	L(5min)-QB01INT
0	22	22	22	22	22,0000	22	22	22	22
300	22,0885	22,033	22,1637	22,0885	22,0330	22,1637	22,1966	22,0739	22,282
600	22,1687	22,066	22,2421	22,1686	22,0660	22,2421	22,3751	22,1478	22,4674
900	22,2406	22,099	22,2922	22,2405	22,0990	22,2922	22,5356	22,2217	22,6101
1200	22,3042	22,132	22,3291	22,3041	22,1320	22,3291	22,678	22,2956	22,7219
1500	22,3595	22,1651	22,3586	22,3594	22,1650	22,3585	22,8023	22,3695	22,8102
1800	22,4065	22,1981	22,3832	22,4063	22,1980	22,3832	22,9086	22,4433	22,8803
2100	22,4452	22,2311	22,4045	22,445	22,2310	22,4045	22,9968	22,5172	22,9363
2400	22,4756	22,2641	22,4233	22,4754	22,2640	22,4232	23,0669	22,5911	22,981
2700	22,4977	22,2971	22,4402	22,4975	22,2970	22,4401	23,119	22,665	23,0169
3000	22,5115	22,3301	22,4555	22,5113	22,3300	22,4554	23,1529	22,7389	23,0458
3300	22,517	22,3631	22,4695	22,5167	22,3630	22,4694	23,1689	22,8128	23,0691
3600	22,5141	22,3961	22,4824	22,5139	22,3960	22,4823	23,1667	22,8867	23,0879
3900	22,5208	22,4083	22,4944	22,5206	22,4081	22,4943	23,1662	22,9045	23,1103
4200	22,5276	22,4204	22,5056	22,5273	22,4203	22,5055	23,1658	22,9223	23,1153
4500	22,5343	22,4326	22,5162	22,5341	22,4324	22,5161	23,1654	22,9401	23,1252
4800	22,541	22,4448	22,5261	22,5408	22,4446	22,526	23,1652	22,9579	23,1333
5100	22,5478	22,4569	22,5355	22,5476	22,4567	22,5354	23,165	22,9757	23,1398
5400	22,5546	22,4691	22,5444	22,5543	22,4689	22,5443	23,165	22,9934	23,1451
5700	22,5614	22,4812	22,5529	22,5611	22,4810	22,5528	23,165	23,0112	23,1495
6000	22,5682	22,4934	22,5609	22,5679	22,4932	22,5608	23,1651	23,029	23,153
6300	22,575	22,5056	22,5686	22,5748	22,5054	22,5685	23,1653	23,0468	23,1559
6600	22,5818	22,5177	22,576	22,5816	22,5175	22,5759	23,1657	23,0646	23,1582
6900	22,5887	22,5299	22,5831	22,5884	22,5297	22,5829	23,1661	23,0824	23,1602
7200	22,5955	22,542	22,5898	22,5953	22,5418	22,5897	23,1666	23,1002	23,1617
7500	22,5132	22,5158	22,4326	22,513	22,5156	22,4325	22,9703	23,0307	22,881
7800	22,439	22,4896	22,3605	22,4388	22,4894	22,3604	22,792	22,9611	22,6966
8100	22,373	22,4634	22,3164	22,3727	22,4632	22,3163	22,6318	22,8916	22,5548
8400	22,3151	22,4372	22,2853	22,3148	22,4370	22,2852	22,4897	22,8221	22,4437
8700	22,2653	22,411	22,2615	22,265	22,4108	22,2614	22,3656	22,7525	22,356
9000	22,2237	22,3848	22,2423	22,2234	22,3846	22,2422	22,2596	22,683	22,2864
9300	22,1902	22,3586	22,2263	22,1899	22,3584	22,2262	22,1716	22,6135	22,231
9600	22,1648	22,3324	22,2127	22,1645	22,3322	22,2126	22,1017	22,5439	22,1866
9900	22,1476	22,3062	22,2008	22,1473	22,3060	22,2007	22,0498	22,4744	22,151
10200	22,1385	22,28	22,1903	22,1382	22,2798	22,1902	22,016	22,4049	22,1224
10500	22,1375	22,2538	22,181	22,1373	22,2536	22,1809	22,0002	22,3353	22,0994
10800	22,1447	22,2276	22,1726	22,1444	22,2274	22,1725	22,0025	22,2658	22,0809
11100	22,1423	22,22	22,165	22,142	22,2198	22,1649	22,0032	22,2491	22,066
11400	22,1397	22,2125	22,1581	22,1394	22,2122	22,158	22,0038	22,2325	22,0539
11700	22,137	22,2049	22,1518	22,1367	22,2046	22,1516	22,0042	22,2158	22,0441
12000	22,1343	22,1973	22,1459	22,134	22,1970	22,1458	22,0046	22,1992	22,0363
12300	22,1314	22,1897	22,1405	22,1311	22,1895	22,1404	22,0049	22,1825	22,0299
12600	22,1284	22,1822	22,1355	22,1282	22,1819	22,1354	22,0051	22,1659	22,0247
12900	22,1254	22,1746	22,1309	22,1251	22,1743	22,1307	22,0052	22,1493	22,0206
13200	22,1222	22,167	22,1265	22,1219	22,1667	22,1264	22,0052	22,1326	22,0172
13500	22,1189	22,1594	22,1224	22,1187	22,1592	22,1223	22,0051	22,116	22,0145
13800	22,1156	22,1519	22,1186	22,1153	22,1516	22,1184	22,0049	22,0993	22,0122
14100	22,1121	22,1443	22,1149	22,1118	22,1440	22,1148	22,0046	22,0827	22,0104
14400	22,1085	22,1367	22,1115	22,1082	22,1364	22,1114	22,0043	22,066	22,009

Tabla 33. Comparativa de evolución de la temperatura QB01 QB01EXT QB01. Fuente: elaboración propia

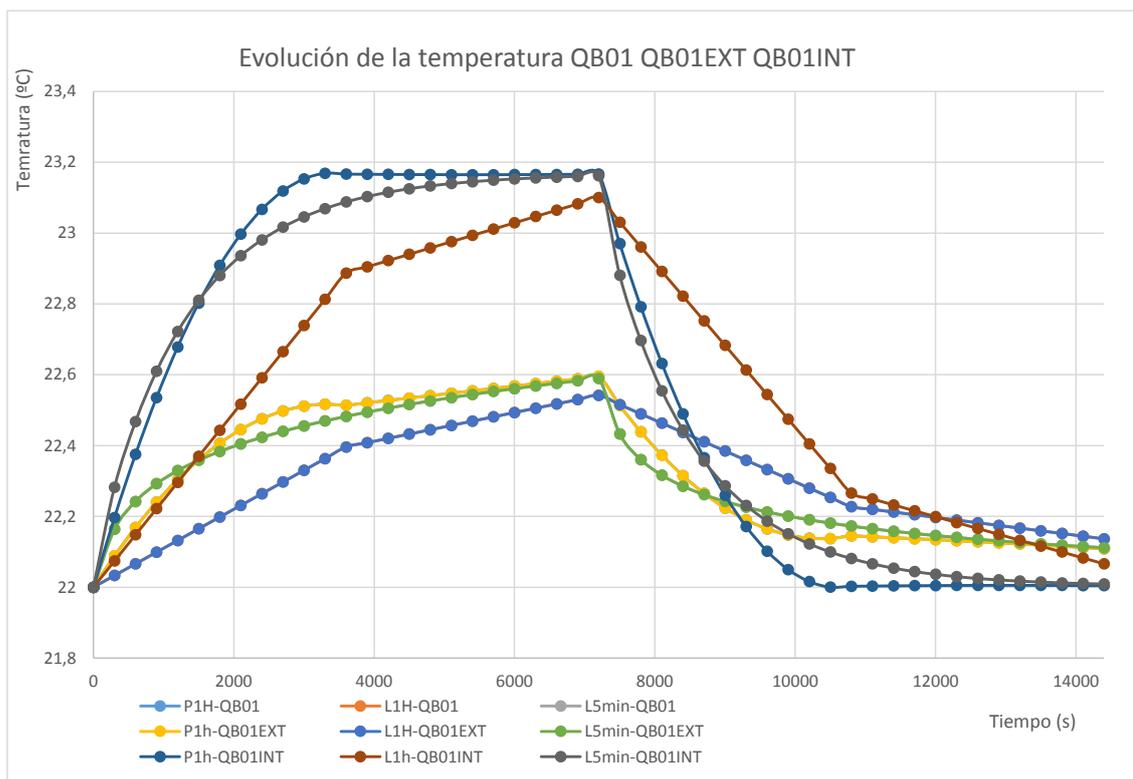


Figura 50. Evolución de la temperatura entre los distintos métodos de la solución QB01 y sus variaciones. Fuente: elaboración propia

En el caso QC01 y QC01EXT, que son soluciones compactas y pesadas, la evolución de la temperatura refleja el fenómeno de que se calientan lentamente (pendiente de aumento de temperatura más suave) y mantienen durante más tiempo el calor (pendiente de pérdida de temperatura más suave).

En el caso de la solución constructiva QC01 INT, al colocar el aislamiento térmico en la cara interior del muro, se actúa con una estrategia conservativa respecto a la energía aportada por una fuente adicional interior. El aislamiento térmico colocado en la cara interior permite que la superficie interior alcance pronto una temperatura similar a la del ambiente interior, pero al mismo tiempo se pierde con mayor rapidez la temperatura alcanzada.

Por tanto en todas las soluciones testeadas la tendencia en los resultados es la misma:

- Cuando la naturaleza de la solución hace que la evolución de las temperaturas sea más suave, el método propuesto presenta menos divergencia respecto al método de referencia.
- En todos los casos la tendencia es la misma, habiendo más cambio de temperaturas en soluciones con aislantes por el interior, y en esos casos, mayor divergencia entre métodos.
- En cualquier caso, la diferencia es menor respecto al método lineal de 5 minutos (referencia), para el método parabólico de 1 h .

Para el calor transferido por convección, el método parabólico de 1h presenta un ajuste de entre el 98-99% respecto al de referencia (lineal 5min), en cambio es de casi el doble respecto al método lineal de 1h, entre 170-180%.

El tipo de muro (con mayor o menor masa) o la posición del aislante no influyen en el ajuste del método parabólico respecto al de referencia, en cambio existe ligeras variaciones en el lineal de 1h. En este último el ajuste es peor en soluciones másicas como la FC01 y sus variaciones así como en la QB01, y sensiblemente peor cuando el aislante se sitúa por el interior de la solución. La situación del aislante en las soluciones de masa media casi no tiene relevancia en lo que ajuste se refiere (FC02).

Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
FCO1						
0-3600	-3517	-1918	-3105	-3450	98%	180%
FCO1 EXT						
0-3600	-3515	-1917	-3103	-3444	98%	180%
FCO1 INT						
0-3600	-8735	-4841	-7694	-8518	98%	176%
FCO2						
0-3600	-4394	-2537	-3900	-4329	99%	171%
FCO2 EXT						
0-3600	-4394	-2537	-3900	-4325	98%	170%
FCO2 INT						
0-3600	-8736	-4841	-7695	-8519	98%	176%
FCO2 MED						
0-3600	-4403	-2561	-3913	-4342	99%	170%
QBO1						
0-3600	-3852	-2139	-3986	-3783	98%	177%
QBO1 EXT						
0-3600	-3851	-2138	-3404	-3782	98%	177%
QBO1 INT						
0-3600	-8642	-4788	-7613	-8429	98%	176%

Tabla 34. Errores relativos en porcentaje del calor transferido al aire por convección del método lineal y parabólico de (1h) respecto al lineal (5min)

6.6.3 Sistema conservativo

«Principio de conservación de la energía»

Para el método parabólico propuesto, se impone la condición de principio de conservación de la energía en cada instante. Por tanto, la energía del sistema se conserva, de manera que para cada intervalo de tiempo la suma de las energías es nula, ya que la variación de uno de los tipos de energía revierte en las otras dos por el principio de conservación de la energía.

QB01 EXT					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-25732	-3851	-6418	36000	0
3600-7200	-20032	-5988	-9980	36000	0
7200-10800	7840	-2940	-4900	0	0
10800-14400	3673	-1378	-2296	0	0
14400-18000	2668	-1000	-1667	0	0
18000-21600	2024	-759	-1265	0	0
21600-25200	1606	-602	-1004	0	0
25200-28800	1316	-494	-823	0	0
28800-32400	1108	-416	-693	0	0
32400-36000	957	-359	-598	0	0
36000-39600	845	-317	-528	0	0
39600-43200	761	-285	-475	0	0
43200-46800	696	-261	-435	0	0
46800-50400	645	-242	-403	0	0
50400-54000	604	-226	-377	0	0
54000-57600	570	-214	-356	0	0
57600-61200	542	-203	-339	0	0
61200-64800	518	-194	-323	0	0
64800-68400	496	-186	-310	0	0
68400-72000	476	-179	-298	0	0
72000-75600	459	-172	-287	0	0
75600-79200	442	-166	-276	0	0
79200-82800	426	-160	-267	0	0
82800-86400	412	-154	-257	0	0
				Σ	0

Tabla 35. Los distintos tipos de energía vinculados a la transferencia de calor en el muro para el método de la función de conformación parabólica, para un intervalo de muestreo de una hora. Columna balance muestra el desequilibrio de la energía dentro de cada intervalo de tiempo.
Fuente: Elaboración propia

	QB01 EXT				
	Lineal (1h)				
Intervalo	Q cond (J/m ²)	Q conv (J/m ²)	Q rad (J/m ²)	Fuente	Balance
0-3600	-15858	-2138	-3564	36000	14440
3600-7200	-20561	-5064	-8440	36000	1935
7200-10800	-2743	-4154	-6923	0	-13819
10800-14400	3596	-1964	-3274	0	-1643
14400-18000	2879	-1252	-2086	0	-459
18000-21600	2224	-903	-1506	0	-185
21600-25200	1761	-696	-1160	0	-94
25200-28800	1432	-558	-930	0	-56
28800-32400	1196	-462	-771	0	-37
32400-36000	1024	-393	-656	0	-25
36000-39600	896	-343	-571	0	-18
39600-43200	800	-305	-508	0	-13
43200-46800	727	-276	-460	0	-9
46800-50400	670	-254	-423	0	-7
50400-54000	624	-236	-393	0	-5
54000-57600	587	-222	-369	0	-4
57600-61200	556	-210	-349	0	-3
61200-64800	530	-200	-333	0	-2
64800-68400	507	-191	-318	0	-2
68400-72000	486	-183	-305	0	-1
72000-75600	468	-176	-293	0	-1
75600-79200	450	-169	-282	0	-1
79200-82800	434	-163	-272	0	-1
82800-86400	419	-157	-262	0	-1
				Σ	-9

Tabla 36. Los distintos tipos de energía vinculados a la transferencia de calor en la cubierta QB01 EXT para el método de la función de conformación lineal, para un intervalo de muestreo de una hora. Columna balance muestra el desequilibrio de la energía dentro de cada intervalo de tiempo. Fuente: Elaboración propia

Puede observarse en la Tabla 36 para el método lineal 1h. que aunque existe una tendencia al equilibrio, y por tanto el sumatorio de energías tiende a cero con el paso del tiempo, el balance en cada intervalo no es nulo.

Sin embargo el método compensa los errores que conduce el modelo (sumatorio final con tendencia a cero), acortando en ciertos casos el periodo de muestreo hasta alcanzar esquemas numéricos estables. Sin embargo, este es un inconveniente cuando la acción de los sistemas de aire acondicionado deben ser incluidos (los modelos de éstos son ecuaciones algebraicas, y no incluyen la dinámica de los sistemas) y la energía debe tenerse en cuenta (cuándo y cuánta energía y potencia).

Esta condición del método parabólico se ve reflejada en todos los tipos calculados (véase anexo de resultados).

En algunos casos concretos, debido a la naturaleza de la solución constructiva, el método lineal corrige antes este desequilibrio, por ejemplo en el caso mostrado en la , en el que la solución constructiva presenta el aislante por el interior. Para ciertos intervalos de tiempo al comienzo existe desequilibrio, pero más tarde ese desequilibrio empieza a compensarse y se muestra un balance nulo.

FC02 INT					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-8980	-4841	-8068	36000	14110
3600-7200	-4142	-10838	-18063	36000	2958
7200-10800	6411	-7432	-12386	0	-13407
10800-14400	1974	-1787	-2978	0	-2790
14400-18000	521	-444	-740	0	-663
18000-21600	169	-122	-204	0	-158
21600-25200	80	-44	-74	0	-38
25200-28800	54	-24	-40	0	-9
28800-32400	45	-18	-29	0	-2
32400-36000	39	-15	-25	0	-1
36000-39600	35	-13	-22	0	0
39600-43200	31	-12	-20	0	0
43200-46800	28	-11	-18	0	0
46800-50400	25	-9	-16	0	0
50400-54000	23	-9	-14	0	0
54000-57600	20	-8	-13	0	0
57600-61200	18	-7	-11	0	0
61200-64800	16	-6	-10	0	0
64800-68400	15	-6	-9	0	0
68400-72000	13	-5	-8	0	0
72000-75600	12	-5	-8	0	0
75600-79200	11	-4	-7	0	0
79200-82800	10	-4	-6	0	0
82800-86400	9	-3	-5	0	0
				Σ	0

Tabla 37. Los distintos tipos de energía vinculados a la transferencia de calor en el muro FC02 INT para el método de la función de conformación lineal, para un intervalo de muestreo de una hora. Columna balance muestra el desequilibrio de la energía dentro de cada intervalo de tiempo. Fuente: Elaboración propia

En cualquier caso, para el método lineal, el desequilibrio en el balance de calor por conducción, convección y radiación existe y se puede comprobar para todos los tipos (véase anexo de resultados).

	FC01				
	Lineal (1h)				
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-15949	-1918	-5862	36000	12271
3600-7200	-22341	-4490	-8749	36000	420
7200-10800	-4834	-3599	-4019	0	-12452
10800-14400	2979	-1662	-1982	0	-664
14400-18000	2556	-1097	-1508	0	-49
18000-21600	2059	-826	-1194	0	38
21600-25200	1698	-664	-987	0	47
25200-28800	1435	-554	-838	0	43
28800-32400	1236	-473	-725	0	38
32400-36000	1078	-411	-635	0	33
36000-39600	950	-361	-560	0	29
39600-43200	842	-319	-497	0	25
43200-46800	749	-283	-443	0	23
46800-50400	669	-253	-396	0	20
50400-54000	598	-226	-354	0	18
54000-57600	535	-202	-317	0	16
57600-61200	480	-181	-284	0	14
61200-64800	430	-162	-255	0	13
64800-68400	386	-146	-229	0	12
68400-72000	346	-131	-205	0	10
7200-75600	311	-117	-184	0	9
75600-79200	279	-105	-165	0	8
79200-82800	250	-94	-148	0	8
82800-86400	224	-85	-133	0	7
				Σ	-63

Tabla 38. Balance de energía para el muro FC01 para el método de la función de conformación lineal. La escala logarítmica no permite la representación de los valores negativos. Fuente: Elaboración propia

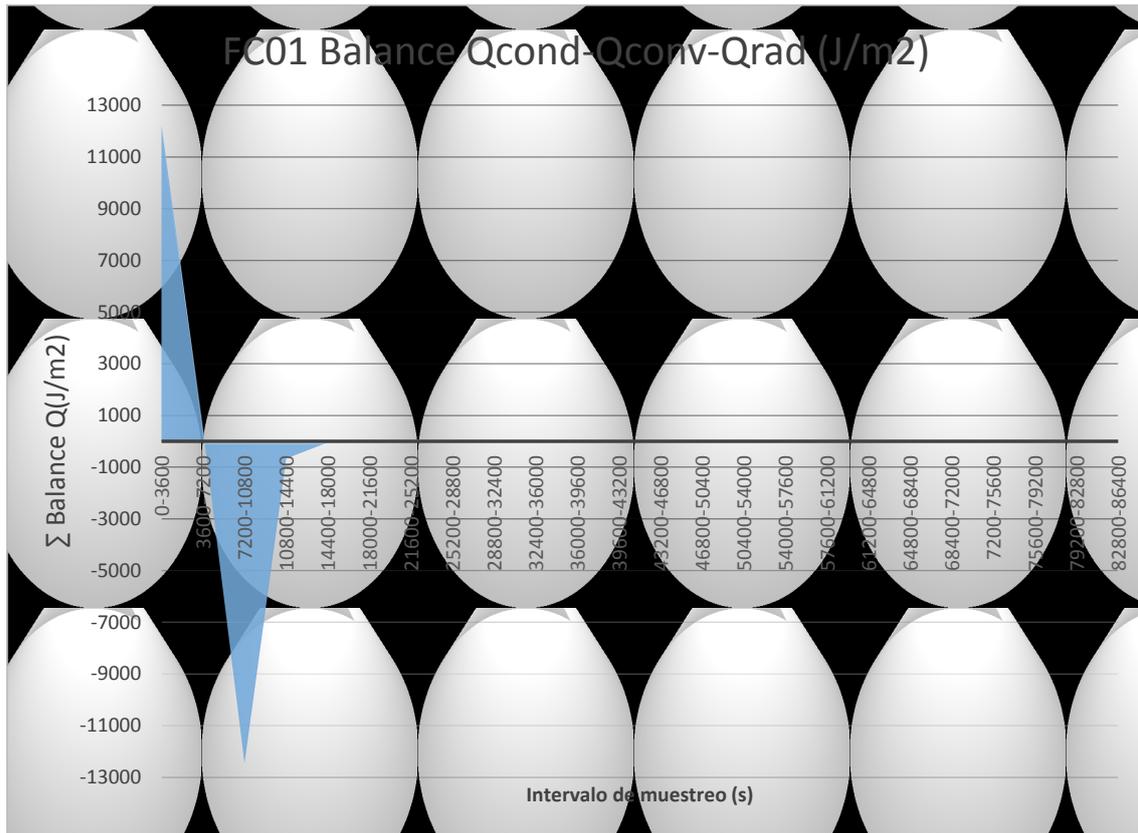


Figura 51. Balance de energía para el muro FC01 para el método de la función de conformación lineal. La escala logarítmica no permite la representación de los valores negativos. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Figura 51, los flujos de energía aparecen y desaparecen de repente. Aunque el modelo corrige las imperfecciones con el paso del tiempo.

La metodología propuesta demuestra cómo aplicar el método de los factores de respuesta mediante un polinomio de segundo orden. Todo ello bajo un esquema que conserva la energía dentro de los puntos de muestreo. El perfil parabólico permite cumplir esta condición entre los puntos de muestreo.

7 Conclusiones y futuras líneas de investigación

7.1 Consideraciones generales

En la presente tesis se pone de manifiesto que los métodos tradicionales para calcular el fenómeno de la conducción en la transferencia de calor en un muro de varias capas se basan en linealidad de la función para perfilar la evolución de la temperatura superficial en ambos lados del muro. Los métodos basados en esta hipótesis incumplen el principio de conservación de la energía dentro de los puntos de muestreo. Se basan en un equilibrio de potencia térmica en los puntos de muestreo. Sin embargo el método compensa los errores que conduce el modelo, acortando en ciertos casos el periodo de muestreo hasta alcanzar esquemas numéricos estables. Sin embargo, este es un inconveniente cuando la acción de los sistemas de aire acondicionado deben ser incluidos (los modelos de éstos son ecuaciones algebraicas, y no incluyen la dinámica de los sistemas) y la energía debe tenerse en cuenta (cuándo y cuánta energía y potencia).

Por otra parte los flujos de energía aparecen y desaparecen de repente.

Es importante hacer hincapié en que el propósito de la función de transferencia de calor en cualquiera de los casos; si lineal, parabólica o cualquier otro, es el perfil de la evolución de las temperaturas superficiales de las paredes cuando no estamos muestreando todos los instantes.

7.2 Comentarios a los resultados de aplicación

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.

Se propone substituir el elemento formador de orden 1 por otro de orden 2. Por lo que para dar forma a la evolución de temperaturas a cada lado del cerramiento, además del balance de potencias se requiere el balance de energía para que el esquema de cálculo sea conservativo. La función que propone el método tiene como fin conseguir un esquema de horario tan preciso (cerca de temperatura y energía transferida) como sea posible a otros métodos de frecuencia de muestreo más altas.

El objetivo es conseguir un método de simulación más rápido y preciso. El esquema debe conservar la energía para permitir la toma de saltos por hora de las cargas internas u otras excitaciones y la acción de los sistemas de climatización. La dinámica de HVAC es rara vez considerado y su tiempo de respuesta es más rápido que el edificio y es por eso nos centramos en una frecuencia de muestreo de hora.

7.3 Cumplimiento del objetivo propuesto

Resumiendo se puede decir:

1. Primera: sobre los problemas del método tradicional
 - a. Se ha demostrado que método actual no conserva la energía entre puntos de muestreo.
 - b. El esquema no diverge porque los errores se compensan. Pero se ha mostrado que en un punto de muestreo la cantidad de energía que pasa al aire de un recinto es errónea.
2. Segunda: sobre el nuevo balance de energía
 - a. Una interpolación parabólica de la evolución de las temperaturas superficiales requiere de un parámetro extra. Esto permite imponer una restricción más, que la interpolación lineal no permite. Esa restricción es la conservación de la energía a través de las superficies de los cerramientos entre periodos de muestreo.
 - b. Como resultado de lo anterior la precisión, la transferencia de energía por conducción del muro se corresponde con la transferencia de energía por convección y radiación entre muestreos.
3. Tercera: sobre la precisión del método y coste computacional.
 - a. Se ha demostrado que la precisión obtenido con la interpolación parabólica y pasos de muestreo horarios es del mismo orden que la tradicional interpolación lineal con pasos de muestreo de cinco minutos, esto es ritmos de muestreo 12 veces superiores.
 - b. El coste adicional que supone el nuevo sostenedor o interpolador no crece con el mismo orden. Se estima que el coste de computación de una simulación horaria con el nuevo elemento formador es del mismo orden que el coste de una simulación con el método lineal tradicional con un paso de media hora. Por lo tanto esto hace que se pueda alcanzar cálculos más rápidos y que mantienen la precisión.
4. Cuarta: sobre la comparación de los métodos con la misma frecuencia de muestreo aplicados a diferentes soluciones constructivas.
 - a. Se ha demostrado que en soluciones constructivas con mucha masa del lado de la perturbación, la solución lineal presenta mayor error que la parabólica.
 - b. Se ha demostrado que en soluciones constructivas con el aislante del lado de la perturbación, la solución lineal presenta mayor error que la parabólica.
5. Quinta: comentarios sobre los métodos.
 - a. Ante excitaciones fuertes, la interpolación parabólica puede conducir a evoluciones de temperaturas superficiales físicamente imposibles. Por ejemplo que dentro del intervalo de muestreo exista un máximo o mínimo de temperatura ante una excitación constante de radiación. Por otro lado, forzar una interpolación lineal de temperatura, aunque significa una evolución monótona, hay que señalar que también es físicamente imposible. Sin embargo, con todo, la predicción de la temperatura al final del intervalo de muestreo es mucho mejor que la interpolación lineal. Aunque no se ha demostrado, es de esperar que la interpolación parabólica produzca máximos y mínimos cuando el paso de tiempo es grande y desaparezca cuando el paso se reduzca. Si fuera así, podría ser usado como un testigo sobre la necesidad de reducir el paso.

7.4 Futuros trabajos

Respecto al desarrollo de futuros trabajos vinculados a la investigación que aquí se presenta, se proponen como futuras líneas de investigación:

- Analizar los errores cometidos ante otro tipo de excitaciones; evolución de la temperatura seca del aire, modificación de los coeficientes de convección asociados al intercambio (caso convección natural), o excitaciones en la parte exterior del muro.
Este conjunto de estudios ofrecería una visión más clara de cuando un elemento formador parabólico aportaría mayores ventajas sobre el interpolador lineal. En cualquier caso el parabólico es preferible pues obliga a conservar la energía entre muestreos.
- Se debería ampliar el estudio posteriormente a un recinto completo, no elemento por elemento como en el presente estudio y dejar flotar a la temperatura seca del aire y los coeficientes de convección. Esto mejoraría la comparación del potencial de ambos métodos.
- Ampliación del método a un mayor conjunto de soluciones constructivas.
- Desarrollar un método para calcular los CTF (coeficientes de la función de transferencia) en lugar de los factores de respuesta con el nuevo elemento formador, ya que este es el método usado por programas muy conocidos como Energy+, etcétera.
- Incorporación de la acción del sistema de climatización al conjunto. La acción del sistema durante periodos de muestreo debe incorporarse en la ecuación del balance de energía de una forma razonable.

8 Índice de Figuras

FIGURA 1 HERRAMIENTAS DE LA TRANSPOSICIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	14
FIGURA 2 DISTRIBUCIÓN DEL PARQUE DE VIVIENDAS SEGÚN EL AÑO DE CONSTRUCCIÓN.....	15
FIGURA 3 ELEMENTOS FORMADOR LINEAL Y PARABÓLICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	17
FIGURA 4 FLUJO DE DATOS GENERAL DE MOTORES DE SIMULACIÓN. FUENTE: MAILE, MARTIN, & BAZJANAC, 2007	22
FIGURA 5 ELEMENTOS QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SIMULACIÓN. FUENTE: (HUI S. C., 2003)	23
FIGURA 6 PRINCIPALES ELEMENTOS EN LA SIMULACIÓN ENERGÉTICA. FUENTE: HUI, 1998	24
FIGURA 7 RELACIÓN ENTRE PARTES INVOLUCRADAS EN LA SIMULACIÓN. FUENTE: HUI, 1998	25
FIGURA 8 HERRAMIENTAS DESARROLLADAS ENTRE 1997-2010. FUENTE: ATTIA, BELTRÁN, DE HERDE, & HENSEN, 2009.....	26
FIGURA 9 ELEMENTOS PRINCIPALES Y OPCIONES DE CUMPLIMIENTO	28
FIGURA 10 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA RESPUESTA FORZADA FLUJO DE CALOR EN AMBOS LADOS (+ Y -) DE UN CERRAMIENTO USANDO LA FUNCIÓN LINEAL.FUENTE :(PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015).....	32
FIGURA 11 EL USO DE HERRAMIENTAS EN DIFERENTES FASES DE DISEÑO.	34
FIGURA 12 CRITERIOS DE RELEVANCIA. FUENTE: ATTIA, BELTRÁN, DE HERDE, & HENSEN, 2009	34
FIGURA 13 FUNDAMENTOS DE ENERGYPLUS. FUENTE:.....	35
FIGURA 14 RESUMEN DE INTERCAMBIO DE DATOS ENTRE LAS HERRAMIENTAS DE MODELADO Y SIMULACIÓN TÉRMICA. LOS ENLACES INCLUYEN AQUELLOS COMO INTERFAZ, COMPLEMENTO O PLUG-IN. EL INTERCAMBIO DE DATOS ES LLEVADO A CABO EN VARIOS FORMATOS, PRINCIPALMENTE POR LA IFC Y GBXML. FUENTE NUGRAHA BAHAR, PERE, LANDRIEU, & NICOLLE, 2013	36
FIGURA 15 ESQUEMA DEL BALANCE EN LA CARA EXTERIOR DEL MURO. FUENTE: UNIVERSITY OF ILLINOIS , UNIVERSITY OF CALIFORNIA & THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2014	37
FIGURA 16 ESQUEMA DEL BALANCE EN LA CARA INTERNA DEL MURO. FUENTE: UNIVERSITY OF ILLINOIS , UNIVERSITY OF CALIFORNIA & THE ERNEST ORLANDO LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY., 2014	38
FIGURA 17 ESQUEMA DE 2 HISTORIAS FUERA DE FASE UNA RESPECTO A OTRA. FUENTE: THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH, 2011	39
FIGURA 18 INTERPOLACIÓN SECUENCIAL DE NUEVAS HISTORIAS. FUENTE: THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS AND THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA THROUGH, 2011	40
FIGURA 19 HISTORIA PRINCIPAL CON INTERPOLACIÓN. FUENTE:	40
FIGURA 20 NUEVA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA IMPUESTA POR UNA ECUACIÓN DE 2 GRADO. FUENTE :PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015	42
FIGURA 21 DESCOMPOSICIÓN DE FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN DE SEGUNDO GRADO O HOLDER2(T) EN FUNCIONES SIMPLES { F ₁ (T), F ₂ (T), F ₃ (T) ,F ₄ (T)} FUENTE : PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015	43
FIGURA 22 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN. FUENTE: PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015. ELABORACIÓN PROPIA	45
FIGURA 23. TREN O SECUENCIA PARABÓLICA DE PULSOS. FUENTE: PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015. ELABORACIÓN PROPIA	49
FIGURA 24 CALOR TRANSFERIDO AL AIRE EN [J / M2] DENTRO DE UN INTERVALO DE UNA HORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72

FIGURA 25 ERRORES RELATIVOS EN PORCENTAJE DEL CALOR TRANSFERIDO AL AIRE CON RESPECTO A LA MÉTODO LINEAL Y PARABÓLICO CUANDO LA FRECUENCIA DE MUESTREO ES DE UNA HORA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72
FIGURA 26 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DE LA PARED PARA UNA FUNCIÓN PARABÓLICA PARA UN INTERVALO DE 1 HORA, ASÍ COMO PARA LA FUNCIÓN LINEAL PARA INTERVALOS DE: 1 HORA, 15 MINUTOS Y 5 MINUTOS. ELABORACIÓN PROPIA	73
FIGURA 27 EL CALOR LIBERADO POR CONVECCIÓN AL AIRE POR LA PARED EJEMPLO PARA PARA LA FUNCIÓN PARABÓLICA CON FRECUENCIA DE MUESTREO DE 1H Y PARA LA FUNCIÓN LINEAL CON 1 HORA, 15 MINUTOS Y 5 MINUTOS DE FRECUENCIA DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	74
FIGURA 28 ESQUEMA DE SECUENCIA DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA TENIENDO EN CUENTA LA CONVOLUCIÓN PARABÓLICA PROPUESTA	75
FIGURA 29 ESQUEMA DE PORCENTAJE DE PÉRDIDAS HABITUALES POR ELEMENTO EN RÉGIMEN DE INVIERNO. FUENTE: TIPPERARY ENERGY AGENCY.....	80
FIGURA 30 ESQUEMAS DE CÓMO EL ÁREA EXPUESTA INFLUYE EN LA TRANSFERENCIA DE CALOR CON EL EXTERIOR. FUENTE: LOW ENERGY ARCHITECTURE RESEARCH UNIT (LEARN) OF LONDON METROPOLIAN UNIVERSITY.....	80
FIGURA 31. EVOLUCIÓN DE MEDIADOS DEL S.XIX. MURO DE DISTINTOS GRUESOS Y FORJADO CON APOYO SIMPLE. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	81
FIGURA 32. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC01 PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	82
FIGURA 33 VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC01 REHABILITADA POR EL EXTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011 83	
FIGURA 34 VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC01 REHABILITADA POR EL INTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011 84	
FIGURA 35 AÑOS 70: ESTRUCTURA DE HORMIGÓN. HOJA EXTERIOR SEMIVOLADA DE ½' PIE. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	86
FIGURA 36. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC02 PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	87
FIGURA 37. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC02 REHABILITADA POR EL EXTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011 88	
FIGURA 38. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC02 REHABILITADA CON AISLANTE EN CÁMARA PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011 89	
FIGURA 39.VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC02 REHABILITADA POR EL INTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011 91	
FIGURA 40. AZOTEA TRANSITABLE- ESQUEMA. FUENTE: ORDEN DE 6 DE JUNIO DE 1973. NORMA TECNOLÓGICA DE LA EDIFICACIÓN NTE-QAT/1973, "CUBIERTAS: AZOTEAS TRANSITABLES". FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	94
FIGURA 41. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA QB01 PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	95

FIGURA 42. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA QB01 REHABILITADA POR EL EXTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	96
FIGURA 43. VISTA DE LA SECCIÓN DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA QB01 REHABILITADA POR EL INTERIOR PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	97
FIGURA 44. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN FC01. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	101
FIGURA 45. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN QB01. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	102
FIGURA 46. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN QB01. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	102
FIGURA 47. DIFERENCIAS DE CALOR POR CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN DE LOS MÉTODOS CON INTERVALO DE PASO DE 1H LINEAL Y PARABÓLICO FRENE AL LINEAL DE 5 MIN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	103
FIGURA 48. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN FC01 Y SUS VARIACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	106
FIGURA 49. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN FC02 Y SUS VARIACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	109
FIGURA 50. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA ENTRE LOS DISTINTOS MÉTODOS DE LA SOLUCIÓN QB01 Y SUS VARIACIONES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	112
FIGURA 51. BALANCE DE ENERGÍA PARA EL MURO FC01 PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN LINEAL. LA ESCALA LOGARÍTMICA NO PERMITE LA REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES NEGATIVOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	118
FIGURA 52. VALORES DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DE LAS VARIACIONES DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC01 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	133
FIGURA53. VALORES DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DE LAS VARIACIONES DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA FC02 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	141
FIGURA54. VALORES DE LAS DISTINTAS COMPONENTES DE LAS VARIACIONES DE LA SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA QB01 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	151
FIGURA 55. EL FLUJO DE CALOR EN UN EDIFICIO. FUENTE: NZ WOOD , 2014.....	201
FIGURA 56. CONVECTION HEATING.....	201
FIGURA 57. CONCEPTO DE TEORÍA DE LA CAPA LÍMITE. FUENTE: HTTP://ADG.STANFORD.EDU/AA200B/BLAYERS/BLAYERS.HTML	203

9 Índice de Tablas

TABLA 1. Nº DE VIVIENDAS SEGÚN AÑO DE CONSTRUCCIÓN. FUENTE: INE. ELABORACIÓN PROPIA.	15
TABLA 2 EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS ENERGÉTICOS DE EDIFICIOS. ELABORACIÓN PROPIA. FUENTE: CLARKE & MAVER, 1991.	24
TABLA 3 RELACIÓN DE PROGRAMAS DE SIMULACIÓN MÁS FRECUENTES. ELABORACIÓN PROPIA.	28
TABLA 4 COMPARATIVA DE MODELOS DE CÁLCULO PROGRAMAS DE SIMULACIÓN. ELABORACIÓN PROPIA.	30
TABLA 5. COEFICIENTES DE RESPUESTA DE FLUJO DE CALOR PARA LA TEMPERATURA - FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA (FRECUENCIA DE MUESTREO DE UNA HORA). ELABORACIÓN PROPIA.....	56
TABLA 6. COEFICIENTES DE RESPUESTA DE FLUJO PARA LA TEMPERATURA A LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA (FRECUENCIA DE MUESTREO DE UNA HORA). ELABORACIÓN PROPIA.....	60
TABLA 7 COEFICIENTES DE RESPUESTA DE FLUJO PARA LA SEMI-ACELERACIÓN PARA LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA (FRECUENCIA DE MUESTREO DE UNA HORA). ELABORACIÓN PROPIA.....	61
TABLA 8. COEFICIENTES DE RESPUESTA DE ENERGÍA PARA LA TEMPERATURA PARA LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA (FRECUENCIA DE MUESTREO DE UNA HORA). ELABORACIÓN PROPIA.....	62
TABLA 9. COEFICIENTES DE RESPUESTA DE ENERGÍA PARA EL SEMI-ACELERACIÓN PARA LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA (FRECUENCIA DE MUESTREO DE UNA HORA).ELABORACIÓN PROPIA	63
TABLA 10 ENERGÍA TRANSFERIDA ENTRE INSTANTES DE MUESTREO PARA EL MÉTODO LINEAL. MUESTREO CADA HORA. LA COLUMNA SUM MUESTRA EL DESEQUILIBRIO DE LA ENERGÍA DENTRO DE CADA INTERVALO DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	67
TABLA 11 ENERGÍA TRANSFERIDA ENTRE INSTANTES DE MUESTREO PARA EL MÉTODO PARABÓLICO. MUESTREO CADA HORA. LA COLUMNA SUM MUESTRA EL EQUILIBRIO DE LA ENERGÍA DENTRO DE CADA INTERVALO DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	71
TABLA 12 EL CALOR TRANSFERIDO POR RADIACIÓN INFRARROJA (J / M2) DENTRO DE INTERVALO DE UNA HORA. LOS ERRORES SON PARA LA (H) CASO 1 SE REFIERE A LA (MIN) CASO LINEAL 5. FUENTE: (PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015).....	75
TABLA 13 EL CALOR TRANSFERIDO POR CONDUCCIÓN (J / M2) DENTRO DE INTERVALO DE UNA HORA. LOS ERRORES SON PARA LA 1 (H) CASO SE REFIRIÓ A LA (MIN) CASO LINEAL 5. FUENTE: (PINAZO OJER, SOTO FRANCÉS, SARABIA ESCRIVA, & SOTO FRANCÉS, 2015.....	76
TABLA 14 CARACTERIZACIÓN TIPOLOGICA EN ESTADO ACTUAL DEL PARQUE RESIDENCIAL EDIFICATORIO EXISTENTE POR ÉPOCAS.....	79
TABLA 15.COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	82
TABLA 16. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	83
TABLA 17 COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	84
TABLA 18. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	87
TABLA 19. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	88
TABLA 20. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011.....	90

TABLA 21. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	91
TABLA 22. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	95
TABLA 23. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	96
TABLA 24. COMPOSICIÓN POR HOJAS DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO. FUENTE: SERRANO LANZAROTE, ORTEGA MADRIGAL, & GARCÍA-PRIETO RUIZ, 2011	97
TABLA 25. VISTA DE LA SECCIÓN DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS ESCOGIDAS PARA EL ANÁLISIS EN LA ETAPA DE COMPROBACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO PROPUESTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	98
TABLA 26. DIFERENCIA DE CANTIDADES DE CALOR TRANSFERIDO AL AIRE CON RESPECTO AL MÉTODO LINEAL Y FRECUENCIA DE MUESTREO DE 5 [MIN]. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	100
TABLA 27. DIFERENCIAS DE CALOR POR CONDUCCIÓN, CONVECCIÓN Y RADIACIÓN DE LOS MÉTODOS CON INTERVALO DE PASO DE 1H LINEAL Y PARABÓLICO FRENE AL LINEAL DE 5 MIN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	103
TABLA 28. VISTA DE LA SECCIÓN DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS FC01 Y SUS VARIABLES DE MEJORA ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	104
TABLA 29. COMPARATIVA DE EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA FC01 FCO1 EXT F01 INT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	105
TABLA 30. VISTA DE LA SECCIÓN DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS FC02 Y SUS VARIABLES DE MEJORA ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	107
TABLA 31. COMPARATIVA DE EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA FC02 FC02 EXT F02 INT FC02INT. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	108
TABLA 32. VISTA DE LA SECCIÓN DE LAS SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS QB1 Y SUS VARIANTES DE MEJORA ENERGÉTICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	110
TABLA 33. COMPARATIVA DE EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA QB01 QB01EXT QB01. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	111
TABLA 34. ERRORES RELATIVOS EN PORCENTAJE DEL CALOR TRANSFERIDO AL AIRE POR CONVECCIÓN DEL MÉTODO LINEAL Y PARABÓLICO DE (1H) RESPECTO AL LINEAL (5MIN).....	113
TABLA 35. LOS DISTINTOS TIPOS DE ENERGÍA VINCULADOS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL MURO PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN PARABÓLICA, PARA UN INTERVALO DE MUESTREO DE UNA HORA. COLUMNA BALANCE MUESTRA EL DESEQUILIBRIO DE LA ENERGÍA DENTRO DE CADA INTERVALO DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	114
TABLA 36. LOS DISTINTOS TIPOS DE ENERGÍA VINCULADOS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CUBIERTA QB01 EXT PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN LINEAL, PARA UN INTERVALO DE MUESTREO DE UNA HORA. COLUMNA BALANCE MUESTRA EL DESEQUILIBRIO DE LA ENERGÍA DENTRO DE CADA INTERVALO DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	115
TABLA 37. LOS DISTINTOS TIPOS DE ENERGÍA VINCULADOS A LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL MURO FC02 INT PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN LINEAL, PARA UN INTERVALO DE MUESTREO DE UNA HORA. COLUMNA BALANCE MUESTRA EL DESEQUILIBRIO DE LA ENERGÍA DENTRO DE CADA INTERVALO DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	116
TABLA 38. BALANCE DE ENERGÍA PARA EL MURO FC01 PARA EL MÉTODO DE LA FUNCIÓN DE CONFORMACIÓN LINEAL. LA ESCALA LOGARÍTMICA NO PERMITE LA REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES NEGATIVOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	117

10 Bibliografía

(s.f.). Obtenido de http://www.deltat.com/ways_to_transfer_heat.html

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2001). *Standard 90.1-2001, Energy Standard for Buildings Except Low-rise Residential Buildings*. Atlanta: ASHRAE.

Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A., & Hensen, J. (2009). "ARCHITECT FRIENDLY": A COMPARISON OF TEN DIFFERENT BUILDING PERFORMANCE SIMULATION TOOLS. *Eleventh International IBPSA Conference*. Glasgow, Scotland: 204-2011.

Big Ladder. (11 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-016.html>

Bruckmayer, F. (1940). The equivalent brick wall. *Gesundheit ingenieur* 63, 61-65.

Ceylan, H. T., & Myers, G. E. (1980). Long-time Solutions to Heat Conduction Transients with Time-Dependent Inputs. *SME Journal of Heat Transfer, Volume 102, No. 1*, 115-120.

Chen, Y., Athienitis, A. K., & Galal, K. E. (2013). Frequency domain and finite difference modeling of ventilated concrete slabs and comparison with field measurements: Part 1, modeling methodology. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 66 (0), 948 – 956.

Clarke, J. (1985). *EnergySimulationinBuildingDesign*. Bristol: AdamHilger.

Clarke, J. A., & Maver, T. W. (1991). Advanced design tools for energy conscious building design: development and dissemination. *Building and Environment*, 26 (1), 25-34.

Crabb, J., Murdoch, N., & Pennman, J. (1987). A simplified thermal response model. *Building Services Engineering Research and Technology*, 13-19.

Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2005). *CONTRASTING THE CAPABILITIES OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE SIMULATION PROGRAMS*. United States Department of Energy & University of Strathclyde & University of Wisconsin.

Crawley, D., Lawrie, L., Winkelmann, F., & Pedersen, C. (2001). EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33, 319-331.

Dai, Q., & Fang, X. (2014). An Approach to Calculate Transient Heat Flow through Transparent Materials. *American Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 1 No. 1*, 30-37.

Delat T. (18 de Noviembre de 2014). Obtenido de http://www.deltat.com/ways_to_transfer_heat.html

Department of Mechanical Engineering Hong Kong. (11 de Noviembre de 2014). Obtenido de http://www.mech.hku.hk/bse/MEBS6006/mebs6006_0910_exercise02_solutions.pdf

Editorial de Construcción Arquitectónica. (13 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://editorial.cda.ulpgc.es/ftp/ambiente/antesol/TESIS/Cap2.pdf>

Engineer On A Disk. (20 de Noviembre de 2014). Obtenido de Engineer On A Disk: http://engineeronadisk.com/notes_mathmod/laplacea2.html

García, Á. F. (11 de Noviembre de 2014). *Campus de excelencia Internacional Universidad País Vasco.* Obtenido de <http://www.ehu.es/es/web/gipuzkoa>

Gough, M. (1999). *A Review of New Techniques in Building Energy and Environmental Modelling.* Garston, Watford, UK: Report for Contract BREA-42, Building Research Establishment.

Hanby, V., & Dil, A. (1995). Stochastic Modelling of Building Heating & Cooling Systems. *BSE&T*, v.16(4).

Hayashi, T., Urano, Y., Watanabe, T., & Ryu, Y. (1985). Passive system simulation program pssp and its applications. *IBPSA Journal of Building . Building Simulation*, 346-353.

HICKS ROOFING, INC. (18 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://hicksroofing.net/home-improvement/windowsdoors/>

Hui, S. C. (1998). Simulation based design tools for energy efficient buildings in Hong Kong. *Hong Kong Papers in Design and Development*, Vol. 1, 40-46.

Hui, S. C. (2003). EFFECTIVE USE OF BUILDING ENERGY SIMULATION FOR ENHANCING. *Eighth International IBPSA Conference*, (págs. 523-530). Eindhoven, Netherlands.

Hui, S. C., & Cheung, K. (1998). Application of Building Energy Simulation to Air-conditioning Design. *Proc. of the Mainland-Hong Kong HVAC Seminar '98*, (págs. 12-20). Beijing.

Klein, S. A., Duffie, J., & Beckman, W. (1976). *TRNSYS - A Transient Simulation Program.* ASHRAE Trans, 82, 623.

Kramer, R., Schijndeln, J. v., & Schellen, H. (2012). Simplified thermal and hygro building models: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 318-325.

Kusuda, T. (1977). Fundamentals of Building Heat Transfer. *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards* 82 Vol2, 97-106.

Maestre, I. R., Cubillas, P. R., & Pérez-Lombard, L. (2010). Transient heat conduction in multi-layer walls: An efficient strategy for Laplace's method. *Energy and Buildings* 42, 541-546.

Maestre, R., Cubillas, P., & Pérez-Lombard, L. (2010). Transient heat conduction in multi-layer walls: An efficient strategy for Laplace's method. *Energy and Buildings* 44, 541-546.

Maile, T., Martin, F., & Bazjanac, V. (2007). *Building Energy Performance Simulation Tools - a Life-Cycle and Interoperable Perspective.* Standford: CIFE CENTER FOR INTEGRATED FACILITY ENGINEERING.

Massachusetts Institute of Technology . (13 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node116.html>

- Mitalas, G. (1968). Calculation of transient heat flow through walls and roofs. *ASHRAE Transactions* 74, 182-188.
- Mitalas, G., & Stephenson, D. (1971). Calculation of heat conduction transfer functions for multilayer slabs.,. En *ASHRAE Transaction* 77 (págs. 117–126).
- Monroy, M. M. (18 de Noviembre de 2014). *Departamento de Construcción Arq. Escuela de Arquitectura Las palmas de Gran Canaria*. Obtenido de http://editorial.cda.ulpgc.es/Redaccion/R1_Equipo/R11.htm
- Nugraha Bahar, Y., Pere, C., Landrieu, J., & Nicolle, C. (2013). A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modeling (BIM) Platform. *Building*, 380-398.
- NZ Wood . (11 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://www.nzwood.co.nz/learning-centre/timber-performance/thermal/timber-performance-heat-flow-in-a-building-structure/>
- OpenStax. (20 de Noviembre de 2014). Obtenido de http://cnx.org/contents/a80b2905-e6aa-4f4e-8460-f2e13980c389@1/Laboratory_measurement_of_imp
- Palomo, E., & Lefebvre , G. (1995). *Stochastic Simulations Against Deterministic Ones: Advantages and Drawbacks*. Proceedings of Building Simulation.
- Pinazo Ojer, J. M., & Torrella Alcaraz, E. (1986). *Comportamiento térmico de edificios en régimen variable, obtención de las funciones de transferencia en muros de construcción*. Zaragoza: II jornadas nacionales de calefacción y climatización eléctrica.
- Pinazo Ojer, J., Soto Francés, V., Sarabia Escriba, 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.
- ShareTechNote. (20 de Noviembre de 2014). Obtenido de http://www.sharetechnote.com/html/EngMath_LaplaceTransform.html
- 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.
- Spitler, J. D., Fisher, ,. D., & Pedersen, C. O. (1997). The radiant time series cooling load calculation procedure.,. *ASHRAE Transactions* 103 (2), 503-515.
- Stephenson, D., & Mitalas, G. (1971). Calculation of heat conduction transfer functions for multilayer slabs. *ASHRAE Transaction* 77, 117-126.
- The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through. (2011). *EnergyPlus Engineering Reference*. US Department of Energy.
- The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. . (2014). *EnergyPlus Engineering Reference*. US Department of Energy.

Thermog lance. (18 de Noviembre de 2014). Obtenido de <http://www.thermog lance.com/en/convection-heating>

U.S. Department of Energy ; USA.gov. (Enero de 2015). *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. Obtenido de EnergyPlus Energy Simulation Software: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

University of Illinois , University of California & the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. (2014). *ENERGYPLUS ENGINEERING REFERENCE, THE REFERENCE TO ENERGYPLUS CALCULATIONS*. University of Illinois and the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Virsedaa, P., & Pinazo, J. (1998). Heat conduction in multilayer spherical products by transfer functions. *International Journal of Refrigeration Volume 21*, Pages 285–294.

Wikipedia. (18 de Noviembre de 2014). Obtenido de http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_Spectrum_Properties_es.svg

Wiltshire, T., & Wright, A. (1988). Advances in building energy simulation in the U.K. - the science and engineering research council's programme. *Energy and Buildings*, 10, 175-183.

Yoshimi, U., & Toshiyuki, W. (1981). An analysis of multi-layer wall heat transfer by state transition matrix: part 1 an approximate transfer functions model and its accuracy. *Transactions of the Architectural Institute of Japan* 305, 97-111.

Yoshimi, U., & Toshiyuki, W. (1982). An analysis of multi-layer wall heat transfer by state transition matrix: part 2 a successive calculation method and its accuracy. *Transactions of the Architectural Institute of Japan* 311, 57-66.

11 Anexo I. Fichas técnicas de muros testeados

Todas las fichas que aparecen a continuación han sido extraídas del “Catálogo de soluciones constructivas de rehabilitación, en azul aparecen las soluciones de origen y en verde las fichas de las soluciones de mejora.

Muro másico con distintas posiciones de aislante

TIPO FC01	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Fábrica 1 pie ladrillo ceramico macizo	0,24	0,87	1800	1380
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1000	1150
U= 2,60 (W/m2•K)				
TIPO FC01EXT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Revoco	0,015	1,8	2100	1000
Poliestireno expandido	0,06	0,029	30	1000
Fábrica 1 pie ladrillo ceramico macizo	0,24	0,87	1800	1380
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1000	1150
U= 0,40 (W/m2•K)				
TIPO FC01INT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Fábrica 1 pie ladrillo ceramico macizo	0,24	0,87	1800	1380
Enlucido de yeso	0,015	0,57	1000	1150
Enfoscado de mortero	0,015	1,8	2100	1000
Lana mineral	0,06	0,031	40	1000
Placa de yeso laminado	0,015	25	900	1000
U= 0,42 (W/m2•K)				

Figura 52. Valores de las distintas componentes de las variaciones de la solución constructiva FC01 Fuente: Elaboración propia

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Sin aislante/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja

CARACTERÍSTICAS

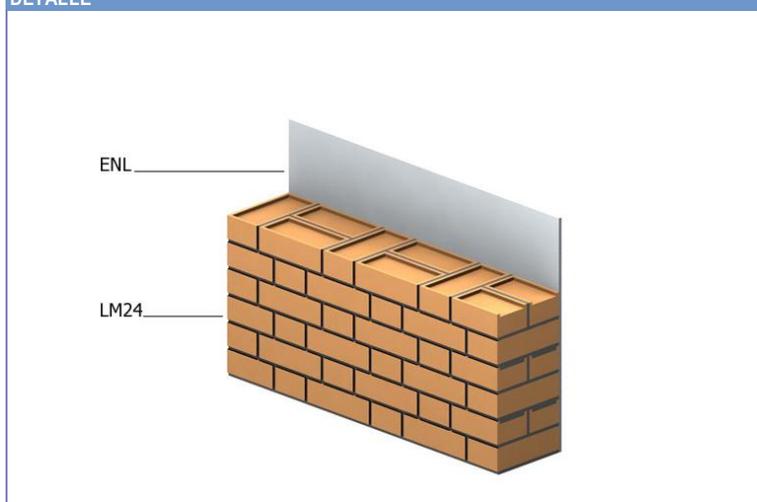
Constructivas

Fachada formada por una hoja de un pie de obra de fábrica de ladrillo cerámico macizo cara vista y enlucido con yeso en el interior.

Históricas

A mediados del Siglo XIX las fachadas de ladrillo estaban constituidas por muros de carga gruesos de hasta 6 plantas de altura. Los forjados apoyaban sobre los muros con apoyo simple sin generar torsión. En la primera mitad del Siglo XX, pese a que en Europa ya se han introducido estructuras porticadas de acero y hormigón, en España, debido a la infraestructura económica, se siguen manteniendo los muros de carga. La fachada pasó a estar constituida generalmente por dos hojas, una hoja exterior gruesa de 1 pie o un pie y medio, y una hoja interior más delgada que en ocasiones se omite, como es el caso.

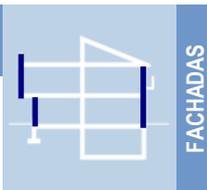
DETALLE



LEYENDA

		Espesor
LM24	Fábrica 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Masa	Transmitancia U (W/m ² k)					Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Espesor E (mm)	
	M (kg/m ²)	Actual	Exigible según CTE							
			A	B	C	D				E
	528	2,63	0,94	0,82	0,73	0,66	0,57	2	61	255



FACHADAS

ID-FC01c04



IDENTIFICACIÓN

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA CON REVESTIMIENTO CONTINUO:

Aislante por el exterior/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico del cerramiento.

Descripción

Consiste en la aplicación, sobre la superficie exterior de la fachada existente, de las planchas de EPS, que van después revestidas por una capa protectora y de acabado ejecutada con morteros especiales por instaladores cualificados.

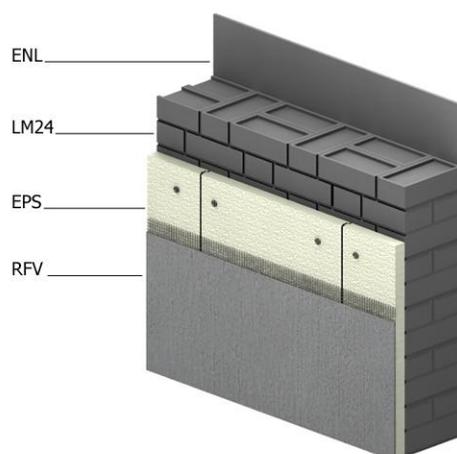
Ejecución

- Fijar el aislamiento al muro soporte mediante adhesivo previa limpieza. No se recomienda utilizar fijaciones mecánicas, pues supone riesgo de humedades.
- Colocación de la armadura (mallas de fibra de vidrio) embebida en el enlucido base.
- Colocación de angulares en arranque y esquinas como protección.
- Aplicación de una capa reguladora de fondo y del revestimiento de acabado y sellado de juntas.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de fachadas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

DETALLE



LEYENDA

		Espesor
RFV	Revoco y adhesivo cementoso armado con malla de fibra de vidrio	5
EPS	Poliestireno expandido	Variable
LM24	Fábrica de 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15

Espesor aislante (mm) (λ=0,037)	Masa M (kg/m ²)	Transmitancia U (W/m ² K)	Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Precio orientativo (€/m ²)	Espesor E (mm)
60	535	0,50	5	61	53,07	320
50		0,57			51,77	310
40		0,68			50,47	300
20-100		1,12-0,33			-	280-360
0	528	2,63	2	61	-	255



FACHADAS

MJ-FC01c04 EPS

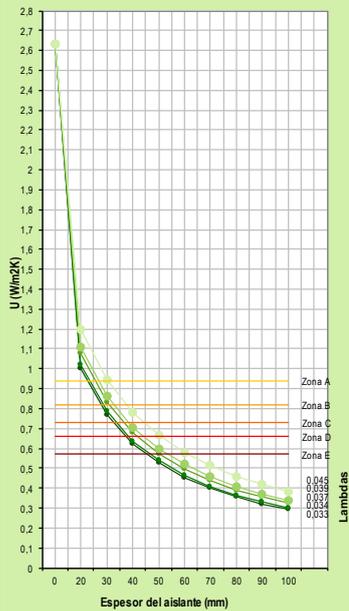


MEJORA

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA CON REVESTIMIENTO CONTINUO:

Aislante por el exterior/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja

Transmitancia de la fachada en función del espesor del aislante EPS colocado por el exterior y revestido



CONDICIONES DE LOS COMPONENTES EXTERIORES		CONDICIONES DE LA BARRERA			
Condiciones del acabado	Condiciones de la hoja soporte	sB	B1	B2	B3
CV	C1	1	2	3	5
	C2	2	3	4	5
R1	C1	2	3	4	5
	C2	3	4	5	5
R2	C1	4	5	5	5
R3	C1	5	5	5	5

Observaciones:
 Solución no apta para bajas temperaturas porque los materiales de fijado y morteros no pueden curar correctamente.
 En fachadas con aislamiento de EPS revestido directamente por el exterior del muro soporte hay sistemas que se basan en morteros preparados a tal efecto. Dichos sistemas requieren el asesoramiento de empresas fabricantes e instaladoras especializadas, de modo que se garantice la compatibilidad de todos los productos integrantes del sistema.
 A tal fin, algunos Institutos de Construcción proporcionan para tales sistemas constructivos los llamados Documentos de Idoneidad Técnica (DIT). Últimamente, dado el marco legislativo armonizado europeo, se están empezando a emitir Documentos de Idoneidad Técnica Europea (DITE).
 Los cables eléctricos enfundados en PVC no deben entrar en contacto con el aislamiento de poliestireno, ya que puede degradar la integridad del recubrimiento de cables.
 El caso de placas de poliestireno fijadas mediante adherencia se limita a una altura de 22 metros, para edificios mayores se deben fijar mediante ensambladura en espiga.

REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica Se corrigen los puentes térmicos, de modo que se evitan las paredes "frías" y el riesgo de formación de condensaciones superficiales e, incluso, moho. Se aprovecha la inercia térmica del soporte.	Implica modificaciones en una serie de detalles: aleros voladizos, ventanas, puertas y lugares donde la envoltura exterior se atraviese, para la adecuación al nuevo espesor de fachada.
	Económica Bajo coste de producción (puede llegar a costar la mitad que una fachada transventilada). Solución más rentable para reparar lesiones. La rentabilidad es proporcional al nº de alturas.	Resulta una solución más costosa que el aislamiento por el interior. No es rentable para edificios de baja altura.
	Ejecución La utilización de un sistema compuesto implica una ejecución más rápida y limpia. No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.	En necesario montar andamios. Tiene mucho impacto estético. Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos. No se puede aplicar el revestimiento en situaciones de bajas temperaturas.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio Durante su combustión, el EPS libera energía (40M J/kg), CO, CO2 y una mínima cantidad de cenizas, pero no genera ningún gas nocivo a base de cloro ni cianuro.	El EPS recubierto por una capa de mortero de 15 cm. De espesor obtiene la clasificación B, s1do (en una escala de la A a la F) según la norma UNE-EN 13501-1
HABITABILIDAD	Salubridad Sistema impermeable al agua que deja salir la humedad del interior. El DB-HS1 considera una barrera de resistencia alta a la filtración un aislante no hidrófilo dispuesto por el exterior de la hoja principal.	
	Protección frente al ruido	El aislante no se comporta como un buen material absorbente acústico ya que presenta una superficie limitada, y tampoco puede actuar como absorbente elástico de masa.
	Ahorro de energía Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	
AD	Dimensiones de los espacios Instalado el aislamiento sobre las fachadas, no se reduce la superficie útil del edificio o vivienda. Al no existir cámara de aire se reduce el espesor de la solución.	
OTROS	Durabilidad Una intervención de estas características incrementa la vida útil de la fachada y por lo tanto del edificio. El EPS tiene una vida útil superior a 25 años.	Se debe tener en cuenta la fuerza del viento, ya que ésta afecta a la estabilidad de la solución. Por ello no es recomendable en edificios de gran altura.
	Sostenibilidad La conservación de las propiedades térmicas favorece el ahorro energético.	Solución muy difícil de separar para su reciclado. El coste energético de producción del EPS es de los más altos de los aislantes, además no es biodegradable.
	Apariencia estética Gran variedad de colores y acabados del revoco.	Diseño limitado debido al recubrimiento exterior y la existencia de juntas. En edificios con un grado de protección como parte del patrimonio histórico-artístico, será muy difícil intervenir.

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN ID-FC01c04

LESIONES

INTERVENCIÓN

MANTENIMIENTO

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante por el interior/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico y acústico del cerramiento.

Descripción

Consiste en el trasdosado directo por el interior de la fachada existente con un panel constituido por aislante y placa de yeso laminado.

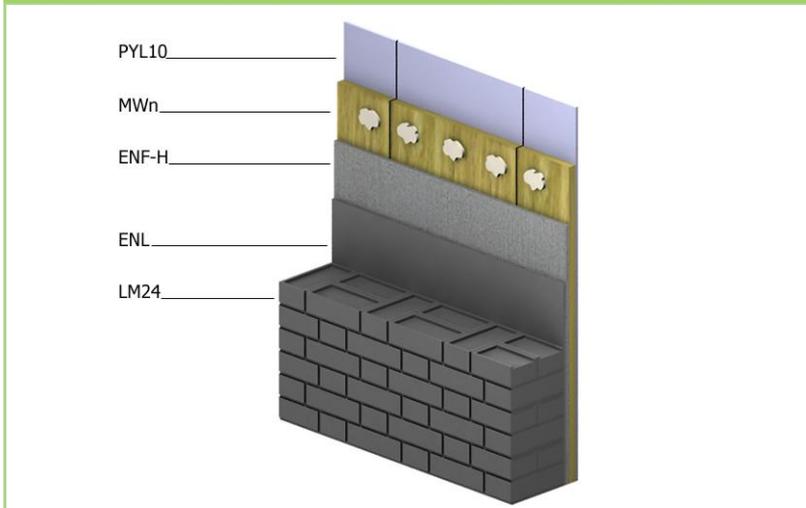
Ejecución

- Limpieza y preparación del soporte: zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos.
- Aplicación de pelladas de pasta de agarre directamente sobre el panel constituido por aislante y placa de yeso laminado.
- Se instala el panel sobre la pared presionándolo bien de manera que quede completamente fijo.
- Recolocación de zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de fachadas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

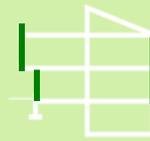
DETALLE



LEYENDA

		Espesor
LM24	Fábrica de 1 pie de ladrillo cerámico macizo	240
ENL	Enlucido de yeso	15
ENF-H	Enfoscado de mortero con aditivos hidrofugantes de 15 mm.	15
MWn	Lana mineral no hidrófila	Variable
PYL10	Placa de yeso laminado	10

Espesor aislante (m.m) (λ=0,04)	Masa M (kg/m ²)	Transmitancia U (W/m ² k)	Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Precio orientativo (€/m ²)	Espesor E (mm)
70	563	0,43	3	61	53,53	350
50		0,56		61	49,55	330
40		0,65		61	45,93	320
20-100		0,95-0,33		61	-	300-380
0	528	2,63	2	61	-	255



FACHADAS

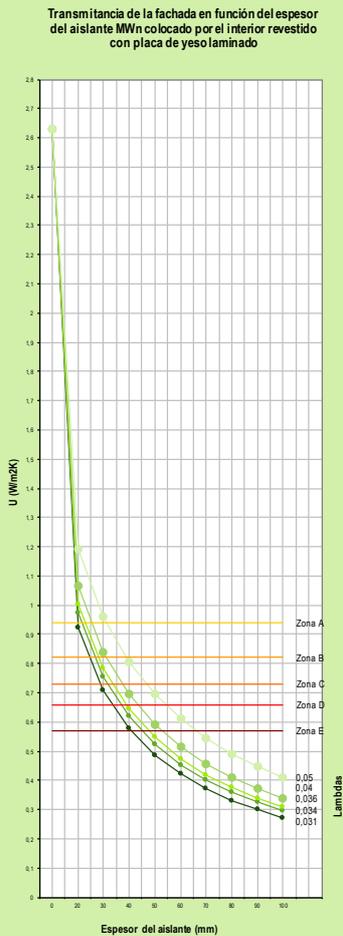
MJ-FC12c07 MWn



MEJORA

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante por el interior/ Sin cámara de aire ventilada/ Una hoja



CONDICIONES DE LOS COMPONENTES EXTERIORES		CONDICIONES DE LA BARRERA			
Condiciones del acabado	Condiciones de la hoja soporte	aB	B1	B2	B3
CV	C1	1	2	3	5
	C2	2	3	4	5
R1	C1	2	3	4	5
	C2	3	4	5	5
R2	C1	4	5	5	5
R3	C1	5	5	5	5

Observaciones:
En regímenes higrotérmicos severos debe considerarse la necesidad de una barrera de vapor, que debe incorporarse al material aislante o bien el soporte.

REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica Permite sanear los muros de fábrica cuando éstos presentan defectos. Permite el retranqueo de la carpintería favoreciendo la protección frente al sol en las estaciones más calurosas.	No se eliminan los puentes térmicos existentes en la fachada original. Puede existir riesgo de condensaciones. No se aprovecha la inercia térmica del cerramiento.
	Económica Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica. Las lanas minerales son uno de los aislantes térmicos que más económico resulta por m2.	
	Ejecución Puede aplicarse a cualquier tipo de soporte. El proceso de instalación es rápido. Se puede aplicar individualmente a cada vivienda. No es necesario el consentimiento de la comunidad.	Zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos deben volverse a colocar. No hay posibilidad de crear rozas para instalaciones con posterioridad a su instalación.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio Por su naturaleza inorgánica, las lanas minerales son incombustibles y presentan un alto grado de resistencia al paso del calor, disminuyendo el riesgo de incendio.	
HABITABILIDAD	Salubridad Las Lanas Minerales que disponen del certificado de EUCER, garantizan que los productos de Lana Mineral cumplen con la legislación europea de salud y seguridad.	
	Protección frente al ruido	El aislante no se comporta como un buen material absorbente acústico ya que presenta una superficie limitada, y tampoco puede actuar como absorbente elástico de masa.
	Ahorro de energía Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	En viviendas de 1ª residencia en las que se hace un uso continuado de los espacios, esta solución aporta poca inercia térmica. En consecuencia las condiciones térmicas son menos estables.
FUNCIONALIDAD	Dimensiones de los espacios Se pierde menos superficie útil que en la solución de aislamiento por el interior mediante perfiles metálica.	Se pierde superficie útil de la vivienda. Para reducir los puentes térmicos se debe aplicar aislamiento en el primer metro de la cara inferior del forjado.
OTROS	Durabilidad La lana mineral tiene una vida útil superior a 25 años. Las soluciones por el interior permiten un mejor mantenimiento lo que aumenta la vida útil.	
	Sostenibilidad Las lanas minerales son considerados como "residuos no peligrosos", siguiendo los criterios establecidos en el listado europeo de residuos.	El coste energético de producción de las lanas minerales supera a otros materiales aislantes con conductividades similares. Las lanas minerales no se pueden reciclar ni son biodegradables.
	Apariencia estética La apariencia exterior no se modifica. Posibilita la rehabilitación del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura.	

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN ID-FC01c04

LESIONES

INTERVENCIÓN

MANTENIMIENTO

11.1 Muros doble hoja con distinta posición de aislante

TIPO FC02	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Ladrillo cerámico perforado doble	0,115	0,67	1140	1000
Cámara de aire vertical	0,05	0,57	1000	1150
Ladrillo cerámico hueco simple	0,04	0,44	1000	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
U= 1,20 (W/m2•K)				
TIPO FC02EXT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Revoco	0,015	1,8	2100	1000
Poliestireno expandido	0,06	0,029	30	1000
Ladrillo cerámico perforado doble	0,115	0,67	1140	1000
Cámara de aire vertical	0,05	0,57	1000	1150
Ladrillo cerámico hueco simple	0,04	0,44	1000	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
U= 0,34 (W/m2•K)				
TIPO FC02MED	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Ladrillo cerámico perforado doble	0,115	0,67	1140	1000
Poliestireno expandido	0,05	0,029	30	1000
Ladrillo cerámico hueco simple	0,04	0,44	1000	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
U= 0,40 (W/m2•K)				
TIPO FC02INT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Ladrillo cerámico perforado doble	0,115	0,67	1140	1000
Cámara de aire vertical	0,05	0,57	1000	1150
Ladrillo cerámico hueco simple	0,04	0,44	1000	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
Lana mineral	0,06	0,031	40	1000
Placa de yeso laminado	0,015	25	900	1000
U= 0,36 (W/m2•K)				

Figura53. Valores de las distintas componentes de las variaciones de la solución constructiva FC02 Fuente: Elaboración propia

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Sin aislante/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas

CARACTERÍSTICAS

Constructivas

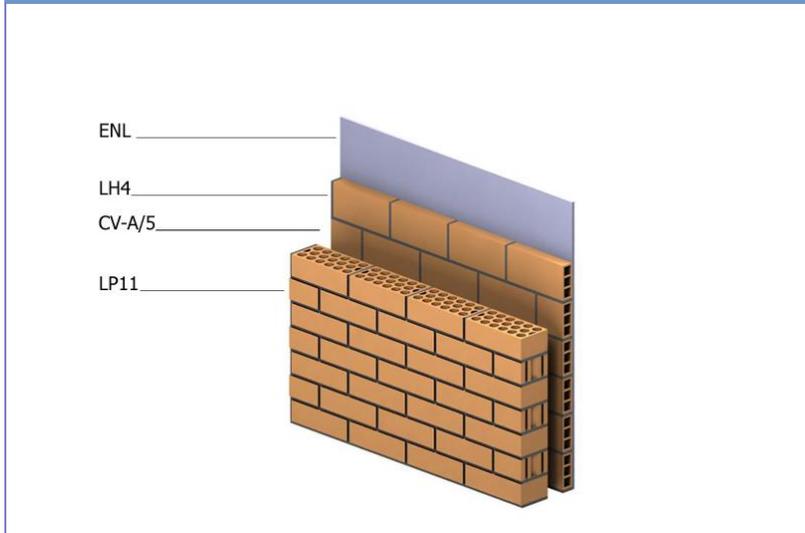
Fachada formada por dos hojas de obra de fábrica: la exterior de ladrillo cerámico perforado de 115 mm cara vista y la interior de ladrillo cerámico hueco simple enlucido con yeso. Entra las dos hojas existe una cámara de aire no ventilada.

Históricas

En los años setenta las estructuras porticadas crecen en altura a la vez que aumentan las luces a 4-5 metros. Los paños de fachadas pierden espesor y la hoja exterior se coloca semivolada con medio pie de espesor para aislar térmicamente el forjado. La hoja interior pasa a ser revocada para protegerla de la humedad generada por la disminución de espesor de la hoja exterior.

No era costumbre diseñar juntas de movimiento entre cerramiento y estructura. La hoja exterior se construye semiempotrada en el pórtico, que impide su movimiento pero soporta la acción del viento.

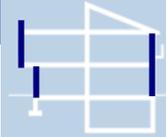
DETALLE



LEYENDA

		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado doble de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Masa M (kg/m ²)	Transmitancia U (W/m ² k) Actual	Exigible según CTE					Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Espesor E (mm)
			A	B	C	D	E			
	185	1,43	0,94	0,82	0,73	0,66	0,57	2	44	220



FACHADAS

ID-FC04b01



IDENTIFICACIÓN

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA CON REVESTIMIENTO CONTINUO:

Aislante por el exterior/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico del cerramiento.

Descripción

Consiste en la aplicación, sobre la superficie exterior de la fachada existente, de las planchas de EPS, que van después revestidas por una capa protectora y de acabado ejecutada con morteros especiales por instaladores cualificados.

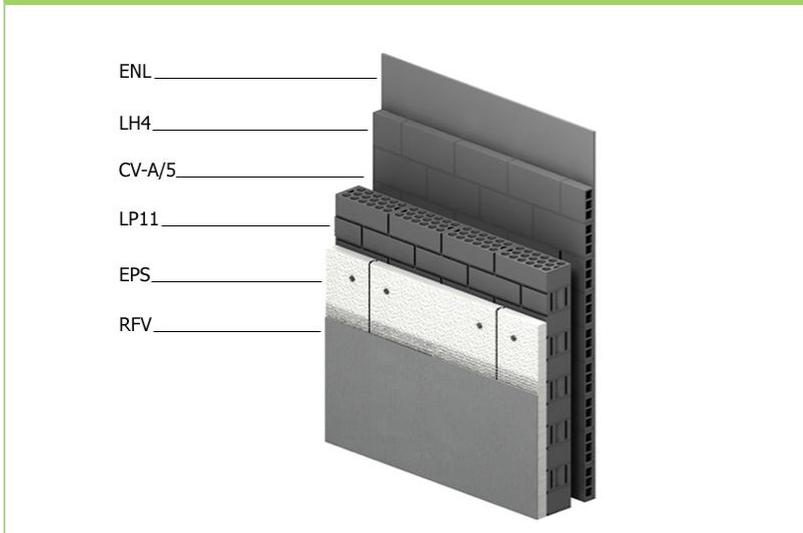
Ejecución

- Fijar el aislamiento al muro soporte mediante adhesivo previa limpieza. No se recomienda utilizar fijaciones mecánicas, pues supone riesgo de humedades.
- Colocación de la armadura (mallas de fibra de vidrio) embebida en el enlucido base.
- Colocación de angulares en arranque y esquinas como protección.
- Aplicación de una capa reguladora de fondo y del revestimiento de acabado y sellado de juntas.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de fachadas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

DETALLE



LEYENDA		Espesor
RFV	Revoco y adhesivo cementoso armado con malla de fibra de vidrio	5
EPS	Poliestireno expandido	Variable
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

Espesor aislante (mm) (±0,037)	Masa	Transmitancia	Grado de impermeabilidad	Índice global de reducción acústica	Precio orientativo	Espesor
	M (kg/m ²)	U (W/m ² k)	GI (1-5)	R (dBA)	(€/m ²)	E (mm)
60	192	0,43	4	45	53,07	285
50		0,49			51,77	275
40		0,56			50,47	265
20-100		0,80-0,29			-	245-325
0	185	1,43	2	44	-	220



MJ-FC02b01 EPS

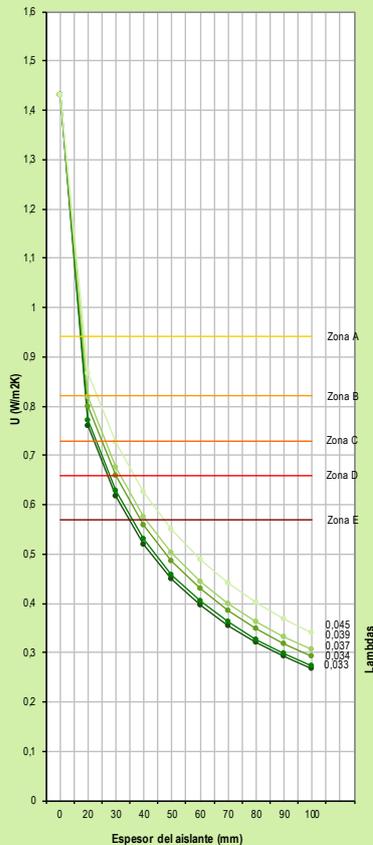


MEJORA

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA CON REVESTIMIENTO DISCONTINUO:

Aislante por el exterior / Con cámara de aire ventilada / Dos hojas

Transmitancia de la fachada en función del espesor del aislante EPS colocado por el exterior y revestido



CONDICIONES DE LOS COMPONENTES EXTERIORES		CONDICIONES DE LA BARRERA			
Condiciones del acabado	Condiciones de la hoja soporte	sB	B1	B2	B3
CV	C1	1	2	3	5
	C2	2	3	4	5
R1	C1	2	3	4	5
	C2	3	4	5	5
R2	C1	4	5	5	5
R3	C1	5	5	5	5

Observaciones:
 Solución no apta para bajas temperaturas porque los materiales de fijado y morteros no pueden curar correctamente.
 Este tipo de sistemas requieren el asesoramiento de empresas fabricantes e instaladoras especializadas, de modo que se garantice la compatibilidad de todos los productos.
 A tal fin, algunos Institutos de Construcción proporcionan para tales sistemas constructivos los llamados Documentos de Idoneidad Técnica (DIT) o Documentos de Idoneidad Técnica Europea (DITE).
 Los cables eléctricos enfundados en PVC no deben entrar en contacto con el aislamiento de poliestireno, ya que puede degradar la integridad del recubrimiento de cables.
 El caso de placas de poliestireno fijadas mediante adherencia se limita a una altura de 22 metros, para edificios mayores se deben fijar mediante ensambladura en espiga.

	REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica	Se corrigen los puentes térmicos, de modo que se evitan las paredes "frías" y el riesgo de formación de condensaciones superficiales e, incluso, moho. Se aprovecha la inercia térmica del soporte.	La hoja principal ha de ser suficientemente resistente para poder recibir los anclajes. Precisa el diseño de todos aquellos elementos que deban adaptarse al nuevo grueso de la fachada.
	Económica	Bajo coste de producción (puede llegar a costar la mitad que una fachada transventilada). Solución más rentable para reparar lesiones. La rentabilidad es proporcional al nº de alturas.	Resulta una solución más costosa que el aislamiento por el interior. No es rentable para edificios de baja altura.
	Ejecución	La utilización de un sistema compuesto implica una ejecución más rápida y limpia. No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención.	En necesario montar andamios. Tiene mucho impacto estético. Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos. No se puede aplicar el revestimiento en situaciones de bajas temperaturas.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio	Durante su combustión, el EPS libera energía (40MJ/kg), CO, CO2 y una mínima cantidad de cenizas, pero no genera ningún gas nocivo a base de cloro ni cianuro.	El EPS recubierto por una capa de mortero de 15 cm. De espesor obtiene la clasificación B, s1do (en una escala de la A a la F) según la norma UNE-EN 13501-1.
HABITABILIDAD	Salubridad	El DB-HS1 considera una barrera de resistencia alta a la filtración un aislante no hidrófilo dispuesto por el exterior de la hoja principal.	
	Protección frente al ruido		El aislante no se comporta como un buen material absorbente acústico ya que presenta una superficie limitada, y tampoco puede actuar como absorbente elástico de masa.
	Ahorro de energía	Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	
AD	Dimensiones de los espacios	Instalado el aislamiento sobre las fachadas, no se reduce la superficie útil del edificio o vivienda. Al no existir cámara de aire se reduce el espesor de la solución.	
OTROS	Durabilidad	Una intervención de estas características incrementa la vida útil de la fachada y por lo tanto del edificio. El EPS tiene una vida útil superior a 25 años.	Se debe tener en cuenta la fuerza del viento, ya que ésta afecta a la estabilidad de la solución. Por ello no es recomendable en edificios de gran altura.
	Sostenibilidad	La conservación de las propiedades térmicas favorece el ahorro energético.	Solución muy difícil de separar para su reciclado. El coste energético de producción del EPS es de los más altos de los aislantes, además no es biodegradable.
	Apariencia estética	Se renueva la apariencia estética de la fachada.	Diseño limitado debido al recubrimiento exterior y la existencia de juntas. En edificios con un grado de protección como parte del patrimonio histórico-artístico, será muy difícil intervenir.

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN	ID-FC04b01
LESIONES	
INTERVENCIÓN	
MANTENIMIENTO	

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante intermedio/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico del cerramiento.

Descripción

Consiste en la inyección del aislante térmico en el interior de la cámara de aire existente bien por el exterior de la fachada bien por el interior.

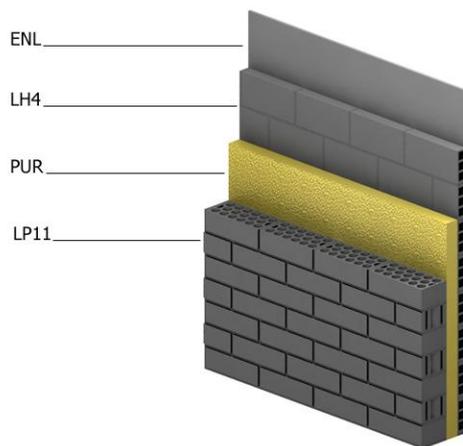
Ejecución

- Revisión de las paredes por si existen grietas, defectos en las juntas o humedades.
- Comprobar la continuidad de la cámara y la existencia de cableados interiores.
- Realizar los taladros, distanciados como máximo 50 cm y nunca situados en la misma vertical.
- Proceder a la inyección de la cámara debiendo comenzar por los taladros situados en la parte inferior, llenando la cámara de abajo a arriba lentamente.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de fachadas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

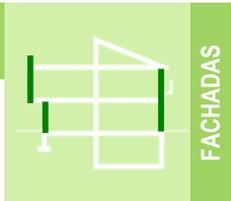
DETALLE



LEYENDA

		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
PUR	Espuma rígida de poliuretano	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco doble de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15

Espesor aislante (mm) (=0,038)	Masa M (kg/m ²)	Transmitancia U (W/m ² k)	Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Precio orientativo (€/m ²)	Espesor E (mm)
60	185	0,48	2	44	-	230
50		0,54			8,14	220
40		0,64			-	210
20-100		0,96-0,32			-	190-270
0	185	1,43	2	44	-	220



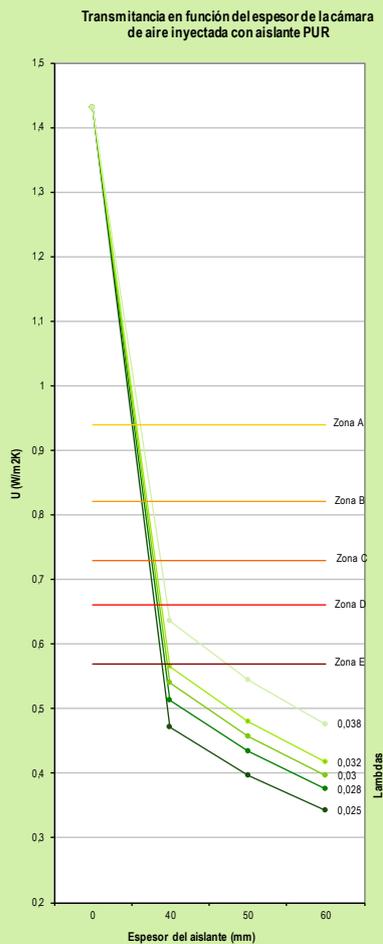
MJ-FC05b01 PUR



MEJORA

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante intermedio/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas



CONDICIONES DE LOS COMPONENTES EXTERIORES		CONDICIONES DE LA BARRERA			
Condiciones del acabado	Condiciones de la hoja soporte	sB	B1	B2	B3
CV	C1	1	2	3	5
	C2	2	3	4	5
R1	C1	2	3	4	5
	C2	3	4	5	5
R2	C1	4	5	5	5
R3	C1	5	5	5	5

Observaciones:
 Existen dos sistemas de obtención: La proyección, que consiste en la pulverización al unísono de los dos componentes sobre una superficie y la colada, en la que se mezclan físicamente por batido.
 Se debe recurrir a este tipo de solución cuando queden descartadas otras posibilidades de proyección.
 En ningún caso con este sistema se puede garantizar la impermeabilización del cerramiento.

REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica	La presencia de instalaciones dificulta su aplicación. No aplicable cuando la función de la cámara de aire sea ventilar el muro. Esta solución conlleva la creación de numerosos puentes térmicos.
	Económica	Ausencia de enfoscado, costes indirectos bajos.
	Ejecución	No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención. Se requiere más especialización por parte del aplicador. Requiere un control de obra muy intenso. Se debe prever la expansión del PUR pues puede provocar lesiones en la hoja interior.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio	La espuma rígida de poliuretano es un material combustible. Existen espumas de poliuretano clasificadas desde C,s3-d0 (-M f) hasta E (-M 3), según UNE-EN 13501 (UNE 23727).
HABITABILIDAD	Salubridad	El factor de resistencia al paso de vapor de agua del PUR es cercano a 1. En función de las condiciones climáticas y la hoja principal, puede existir riesgo de condensaciones.
	Protección frente al ruido	El aislante no se comporta como un buen material absorbente acústico ya que presenta una superficie limitada, y tampoco puede actuar como absorbente elástico de masa.
FUNCIONALIDAD	Ahorro de energía	Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.
	Dimensiones de los espacios	No se pierde superficie útil de la vivienda.
OTROS	Durabilidad	El PUR tiene una vida útil superior a 25 años. El aislamiento no es accesible para operaciones de inspección y mantenimiento.
	Sostenibilidad	La conservación de las propiedades térmicas favorece el ahorro energético. El coste energético de producción del PUR supera con creces a otros materiales aislantes con conductividades similares. El PUR no se puede reciclar ni es biodegradable.
	Apariencia estética	Tiene baja repercusión en la apariencia estética del edificio. Para reducirla al máximo es conveniente proyectar desde el interior.

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN	ID-FC04b01
LESIONES	
INTERVENCIÓN	
MANTENIMIENTO	

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante por el interior/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico del cerramiento.

Descripción

Consiste en el trasdosado directo por el interior de la fachada existente con un panel constituido por aislante y placa de yeso laminado.

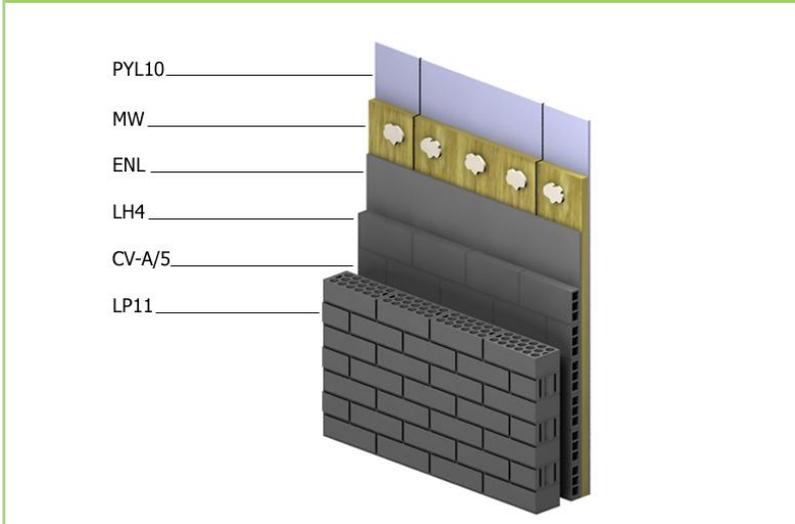
Ejecución

- Limpieza y preparación del soporte: zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos.
- Aplicación de pelladas de pasta de agarre directamente sobre el panel constituido por aislante y placa de yeso laminado.
- Se instala el panel sobre la pared presionandolo bien de manera que quede completamente fijo.
- Recolocación de zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de fachadas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

DETALLE



LEYENDA

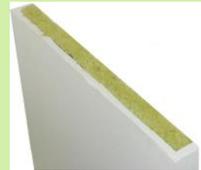
		Espesor
LP11	Ladrillo cerámico perforado de 115 mm	115
CV-A/5	Cámara de aire vertical de 50 mm. Grado de ventilación caso A	50
LH4	Ladrillo cerámico hueco simple de 40 mm	40
ENL	Enlucido de yeso	15
MW	Lana mineral	Variable
PYL10	Placa de yeso laminado	10

Espesor aislante (m) (=0.04)	Masa M (kg/m2)	Transmitancia U (W/m2k)	Grado de impermeabilidad GI (1-5)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Precio orientativo (€/m2)	Espesor E (mm)
70	194	0,4	2	45	44,57	300
50		0,5		45	40,59	280
40		0,57		45	36,97	270
20-100		0,81-0,31		-	-	250-330
0	185	1,43	2	44	-	220



FACHADAS

MJ-FC15b01 MW



MEJORA

HOJA PRINCIPAL DE FÁBRICA VISTA:

Aislante por el interior/ Sin cámara de aire ventilada/ Dos hojas



CONDICIONES DE LOS COMPONENTES EXTERIORES		CONDICIONES DE LA BARRERA			
Condiciones del acabado	Condiciones de la hoja soporte	sB	B1	B2	B3
CV	C1	1	2	3	5
	C2	2	3	4	5
R1	C1	2	3	4	5
	C2	3	4	5	5
R2	C1	4	5	5	5
R3	C1	5	5	5	5

Observaciones:

En regímenes higrotérmicos severos debe considerarse la necesidad de una barrera de vapor, que debe incorporar el material aislante o bien el soporte.
Se recomienda para esta solución los paneles semirrígidos de lana de vidrio o lana de roca, ya sean suministrados en forma de panel o de panel enrollado.

	REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica	Permite sanear los muros de fábrica cuando éstos presentan defectos. Permite el retranqueo de la carpintería favoreciendo la protección frente al sol en las estaciones más calurosas.	No se eliminan los puentes térmicos existentes en la fachada original. Puede existir riesgo de condensaciones. No se aprovecha la inercia térmica del cerramiento.
	Económica	Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica.	
	Ejecución	Puede aplicarse a cualquier tipo de soporte; El proceso de instalación es rápido. Se puede aplicar individualmente a cada vivienda, no es necesario el consentimiento de la comunidad.	Zócalos, marcos de puertas y accesorios eléctricos deben volverse a colocar. No hay posibilidad de crear rozas para instalaciones con posterioridad a su instalación.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio	Por su naturaleza inorgánica, la lanas minerales son incombustibles y presentan un alto grado de resistencia al paso del calor, disminuyendo el riesgo de incendio.	
HABITABILIDAD	Salubridad	Las Lanas Minerales que disponen del certificado de EUCEB, garantizan que los productos de Lana Mineral cumplen con la legislación europea de salud y seguridad.	
	Protección frente al ruido	Si se siguen las indicaciones del catálogo del CTE, utilizando un espesor de aislante de 30 cm se incrementa el índice de reducción acústica en 5 decibelios.	
	Ahorro de energía	Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	En viviendas de 1ª residencia en las que se hace un uso continuado de los espacios, esta solución aporta poca inercia térmica. En consecuencia las condiciones térmicas son menos estables.
FUNCIONALIDAD	Dimensiones de los espacios		Se pierde superficie útil de la vivienda. Para reducir los puentes térmicos se debe aplicar aislamiento en el primer metro de la cara inferior del forjado.
	Durabilidad	La lana mineral tiene una vida útil superior a 25 años. Las soluciones por el interior permiten un mejor mantenimiento lo que aumenta la vida útil.	
OTROS	Sostenibilidad	Las lanas minerales son considerados como "residuos no peligrosos", siguiendo los criterios establecidos en el listado europeo de residuos.	El coste energético de producción de las lanas minerales supera a otros materiales aislantes con conductividades similares. Las lanas minerales no se pueden reciclar ni son biodegradables.
	Apariencia estética	La apariencia exterior no se modifica. Posibilita la rehabilitación del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura.	

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN ID-FC04b01

LESIONES

INTERVENCIÓN

MANTENIMIENTO

11.2 Cubierta con distintas posiciones de aislante

TIPO QB01	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Baldosa cerámica de 20 mm	0,02	1	2000	800
Mortero de agarre	0,02	1,8	2100	1000
Capa de impermeabilización	0,005	0,17	1390	900
Hormigon áridos ligeros	0,1	1,5	2000	1000
Forjado unidireccional	0,2	0,9	1220	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
U= 1,20 (W/m2•K)				
TIPO QB01EXT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Baldosa hormigón	0,035	1,35	1900	1000
Aislamiento XPS	0,06	0,034	37,5	1000
Capa separadora	0,02	0,05	120	1300
Capa de impermeabilización	0,005	0,17	1390	900
Hormigon áridos ligeros	0,1	1,5	2000	1000
Forjado unidireccional	0,2	0,9	1220	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
U= 0,33 (W/m2•K)				
TIPO QB01INT	Espesor	Conductividad	Densidad	Calor específico
Componentes	E (m)	λ (W/ (m•K))	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)
Baldosa cerámica de 20 mm	0,02	1	2000	800
Mortero de agarre	0,02	1,8	2100	1000
Capa de impermeabilización	0,005	0,17	1390	900
Hormigon áridos ligeros	0,1	1,5	2000	1000
Forjado unidireccional	0,2	0,9	1220	1000
Enlucido de yeso	0,015	0,031	40	1000
Cámara de aire	0,1	0,27	0,85	1000
Lana mineral	0,06	0,031	40	1000
Placa de yeso laminado	0,015	25	900	1000
U= 0,31 (W/m2•K)				

Figura54. Valores de las distintas componentes de las variaciones de la solución constructiva QB01 Fuente: Elaboración propia

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE CON SOLADO FIJO:

Sin aislante/ No ventilada

CARACTERÍSTICAS

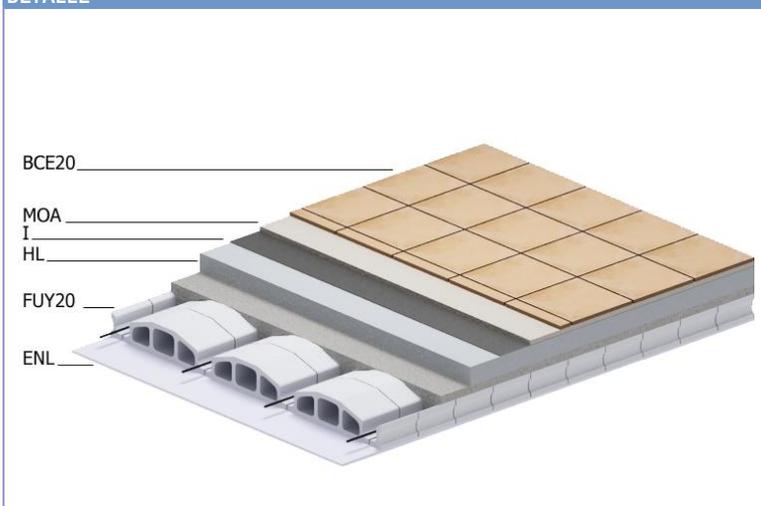
Constructivas

Cubierta plana cuyo elemento estructural es un forjado horizontal unidireccional de hormigón armado sin capa de compresión y aligerado mediante bovedillas de yeso con 200 mm de canto total. Sobre el forjado se dispone una formación de pendientes de hormigón aligerado, una capa de impermeabilización, mortero de agarre y un pavimento cerámico.

Históricas

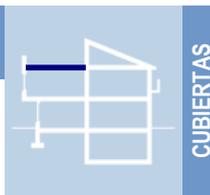
Hasta los años cuarenta las cubiertas planas eran generalmente cubiertas planas de dos hojas, con la superior descansando sobre tabiquillos palomeros, cubiertas conocidas como "a la catalana". En los años cuarenta, la aparición de hormigones aligerados, permite introducir un cuerpo aislante que sustituye a las cámaras de aire de las cubiertas "a la catalana". La cubierta plana que hasta el momento era de dos hojas, pasa a ser de una sola hoja multicapa: forjado horizontal, hormigón aislante y de pendiente, membrana impermeabilizante y protección. Las bovedillas de yeso indican que el forjado se construyó entre los años 1940 y 1960.

DETALLE



LEYENDA		Espesor
BCE20	Baldosa cerámica de 20 mm	20
MOA	Mortero de agarre	20
I	Capa de impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entrevigado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Masa M (kg/m ²)	Transmitancia U (W/m ² k) Actual	Exigible según CTE					Índice global de reducción acústica R (dBA)	Nivel global presión ruido R (dB)	Espesor E (mm)
			A	B	C	D	E			
	457	1,37	0,50	0,45	0,41	0,38	0,35	59	76	360



ID-QB04a01



IDENTIFICACIÓN

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE CON SOLADO FIJO:

Aislante por el exterior/ No ventilada/ Invertida

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico de la cubierta.

Descripción

Consiste en la colocación de impermeabilizante, en caso de ausencia o deterioro del preexistente, y de un pavimento filtrante aislante (compuesto por 35mm de hormigón y aislante XPS de espesor variable entre 40 y 60 mm), generándose de esta forma una cubierta invertida, tipología recomendable para climas cálidos y secos.

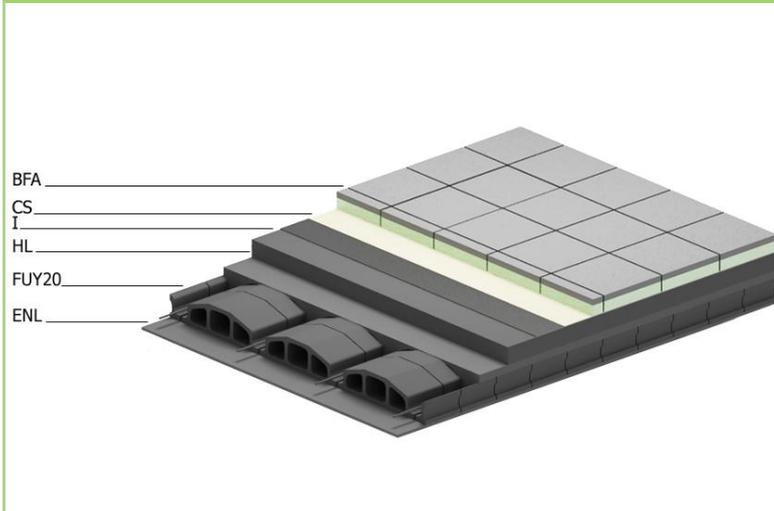
Ejecución

- Retirar las capas de protección, mortero y solera de mortero, hasta la impermeabilización.
- Comprobar el estado de la impermeabilización y reponerla en caso necesario.
- Colocar la capa separadora como protección de la impermeabilización.
- Colocar el pavimento, baldosa filtrante aislante. Ejecución en seco, sin material de agarre.
- No necesita juntas de pavimento por ser una baldosa flotante.

Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de cubiertas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

DETALLE



LEYENDA		Espesor
BFA	Baldosa filtrante aislante (hormigón + XPS)	35+variable
CS	Capa separadora	1
I	Impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entrevigado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15

Espesor aislante λ (mm) (-0,034)	Masa M (kg/m2)	Transmitancia U (W/m2k)	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Nivel global presión ruido R (dB)	Precio (€/m2)	Espesor E (mm)
60	449	0,4	58	77	66,43	416
50		0,46			64,13	406
40		0,53			62,07	396
-		-			-	-
0	457	1,37	59	76	-	360



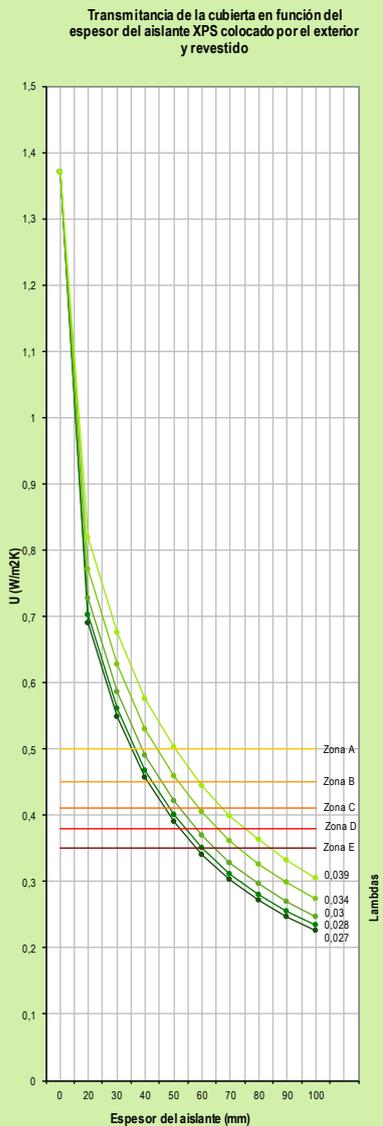
CUBIERTAS

MJ-QB09a01 XPS



MEJORA

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE CON SOLADO FIJO:
Aislante por el exterior/ No ventilada/ Invertida



Observaciones:
Se debe analizar previamente el estado de la impermeabilización, aunque con el sistema de cubierta invertida se alargue la vida de la membrana hay que comprobar que no existe ningún daño anterior a la instalación del aislamiento.
Los cables eléctricos enfundados en PVC no deben entrar en contacto con el aislamiento de poliestireno, ya que puede degradar la integridad del recubrimiento de cables.

REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES	
VIABILIDAD	Técnica	Se consigue aislamiento, pavimentación y protección de la impermeabilización con una sola pieza, se reduce el espesor y el peso de la solución. Al ser cubierta invertida se evitan condensaciones.	Debe comprobarse la capacidad portante de la estructura original para soportar carga adicional. Habrá que tener en cuenta los aspectos de drenaje y encuentros con elementos de la cubierta.
	Económica	Al ser un pavimento registrable, si hay que reparar lesiones en el exterior de la cubierta, la intervención es más rápida y económica.	Es de las soluciones más caras del mercado para aislar una cubierta plana. La opción de realizar una cubierta invertida no transitable resulta más económica.
	Ejecución	No es necesario desalojar las viviendas para realizar la intervención. La instalación del pavimento es directa sobre la protección y sin material de agarre.	Se necesita el consentimiento de la comunidad de vecinos.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio		Los productos de XPS suelen estar clasificados, de acuerdo con la norma UNE EN 13501-1, como Euroclase E en una escala de A a F. Es un producto inflamable.
HABITABILIDAD	Salubridad	Pavimento con gran capacidad filtrante, la cubierta nunca se inunda, ya que se drena el agua gradualmente.	
	Protección frente al ruido		El aislante no se comporta como un buen material absorbente acústico ya que presenta una superficie limitada, y tampoco puede actuar como absorbente elástico de masa.
FUNCIONALIDAD	Ahorro de energía	Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	
	Dimensiones de los espacios	No se reduce la altura útil del bajo cubierta.	
OTROS	Durabilidad	Una intervención de estas características incrementa la vida útil de la cubierta y por lo tanto del edificio. El XPS tiene una vida útil superior a 25 años.	La durabilidad de la cubierta en su conjunto dependerá de su año de construcción y estado de conservación.
	Sostenibilidad	La conservación de las propiedades térmicas favorece el ahorro energético.	El coste energético de producción del XPS supera con creces a otros materiales aislantes con conductividades similares. El XPS no se puede reciclar ni es biodegradable.
	Apariencia estética	El acabado de la solución es hormigón, esto supone un mantenimiento más fácil y por tanto una mejor apariencia estética.	

FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN	ID-QB04a01
LESIONES	
INTERVENCIÓN	
MANTENIMIENTO	

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE CON SOLADO FIJO:

Aislante por el interior/ No ventilada



CUBIERTAS

CARACTERÍSTICAS

Objetivo

Mejorar el comportamiento térmico del cerramiento.

Descripción

Consiste en la colocación de placas de yeso laminado fijadas sobre maestras metálicas suspendidas de la cubierta (forjado), situándose en la cavidad o cámara intermedia lana mineral.

Ejecución

- Limpieza y/o preparación del soporte.
- Fijación de las maestras suspendidas del forjado mediante horquillas de presión, varillas roscadas y tacos de expansión en viguetas, y tacos de expansión o de balancín para bovedillas.
- Colocación de los paneles semirígidos o mantas apoyados sobre las maestras.
- Ejecución del aplacado de yeso laminado fijando a maestras distanciadas entre ejes a 600 mm.

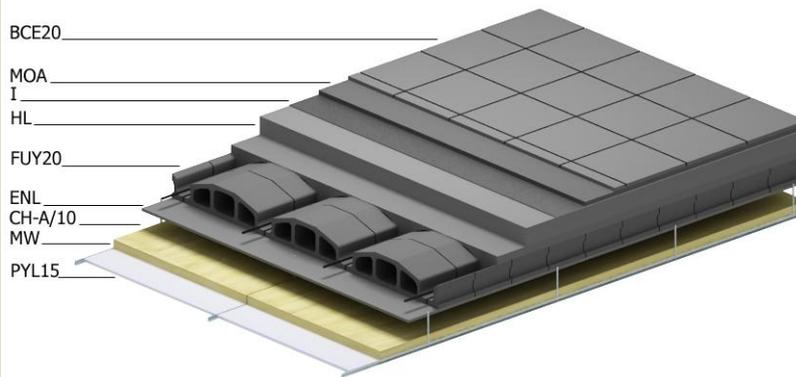
Documentos de apoyo

Pliego General de Condiciones Técnicas en la Edificación, Cartillas de obra de cubiertas, Base de Datos de Construcción C.Valenciana, CTE, Libro de uso y mantenimiento del edificio, Pruebas de Servicio de edificios

MJ-QB14a02 MW



DETALLE



LEYENDA

		Espesor
BCE20	Baldosa cerámica	20
MOA	Mortero de agarre	20
I	Impermeabilización	5
HL	Hormigón áridos ligeros	100
FUY20	Forjado unidireccional entreligado yeso 200 mm	200
ENL	Enlucido de yeso	15
CH-A/10	Cámara de aire horizontal de 100 mm Grado de ventilación Caso A	100
MW	Lana mineral	Variable
PYL15	Placa de yeso laminado	15

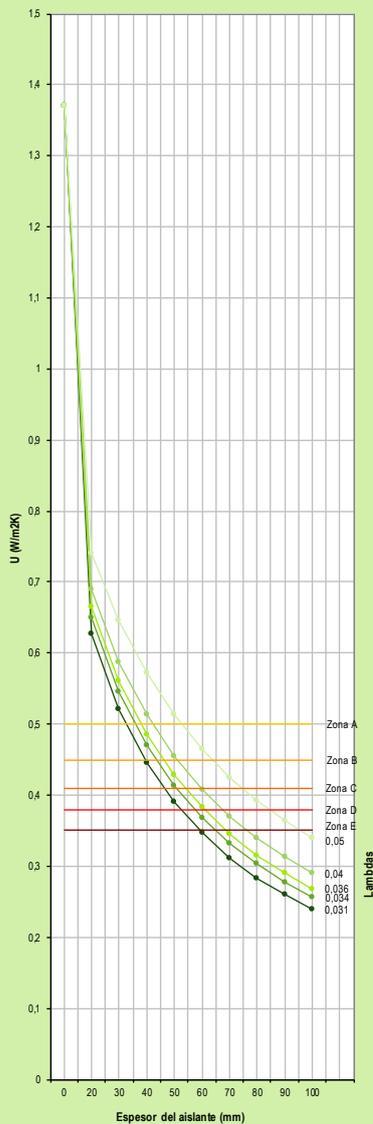
Espesor aislante A (mm) (=0,034)	Masa	Transmitancia	Índice global de reducción acústica R (dBA)	Nivel global presión ruido R (dB)	Precio	Espesor
	M (kg/m ²)	U (W/m ² k)			(€/m ²)	E (mm)
100	471	0,26	64	71	45,78	575
80		0,3			43,19	555
60		0,37			40,62	535
20-100		0,65-0,26			-	495-575
0	457	1,37	59	76	-	360

MEJORA

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE CON SOLADO FIJO:

Aislante por el interior/ No ventilada

Transmitancia de la cubierta en función del espesor del aislante MWn colocado por el interior revestido con placa de yeso laminado



Observaciones:
En regímenes higrotérmicos severos debe considerarse la necesidad de una barrera de vapor, que debe incorporarse al material aislante o bien el soporte.

	REQUISITO	VENTAJAS	INCONVENIENTES
VIABILIDAD	Técnica		No es una solución adecuada cuando es necesario efectuar trabajos de impermeabilización o modificación de la cubierta externa del edificio. Existe riesgo de condensaciones.
	Económica	Comparativamente con la solución de aislamiento por el exterior resulta más económica.	
	Ejecución	Montaje rápido por vía seca, permitiendo la habitabilidad durante la ejecución. No es imprescindible el consentimiento de la comunidad. Evita el levantamiento de la cubrición.	Debe disponerse de una altura mínima de aproximadamente 10 cm. Para facilitar el montaje de los sistemas de anclaje y su nivelación.
SEGURIDAD	Seguridad en caso de incendio	Por su naturaleza inorgánica, las lanas minerales son incombustibles y presentan un alto grado de resistencia al paso del calor, disminuyendo el riesgo de incendio.	
HABITABILIDAD	Salubridad	Las Lanas Minerales que disponen del certificado de EUCEB, garantizan que los productos de Lana Mineral cumplen con la legislación europea de salud y seguridad.	
	Protección frente al ruido	Aporta una mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo del cerramiento y una reducción del ruido de impactos, dato importante al tratarse de una cubierta plana transitable.	
	Ahorro de energía	Se mejora el comportamiento térmico del cerramiento reduciendo las pérdidas y disminuyendo a su vez de forma indirecta las emisiones de CO2 a la atmósfera.	
FUNCIONALIDAD	Dimensiones de los espacios		Debe disponerse de una altura mínima de 10 cm. Para facilitar el montaje de los sistemas de anclaje. Se pierde altura útil de la vivienda.
	Durabilidad	La lana mineral tiene una vida útil superior a 25 años. Las soluciones por el interior permiten un mejor mantenimiento lo que aumenta la vida útil.	
OTROS	Sostenibilidad	Las lanas minerales son considerados como "residuos no peligrosos", siguiendo los criterios establecidos en el listado europeo de residuos.	El coste energético de producción de las lanas minerales supera a otros materiales aislantes con conductividades similares. Las lanas minerales no se pueden reciclar ni son biodegradables.
	Apariencia estética	Posibilita la rehabilitación desde el punto de vista estético del interior, conformando una superficie plana y lisa que permite un acabado de pintura, nuevos sistemas de iluminación y/o climatización.	

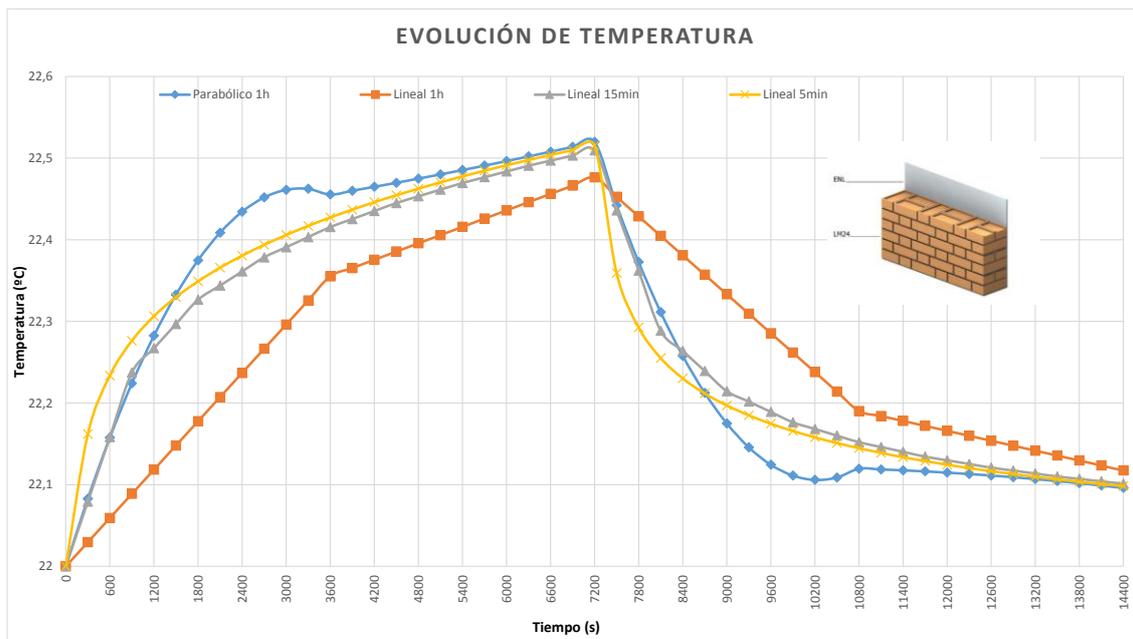
FICHAS VINCULADAS

IDENTIFICACIÓN	ID-QB04a01
LESIONES	
INTERVENCIÓN	
MANTENIMIENTO	

12 Anexo II. Resultados de la modelización

12.1 Resultados modelo fachada FC01

FC01				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0829	22,0296	22,0791	22,1619
600	22,1576	22,0592	22,1582	22,2337
900	22,2241	22,0888	22,2373	22,2763
1200	22,2824	22,1184	22,2671	22,3063
1500	22,3326	22,148	22,2968	22,3297
1800	22,3747	22,1776	22,3265	22,349
2100	22,4085	22,2072	22,3438	22,3657
2400	22,4342	22,2368	22,3611	22,3804
2700	22,4517	22,2664	22,3784	22,3937
3000	22,4611	22,296	22,3908	22,4057
3300	22,4623	22,3256	22,4032	22,4169
3600	22,4553	22,3552	22,4155	22,4272
3900	22,46	22,3653	22,4253	22,4368
4200	22,4648	22,3754	22,4351	22,4459
4500	22,4697	22,3855	22,4449	22,4544
4800	22,4748	22,3956	22,4531	22,4625
5100	22,48	22,4056	22,4613	22,4702
5400	22,4853	22,4157	22,4694	22,4775
5700	22,4907	22,4258	22,4765	22,4845
6000	22,4963	22,4359	22,4835	22,4912
6300	22,502	22,446	22,4906	22,4976
6600	22,5078	22,4561	22,4968	22,5038
6900	22,5137	22,4662	22,503	22,5097
7200	22,5198	22,4763	22,5092	22,5154
7500	22,4422	22,4524	22,4357	22,3591
7800	22,3727	22,4286	22,3621	22,2926
8100	22,3113	22,4047	22,2885	22,2551
8400	22,2578	22,3809	22,2639	22,2302
8700	22,2124	22,3571	22,2392	22,2117
9000	22,1751	22,3332	22,2145	22,1971
9300	22,1457	22,3094	22,2018	22,185
9600	22,1244	22,2855	22,1891	22,1747
9900	22,1112	22,2617	22,1764	22,1658
10200	22,1059	22,2379	22,1683	22,158
10500	22,1088	22,214	22,1601	22,151
10800	22,1196	22,1902	22,152	22,1447
11100	22,1187	22,1841	22,1462	22,139
11400	22,1176	22,1781	22,1403	22,1337
11700	22,1163	22,172	22,1344	22,129
12000	22,1148	22,166	22,1299	22,1245
12300	22,1131	22,1599	22,1254	22,1204
12600	22,1113	22,1538	22,1209	22,1166
12900	22,1092	22,1478	22,1173	22,1131
13200	22,1069	22,1417	22,1137	22,1097
13500	22,1045	22,1357	22,1101	22,1066
13800	22,1019	22,1296	22,1071	22,1037
14100	22,099	22,1236	22,1042	22,1009
14400	22,096	22,1175	22,1012	22,0983



FCO1						
Intervalo	Qconducción (J/m2)				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	842	808	801	-5	41
43200-46800	709	749	720	713	-4	36
46800-50400	633	669	643	637	-4	32
50400-54000	567	598	575	570	-3	28
54000-57600	508	535	515	510	-2	25
57600-61200	455	480	461	457	-2	23
61200-64800	408	430	414	410	-2	20
64800-68400	366	386	371	368	-2	18
68400-72000	328	346	333	330	-2	16
7200-75600	294	311	299	296	-2	15
75600-79200	264	279	268	265	-1	14
79200-82800	237	250	240	238	-1	12
82800-86400	213	224	216	214	-1	10

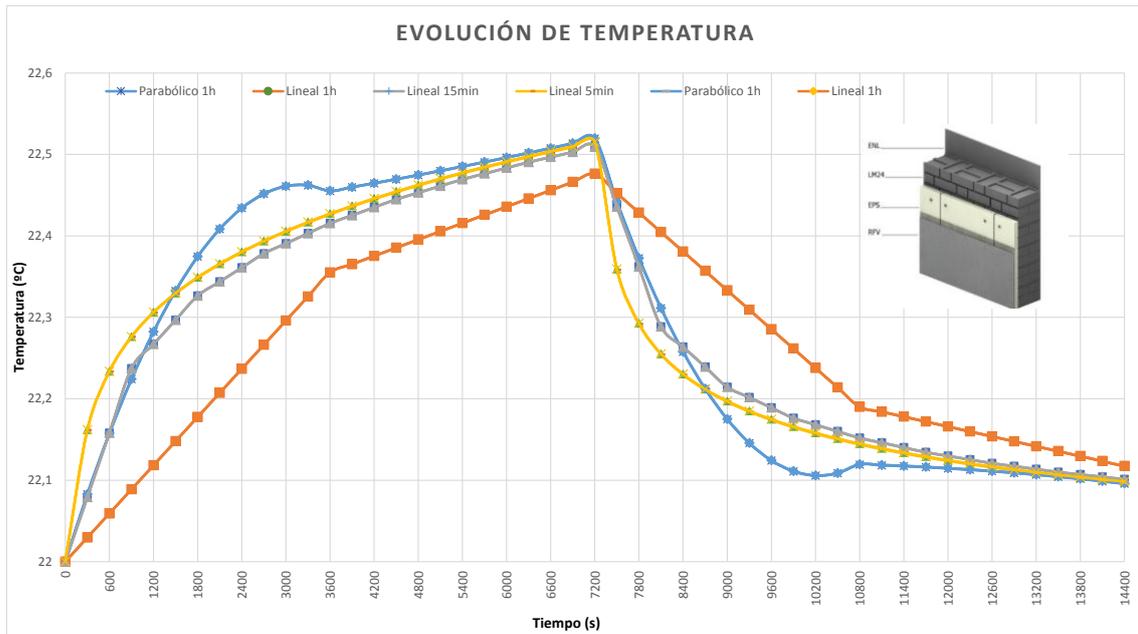
FCO1						
Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-3517	-1918	-3105	-3450	-67	1532
3600-7200	-5249	-4490	-5042	-5135	-114	645
7200-10800	-2411	-3599	-2727	-2439	28	-1160
10800-14400	-1189	-1662	-1329	-1277	88	-385
14400-18000	-905	-1097	-949	-924	19	-173
18000-21600	-716	-826	-742	-728	12	-98
21600-25200	-592	-664	-609	-599	7	-65
25200-28800	-503	-554	-515	-508	5	-46
28800-32400	-435	-473	-444	-439	4	-34
32400-36000	-381	-411	-388	-384	3	-27
36000-39600	-336	-361	-342	-338	2	-23
39600-43200	-298	-319	-303	-300	2	-19
43200-46800	-266	-283	-270	-268	2	-15
46800-50400	-238	-253	-241	-239	1	-14
50400-54000	-213	-226	-216	-214	1	-12
54000-57600	-190	-202	-193	-191	1	-11
57600-61200	-171	-181	-173	-171	0	-10
61200-64800	-153	-162	-155	-154	1	-8
64800-68400	-137	-146	-139	-138	1	-8
68400-72000	-123	-131	-125	-124	1	-7
7200-75600	-110	-117	-112	-111	1	-6
75600-79200	-99	-105	-101	-100	1	-5
79200-82800	-89	-94	-90	-89	0	-5
82800-86400	-80	-85	-81	-80	0	-5

FCO1						
Qradiación (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-5862	-3197	-5175	-5749	-113	2552
3600-7200	-8749	-7483	-8403	-8558	-191	1075
7200-10800	-4019	-5998	-4545	-4065	46	-1933
10800-14400	-1982	-2769	-2214	-2128	146	-641
14400-18000	-1508	-1828	-1581	-1541	33	-287
18000-21600	-1194	-1377	-1237	-1213	19	-164
21600-25200	-987	-1106	-1015	-999	12	-107
25200-28800	-838	-923	-858	-846	8	-77
28800-32400	-725	-788	-740	-731	6	-57
32400-36000	-635	-685	-647	-639	4	-46
36000-39600	-560	-601	-570	-564	4	-37
39600-43200	-497	-532	-506	-500	3	-32
43200-46800	-443	-472	-450	-446	3	-26
46800-50400	-396	-421	-402	-398	2	-23
50400-54000	-354	-376	-360	-356	2	-20
54000-57600	-317	-337	-322	-319	2	-18
57600-61200	-284	-302	-289	-286	2	-16
61200-64800	-255	-271	-259	-256	1	-15
64800-68400	-229	-243	-232	-230	1	-13
68400-72000	-205	-218	-208	-206	1	-12
7200-75600	-184	-195	-187	-185	1	-10
75600-79200	-165	-175	-168	-166	1	-9
79200-82800	-148	-157	-150	-149	1	-8
82800-86400	-133	-141	-135	-134	1	-7

FC01					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-26621	-3517	-5862	36000	0
3600-7200	-22002	-5249	-8749	36000	0
7200-10800	6430	-2411	-4019	0	0
10800-14400	3171	-1189	-1982	0	0
14400-18000	2413	-905	-1508	0	0
18000-21600	1910	-716	-1194	0	0
21600-25200	1579	-592	-987	0	0
25200-28800	1341	-503	-838	0	0
28800-32400	1160	-435	-725	0	0
32400-36000	1016	-381	-635	0	0
36000-39600	897	-336	-560	0	0
39600-43200	796	-298	-497	0	0
43200-46800	709	-266	-443	0	0
46800-50400	633	-238	-396	0	0
50400-54000	567	-213	-354	0	0
54000-57600	508	-190	-317	0	0
57600-61200	455	-171	-284	0	0
61200-64800	408	-153	-255	0	0
64800-68400	366	-137	-229	0	0
68400-72000	328	-123	-205	0	0
7200-75600	294	-110	-184	0	0
75600-79200	264	-99	-165	0	0
79200-82800	237	-89	-148	0	0
82800-86400	213	-80	-133	0	0
					0
				Σ	0
FC01					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-15949	-1918	-5862	36000	12271
3600-7200	-22341	-4490	-8749	36000	420
7200-10800	-4834	-3599	-4019	0	-12452
10800-14400	2979	-1662	-1982	0	-664
14400-18000	2556	-1097	-1508	0	-49
18000-21600	2059	-826	-1194	0	38
21600-25200	1698	-664	-987	0	47
25200-28800	1435	-554	-838	0	43
28800-32400	1236	-473	-725	0	38
32400-36000	1078	-411	-635	0	33
36000-39600	950	-361	-560	0	29
39600-43200	842	-319	-497	0	25
43200-46800	749	-283	-443	0	23
46800-50400	669	-253	-396	0	20
50400-54000	598	-226	-354	0	18
54000-57600	535	-202	-317	0	16
57600-61200	480	-181	-284	0	14
61200-64800	430	-162	-255	0	13
64800-68400	386	-146	-229	0	12
68400-72000	346	-131	-205	0	10
7200-75600	311	-117	-184	0	9
75600-79200	279	-105	-165	0	8
79200-82800	250	-94	-148	0	8
82800-86400	224	-85	-133	0	7
				Σ	-63

12.2 Resultados modelo fachada FC01 EXT

FC01 EXT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0828	22,0296	22,0791	22,1616
600	22,1575	22,0592	22,1581	22,2334
900	22,2239	22,0887	22,2372	22,2759
1200	22,2823	22,1183	22,2669	22,3058
1500	22,3324	22,1479	22,2966	22,3292
1800	22,3744	22,1775	22,3263	22,3485
2100	22,4083	22,2071	22,3436	22,3651
2400	22,4339	22,2367	22,3609	22,3798
2700	22,4514	22,2662	22,3781	22,3931
3000	22,4608	22,2958	22,3905	22,4051
3300	22,462	22,3254	22,4029	22,4162
3600	22,455	22,355	22,4153	22,4265
3900	22,4597	22,3651	22,4251	22,4362
4200	22,4645	22,3751	22,4348	22,4452
4500	22,4694	22,3852	22,4446	22,4537
4800	22,4745	22,3953	22,4528	22,4618
5100	22,4797	22,4054	22,461	22,4695
5400	22,485	22,4155	22,4691	22,4768
5700	22,4904	22,4256	22,4762	22,4837
6000	22,496	22,4356	22,4832	22,4904
6300	22,5017	22,4457	22,4903	22,4968
6600	22,5075	22,4558	22,4965	22,503
6900	22,5134	22,4659	22,5027	22,5089
7200	22,5194	22,476	22,5089	22,5146
7500	22,4419	22,4521	22,4353	22,3583
7800	22,3724	22,4283	22,3618	22,2918
8100	22,3109	22,4044	22,2882	22,2543
8400	22,2575	22,3806	22,2635	22,2294
8700	22,2121	22,3567	22,2388	22,2109
9000	22,1747	22,3329	22,2141	22,1962
9300	22,1454	22,3091	22,2014	22,1841
9600	22,1241	22,2852	22,1887	22,1739
9900	22,1108	22,2614	22,1761	22,165
10200	22,1056	22,2375	22,1679	22,1571
10500	22,1084	22,2137	22,1598	22,1501
10800	22,1192	22,1898	22,1516	22,1438
11100	22,1183	22,1838	22,1458	22,1381
11400	22,1172	22,1777	22,1399	22,1329
11700	22,1159	22,1717	22,1341	22,1281
12000	22,1144	22,1656	22,1296	22,1236
12300	22,1127	22,1595	22,1251	22,1195
12600	22,1109	22,1535	22,1205	22,1157
12900	22,1088	22,1474	22,1169	22,1122
13200	22,1066	22,1414	22,1133	22,1088
13500	22,1041	22,1353	22,1097	22,1057
13800	22,1015	22,1292	22,1067	22,1027
14100	22,0986	22,1232	22,1038	22,1
14400	22,0956	22,1171	22,1008	22,0973



FCO1 EXT						
Intervalo	Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min	Diferencia parab 1h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-26627	-15962	-23440	-25343	-1284	9381
3600-7200	-22011	-22351	-22464	-22301	290	-50
7200-10800	6420	-4845	3008	5035	1385	-9880
10800-14400	3160	2968	3450	3381	-221	-413
14400-18000	2401	2544	2495	2449	-48	95
18000-21600	1898	2046	1957	1927	-29	119
21600-25200	1568	1686	1608	1586	-18	100
25200-28800	1334	1425	1362	1346	-12	79
28800-32400	1160	1231	1181	1169	-9	62
32400-36000	1027	1083	1043	1034	-7	49
36000-39600	924	969	937	929	-5	40
39600-43200	842	878	852	846	-4	32
43200-46800	776	806	784	780	-4	26
46800-50400	723	747	729	725	-2	22
50400-54000	678	699	684	680	-2	19
54000-57600	641	659	646	643	-2	16
57600-61200	609	624	613	611	-2	13
61200-64800	582	595	585	583	-1	12
64800-68400	557	569	560	558	-1	11
68400-72000	535	546	538	536	-1	10
7200-75600	516	525	518	517	-1	8
75600-79200	498	506	500	498	0	8
79200-82800	481	489	483	482	-1	7
82800-86400	465	473	467	466	-1	7

FCO1 EXT						
Intervalo	Qconvección (J/m2)				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	-3515	-1917	-3103	-3444	-71	1527
3600-7200	-5246	-4487	-5038	-5127	-119	640
7200-10800	-2408	-3595	-2723	-2430	22	-1165
10800-14400	-1185	-1658	-1324	-1267	82	-391
14400-18000	-900	-1093	-944	-914	14	-179
18000-21600	-712	-822	-738	-717	5	-105
21600-25200	-588	-660	-605	-589	1	-71
25200-28800	-500	-551	-512	-498	-2	-53
28800-32400	-435	-472	-444	-432	-3	-40
32400-36000	-385	-414	-392	-381	-4	-33
36000-39600	-346	-369	-352	-341	-5	-28
39600-43200	-316	-333	-320	-310	-6	-23
43200-46800	-291	-305	-294	-285	-6	-20
46800-50400	-271	-283	-274	-265	-6	-18
50400-54000	-254	-264	-257	-248	-6	-16
54000-57600	-240	-248	-242	-233	-7	-15
57600-61200	-228	-235	-230	-221	-7	-14
61200-64800	-218	-224	-220	-211	-7	-13
64800-68400	-209	-214	-210	-202	-7	-12
68400-72000	-201	-205	-202	-193	-8	-12
7200-75600	-193	-198	-194	-186	-7	-12
75600-79200	-187	-190	-188	-179	-8	-11
79200-82800	-180	-184	-181	-172	-8	-12
82800-86400	-174	-178	-175	-166	-8	-12

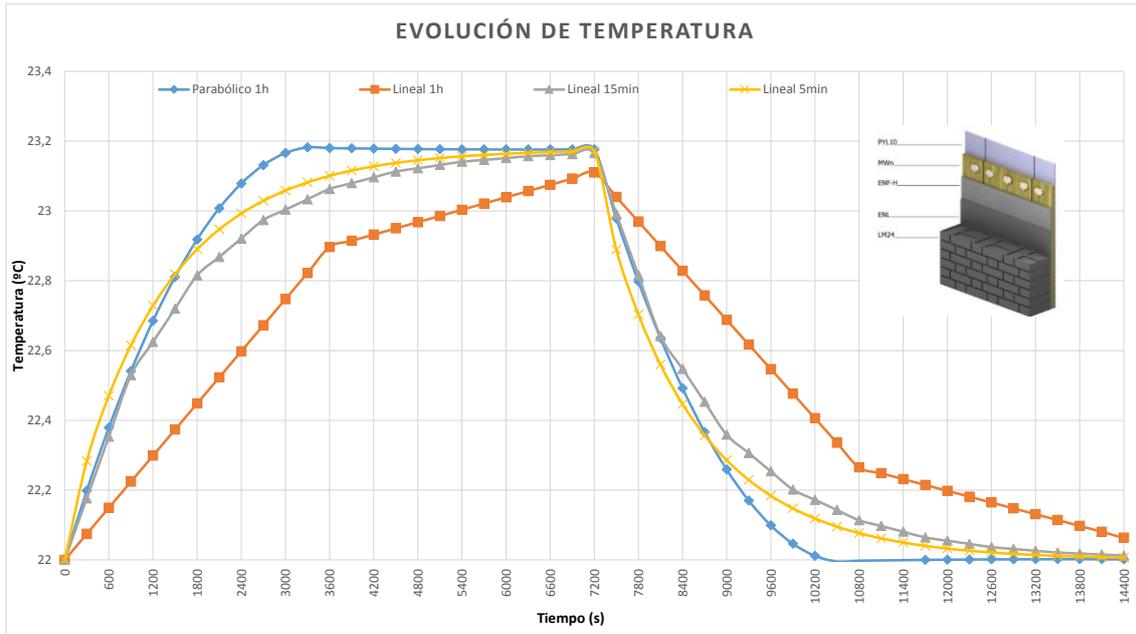
FCO1 EXT						
Intervalo	Qradiación (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-5858	-3195	-5172	-5741	-117	2546
3600-7200	-8743	-7478	-8397	-8545	-198	1066
7200-10800	-4013	-5992	-4539	-4050	38	-1942
10800-14400	-1975	-2763	-2207	-2112	137	-651
14400-18000	-1500	-1821	-1574	-1524	23	-297
18000-21600	-1186	-1370	-1230	-1195	9	-175
21600-25200	-980	-1099	-1008	-981	1	-118
25200-28800	-834	-918	-854	-831	-3	-87
28800-32400	-725	-787	-740	-720	-5	-67
32400-36000	-642	-689	-653	-635	-7	-54
36000-39600	-577	-614	-586	-569	-8	-45
39600-43200	-526	-556	-533	-517	-9	-39
43200-46800	-485	-509	-491	-475	-10	-34
46800-50400	-452	-471	-456	-441	-11	-30
50400-54000	-424	-440	-428	-413	-11	-27
54000-57600	-401	-414	-404	-389	-12	-25
57600-61200	-381	-392	-383	-369	-12	-23
61200-64800	-363	-373	-366	-351	-12	-22
64800-68400	-348	-357	-350	-336	-12	-21
68400-72000	-335	-342	-337	-322	-13	-20
7200-75600	-322	-329	-324	-309	-13	-20
75600-79200	-311	-317	-313	-298	-13	-19
79200-82800	-301	-306	-302	-287	-13	-19
82800-86400	-291	-296	-292	-277	-13	-19

FC01 EXT					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-26627	-3515	-5858	36000	0
3600-7200	-22011	-5246	-8743	36000	0
7200-10800	6420	-2408	-4013	0	0
10800-14400	3160	-1185	-1975	0	0
14400-18000	2401	-900	-1500	0	0
18000-21600	1898	-712	-1186	0	0
21600-25200	1568	-588	-980	0	0
25200-28800	1334	-500	-834	0	0
28800-32400	1160	-435	-725	0	0
32400-36000	1027	-385	-642	0	0
36000-39600	924	-346	-577	0	0
39600-43200	842	-316	-526	0	0
43200-46800	776	-291	-485	0	0
46800-50400	723	-271	-452	0	0
50400-54000	678	-254	-424	0	0
54000-57600	641	-240	-401	0	0
57600-61200	609	-228	-381	0	0
61200-64800	582	-218	-363	0	0
64800-68400	557	-209	-348	0	0
68400-72000	535	-201	-335	0	0
7200-75600	516	-193	-322	0	0
75600-79200	498	-187	-311	0	0
79200-82800	481	-180	-301	0	0
82800-86400	465	-174	-291	0	0
					Σ 0

FC01 EXT					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-15962	-1917	-5858	3600	-20137
3600-7200	-22351	-4487	-8743	3600	-31981
7200-10800	-4845	-3595	-4013	0	-12453
10800-14400	2968	-1658	-1975	0	-664
14400-18000	2544	-1093	-1500	0	-49
18000-21600	2046	-822	-1186	0	38
21600-25200	1686	-660	-980	0	46
25200-28800	1425	-551	-834	0	41
28800-32400	1231	-472	-725	0	34
32400-36000	1083	-414	-642	0	28
36000-39600	969	-369	-577	0	23
39600-43200	878	-333	-526	0	19
43200-46800	806	-305	-485	0	15
46800-50400	747	-283	-452	0	13
50400-54000	699	-264	-424	0	11
54000-57600	659	-248	-401	0	9
57600-61200	624	-235	-381	0	8
61200-64800	595	-224	-363	0	7
64800-68400	569	-214	-348	0	6
68400-72000	546	-205	-335	0	6
7200-75600	525	-198	-322	0	5
75600-79200	506	-190	-311	0	5
79200-82800	489	-184	-301	0	5
82800-86400	473	-178	-291	0	4
					Σ -64962

12.3 Resultados modelo fachada FC01 INT

FC01 INT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,1986	22,0747	22,1765	22,2833
600	22,379	22,1494	22,353	22,4704
900	22,5411	22,2241	22,5294	22,6149
1200	22,685	22,2988	22,6247	22,7285
1500	22,8107	22,3735	22,7199	22,8184
1800	22,9182	22,4482	22,8151	22,89
2100	23,0074	22,5229	22,868	22,947
2400	23,0784	22,5976	22,9209	22,9926
2700	23,1312	22,6723	22,9739	23,0291
3000	23,1657	22,747	23,0035	23,0583
3300	23,182	22,8217	23,0331	23,0817
3600	23,1801	22,8964	23,0628	23,1005
3900	23,1792	22,9143	23,0794	23,1156
4200	23,1785	22,9321	23,0961	23,1277
4500	23,1778	22,9499	23,1127	23,1374
4800	23,1773	22,9677	23,1221	23,1452
5100	23,1768	22,9855	23,1315	23,1514
5400	23,1764	23,0033	23,1408	23,1565
5700	23,1762	23,0211	23,1461	23,1605
6000	23,176	23,039	23,1514	23,1638
6300	23,176	23,0568	23,1567	23,1665
6600	23,176	23,0746	23,1597	23,1686
6900	23,1762	23,0924	23,1627	23,1703
7200	23,1764	23,1102	23,1657	23,1717
7500	22,978	23,0398	22,991	22,8895
7800	22,7978	22,9694	22,8162	22,7034
8100	22,6358	22,899	22,6414	22,5596
8400	22,492	22,8285	22,5472	22,4466
8700	22,3665	22,7581	22,453	22,3572
9000	22,2591	22,6877	22,3587	22,286
9300	22,17	22,6173	22,3064	22,2293
9600	22,0991	22,5469	22,254	22,184
9900	22,0464	22,4764	22,2017	22,1478
10200	22,012	22,406	22,1724	22,1188
10500	21,9957	22,3356	22,1431	22,0955
10800	21,9977	22,2652	22,1138	22,0769
11100	21,9986	22,2484	22,0974	22,062
11400	21,9994	22,2317	22,081	22,05
11700	22,0002	22,2149	22,0645	22,0404
12000	22,0008	22,1982	22,0553	22,0327
12300	22,0013	22,1814	22,0461	22,0265
12600	22,0017	22,1646	22,0368	22,0215
12900	22,002	22,1479	22,0316	22,0175
13200	22,0022	22,1311	22,0264	22,0143
13500	22,0023	22,1144	22,0212	22,0117
13800	22,0023	22,0976	22,0183	22,0096
14100	22,0021	22,0808	22,0154	22,008
14400	22,0019	22,0641	22,0124	22,0066



FCO1 INT						
Intervalo	Qconducción (J/m2)				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	-12706	-8982	-11275	-11823	-883	2841
3600-7200	-2101	-4144	-3160	-2847	746	-1297
7200-10800	10611	6400	9079	9681	930	-3281
10800-14400	30	1950	1077	772	-742	1178
14400-18000	38	489	135	84	-46	405
18000-21600	25	136	36	29	-4	107
21600-25200	21	49	22	21	0	28
25200-28800	18	26	18	18	0	8
28800-32400	16	19	16	16	0	3
32400-36000	15	16	15	15	0	1
36000-39600	13	14	14	13	0	1
39600-43200	12	13	12	12	0	1
43200-46800	12	12	12	12	0	0
46800-50400	11	11	11	11	0	0
50400-54000	10	10	10	10	0	0
54000-57600	9	10	10	9	0	1
57600-61200	9	9	9	9	0	0
61200-64800	8	9	8	8	0	1
64800-68400	8	8	8	8	0	0
68400-72000	7	8	7	7	0	1
7200-75600	7	7	7	7	0	0
75600-79200	6	7	6	6	0	1
79200-82800	6	6	6	6	0	0
82800-86400	6	6	6	6	0	0

FCO1 INT						
Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-8735	-4841	-7694	-8518	-217	3677
3600-7200	-12712	-10836	-12216	-12420	-292	1584
7200-10800	-3979	-7427	-4972	-4178	199	-3249
10800-14400	-11	-1778	-502	-302	291	-1476
14400-18000	-14	-433	-61	-32	18	-401
18000-21600	-9	-110	-14	-11	2	-99
21600-25200	-8	-32	-8	-8	0	-24
25200-28800	-7	-13	-7	-7	0	-6
28800-32400	-6	-8	-6	-6	0	-2
32400-36000	-5	-6	-6	-5	0	-1
36000-39600	-5	-5	-5	-5	0	0
39600-43200	-5	-5	-5	-5	0	0
43200-46800	-4	-5	-4	-4	0	-1
46800-50400	-4	-4	-4	-4	0	0
50400-54000	-4	-4	-4	-4	0	0
54000-57600	-4	-4	-4	-4	0	0
57600-61200	-3	-3	-3	-3	0	0
61200-64800	-3	-3	-3	-3	0	0
64800-68400	-3	-3	-3	-3	0	0
68400-72000	-3	-3	-3	-3	0	0
7200-75600	-3	-3	-3	-3	0	0
75600-79200	-2	-3	-2	-2	0	-1
79200-82800	-2	-2	-2	-2	0	0
82800-86400	-2	-2	-2	-2	0	0

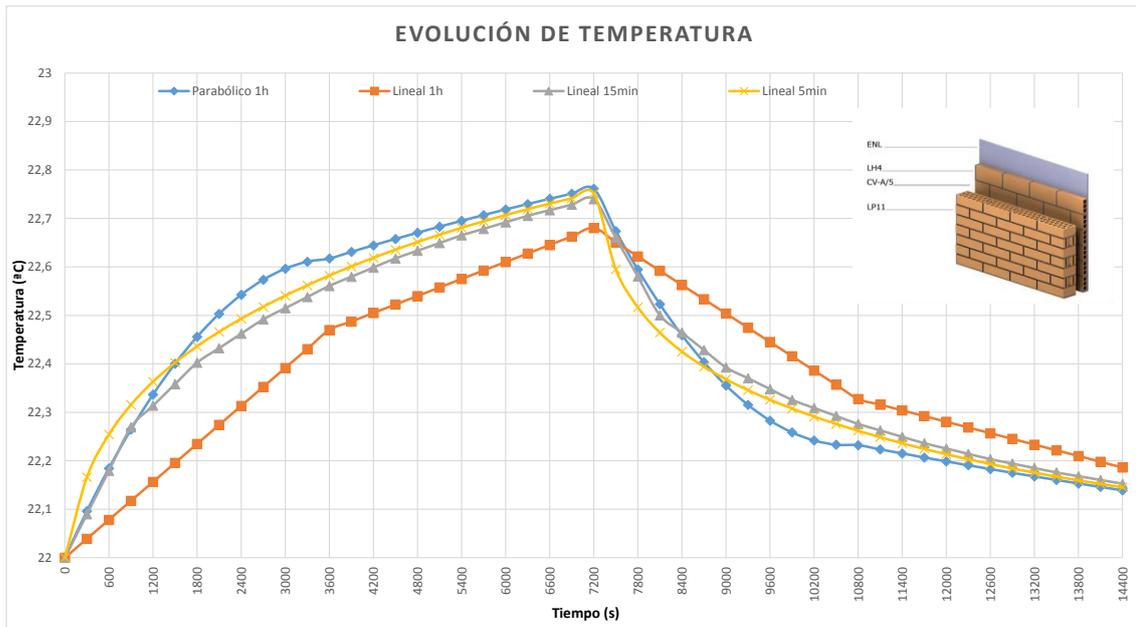
FCO1 INT						
Qradiación (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-14559	-8068	-12824	-14197	-362	6129
3600-7200	-21187	-18060	-20361	-20699	-488	2639
7200-10800	-6632	-12379	-8287	-6963	331	-5416
10800-14400	-19	-2963	-836	-504	485	-2459
14400-18000	-24	-721	-101	-54	30	-667
18000-21600	-15	-184	-24	-18	3	-166
21600-25200	-13	-54	-14	-13	0	-41
25200-28800	-11	-22	-12	-11	0	-11
28800-32400	-10	-13	-10	-10	0	-3
32400-36000	-9	-10	-9	-9	0	-1
36000-39600	-8	-9	-8	-8	0	-1
39600-43200	-8	-8	-8	-8	0	0
43200-46800	-7	-8	-7	-7	0	-1
46800-50400	-7	-7	-7	-7	0	0
50400-54000	-6	-7	-6	-6	0	-1
54000-57600	-6	-6	-6	-6	0	0
57600-61200	-6	-6	-6	-6	0	0
61200-64800	-5	-5	-5	-5	0	0
64800-68400	-5	-5	-5	-5	0	0
68400-72000	-5	-5	-5	-5	0	0
7200-75600	-4	-4	-4	-4	0	0
75600-79200	-4	-4	-4	-4	0	0
79200-82800	-4	-4	-4	-4	0	0
82800-86400	-4	-4	-4	-4	0	0

FC01 INT					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-12706	-8735	-14559	36000	0
3600-7200	-2101	-12712	-21187	36000	0
7200-10800	10611	-3979	-6632	0	0
10800-14400	30	-11	-19	0	0
14400-18000	38	-14	-24	0	0
18000-21600	25	-9	-15	0	0
21600-25200	21	-8	-13	0	0
25200-28800	18	-7	-11	0	0
28800-32400	16	-6	-10	0	0
32400-36000	15	-5	-9	0	0
36000-39600	13	-5	-8	0	0
39600-43200	12	-5	-8	0	0
43200-46800	12	-4	-7	0	0
46800-50400	11	-4	-7	0	0
50400-54000	10	-4	-6	0	0
54000-57600	9	-4	-6	0	0
57600-61200	9	-3	-6	0	0
61200-64800	8	-3	-5	0	0
64800-68400	8	-3	-5	0	0
68400-72000	7	-3	-5	0	0
7200-75600	7	-3	-4	0	0
75600-79200	6	-2	-4	0	0
79200-82800	6	-2	-4	0	0
82800-86400	6	-2	-4	0	0
					Σ 0

FC01 INT					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-8982	-4841	-14559	3600	-24781
3600-7200	-4144	-10836	-21187	3600	-32567
7200-10800	6400	-7427	-6632	0	-7659
10800-14400	1950	-1778	-19	0	153
14400-18000	489	-433	-24	0	33
18000-21600	136	-110	-15	0	10
21600-25200	49	-32	-13	0	3
25200-28800	26	-13	-11	0	1
28800-32400	19	-8	-10	0	1
32400-36000	16	-6	-9	0	0
36000-39600	14	-5	-8	0	0
39600-43200	13	-5	-8	0	0
43200-46800	12	-5	-7	0	0
46800-50400	11	-4	-7	0	0
50400-54000	10	-4	-6	0	0
54000-57600	10	-4	-6	0	0
57600-61200	9	-3	-6	0	0
61200-64800	9	-3	-5	0	0
64800-68400	8	-3	-5	0	0
68400-72000	8	-3	-5	0	0
7200-75600	7	-3	-4	0	0
75600-79200	7	-3	-4	0	0
79200-82800	6	-2	-4	0	0
82800-86400	6	-2	-4	0	0
					Σ -64803

12.4 Resultados modelo fachada FC02

FC02				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0965	22,0392	22,0898	22,1665
600	22,1847	22,0783	22,1796	22,2544
900	22,2648	22,1175	22,2693	22,3157
1200	22,3367	22,1566	22,3138	22,3633
1500	22,4004	22,1958	22,3582	22,4026
1800	22,456	22,2349	22,4026	22,4363
2100	22,5033	22,2741	22,4324	22,4661
2400	22,5425	22,3133	22,4622	22,4931
2700	22,5735	22,3524	22,4919	22,5178
3000	22,5963	22,3916	22,5149	22,5407
3300	22,6109	22,4307	22,5379	22,5621
3600	22,6174	22,4699	22,5609	22,5821
3900	22,6311	22,4874	22,5798	22,601
4200	22,6446	22,505	22,5987	22,6188
4500	22,6577	22,5225	22,6175	22,6355
4800	22,6705	22,54	22,6334	22,6514
5100	22,683	22,5576	22,6492	22,6664
5400	22,6951	22,5751	22,6651	22,6807
5700	22,707	22,5927	22,6785	22,6941
6000	22,7185	22,6102	22,692	22,7069
6300	22,7297	22,6277	22,7055	22,7191
6600	22,7405	22,6453	22,717	22,7306
6900	22,7511	22,6628	22,7285	22,7415
7200	22,7613	22,6804	22,74	22,7519
7500	22,6741	22,651	22,6602	22,5954
7800	22,5947	22,6216	22,5803	22,5168
8100	22,5232	22,5922	22,5004	22,4645
8400	22,4595	22,5628	22,4646	22,4254
8700	22,4036	22,5334	22,4287	22,3943
9000	22,3556	22,504	22,3928	22,3683
9300	22,3154	22,4746	22,3704	22,3459
9600	22,2831	22,4452	22,3481	22,3259
9900	22,2586	22,4158	22,3257	22,3079
10200	22,242	22,3864	22,3091	22,2914
10500	22,2332	22,357	22,2926	22,2762
10800	22,2322	22,3277	22,276	22,262
11100	22,2236	22,3159	22,2628	22,2487
11400	22,2152	22,3041	22,2495	22,2363
11700	22,2069	22,2923	22,2363	22,2246
12000	22,1988	22,2806	22,2253	22,2136
12300	22,1908	22,2688	22,2144	22,2033
12600	22,183	22,257	22,2035	22,1935
12900	22,1753	22,2453	22,1943	22,1843
13200	22,1678	22,2335	22,1852	22,1756
13500	22,1605	22,2217	22,176	22,1674
13800	22,1532	22,21	22,1683	22,1597
14100	22,1461	22,1982	22,1606	22,1523
14400	22,1392	22,1864	22,1528	22,1454



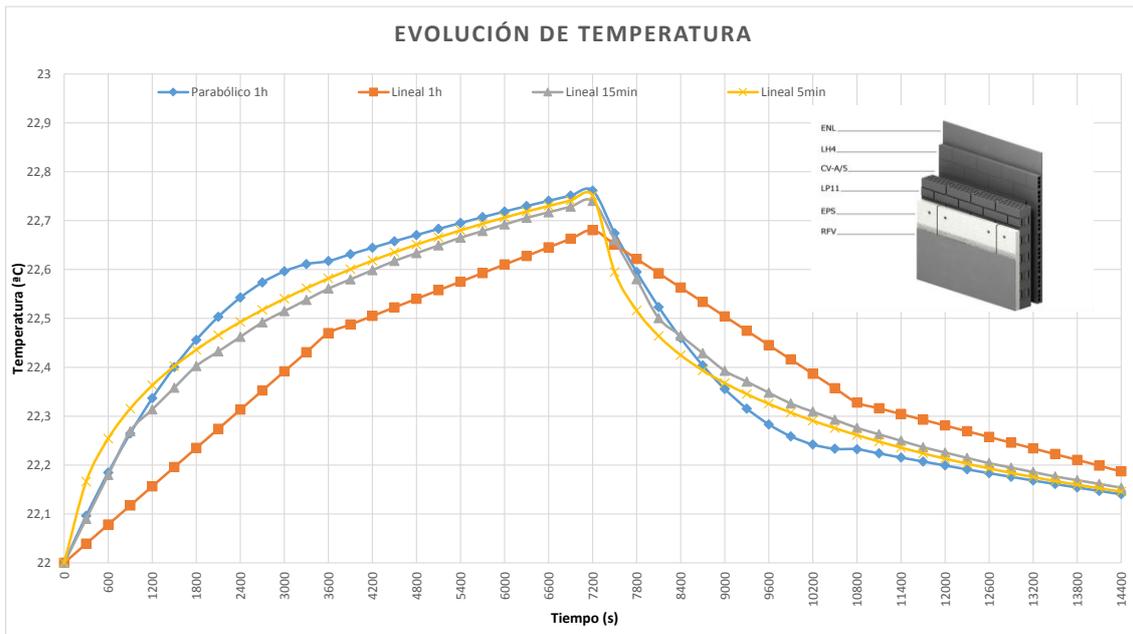
FCO2						
Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-24282	-15740	-21505	-23025	-1257	7285
3600-7200	-16036	-17225	-16805	-16496	460	-729
7200-10800	11596	2005	8429	10149	1447	-8144
10800-14400	5297	5716	5827	5647	-350	69
14400-18000	3101	3610	3343	3226	-125	384
18000-21600	1871	2265	2014	1941	-70	324
21600-25200	1175	1455	1261	1214	-39	241
25200-28800	757	952	811	781	-24	171
28800-32400	496	632	531	511	-15	121
32400-36000	329	423	352	339	-10	84
36000-39600	220	285	235	226	-6	59
39600-43200	147	192	158	151	-4	41
43200-46800	99	131	106	102	-3	29
46800-50400	67	89	71	69	-2	20
50400-54000	45	60	48	46	-1	14
54000-57600	30	41	33	31	-1	10
57600-61200	20	28	22	21	-1	7
61200-64800	14	19	15	14	0	5
64800-68400	9	13	10	10	-1	3
68400-72000	6	9	7	6	0	3
7200-75600	4	6	5	4	0	2
75600-79200	3	4	3	3	0	1
79200-82800	2	3	2	2	0	1
82800-86400	1	2	1	1	0	1

FCO2						
Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-4394	-2537	-3900	-4329	-65	1792
3600-7200	-7486	-6211	-7124	-7302	-184	1091
7200-10800	-4349	-5443	-4663	-4337	-12	-1106
10800-14400	-1986	-2776	-2241	-2127	141	-649
14400-18000	-1163	-1611	-1278	-1214	51	-397
18000-21600	-702	-980	-767	-730	28	-250
21600-25200	-440	-616	-479	-456	16	-160
25200-28800	-284	-397	-308	-293	9	-104
28800-32400	-186	-261	-201	-192	6	-69
32400-36000	-123	-173	-133	-127	4	-46
36000-39600	-82	-116	-89	-85	3	-31
39600-43200	-55	-78	-60	-57	2	-21
43200-46800	-37	-53	-40	-38	1	-15
46800-50400	-25	-36	-27	-26	1	-10
50400-54000	-17	-24	-18	-17	0	-7
54000-57600	-11	-17	-12	-12	1	-5
57600-61200	-8	-11	-8	-8	0	-3
61200-64800	-5	-8	-6	-5	0	-3
64800-68400	-3	-5	-4	-4	1	-1
68400-72000	-2	-4	-3	-2	0	-2
7200-75600	-2	-2	-2	-2	0	0
75600-79200	-1	-2	-1	-1	0	-1
79200-82800	-1	-1	-1	-1	0	0
82800-86400	0	-1	-1	-1	1	0

FCO2						
Qradiación (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-7324	-4229	-6500	-7214	-110	2985
3600-7200	-12478	-10352	-11873	-12170	-308	1818
7200-10800	-7248	-9072	-7771	-7228	-20	-1844
10800-14400	-3311	-4627	-3736	-3545	234	-1082
14400-18000	-1938	-2685	-2129	-2023	85	-662
18000-21600	-1170	-1633	-1279	-1216	46	-417
21600-25200	-734	-1027	-799	-761	27	-266
25200-28800	-473	-662	-513	-489	16	-173
28800-32400	-310	-435	-335	-320	10	-115
32400-36000	-206	-289	-222	-212	6	-77
36000-39600	-137	-194	-148	-141	4	-53
39600-43200	-92	-131	-99	-95	3	-36
43200-46800	-62	-88	-67	-64	2	-24
46800-50400	-42	-60	-45	-43	1	-17
50400-54000	-28	-41	-30	-29	1	-12
54000-57600	-19	-28	-21	-20	1	-8
57600-61200	-13	-19	-14	-13	0	-6
61200-64800	-9	-13	-9	-9	0	-4
64800-68400	-6	-9	-6	-6	0	-3
68400-72000	-4	-6	-4	-4	0	-2
7200-75600	-3	-4	-3	-3	0	-1
75600-79200	-2	-3	-2	-2	0	-1
79200-82800	-1	-2	-1	-1	0	-1
82800-86400	-1	-1	-1	-1	0	0

12.5 Resultados modelo fachada FC02 EXT

FC02 EXT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0965	22,0392	22,0898	22,1663
600	22,1847	22,0783	22,1796	22,2542
900	22,2648	22,1175	22,2693	22,3154
1200	22,3367	22,1566	22,3138	22,363
1500	22,4004	22,1958	22,3582	22,4022
1800	22,456	22,2349	22,4026	22,4359
2100	22,5033	22,2741	22,4324	22,4657
2400	22,5425	22,3133	22,4622	22,4926
2700	22,5735	22,3524	22,4919	22,5173
3000	22,5963	22,3916	22,5149	22,5402
3300	22,6109	22,4307	22,5379	22,5616
3600	22,6174	22,4699	22,5609	22,5816
3900	22,6311	22,4874	22,5798	22,6004
4200	22,6446	22,505	22,5987	22,6182
4500	22,6577	22,5225	22,6175	22,635
4800	22,6705	22,54	22,6334	22,6508
5100	22,683	22,5576	22,6492	22,6658
5400	22,6951	22,5751	22,6651	22,68
5700	22,707	22,5927	22,6785	22,6935
6000	22,7185	22,6102	22,692	22,7063
6300	22,7297	22,6277	22,7055	22,7184
6600	22,7405	22,6453	22,717	22,7299
6900	22,7511	22,6628	22,7285	22,7409
7200	22,7613	22,6804	22,7401	22,7513
7500	22,6741	22,651	22,6602	22,5947
7800	22,5947	22,6216	22,5803	22,5161
8100	22,5232	22,5922	22,5004	22,4638
8400	22,4595	22,5628	22,4646	22,4247
8700	22,4036	22,5335	22,4287	22,3936
9000	22,3556	22,5041	22,3928	22,3676
9300	22,3155	22,4747	22,3705	22,3452
9600	22,2832	22,4453	22,3481	22,3253
9900	22,2587	22,4159	22,3258	22,3073
10200	22,2421	22,3866	22,3092	22,2908
10500	22,2333	22,3572	22,2927	22,2755
10800	22,2324	22,3278	22,2762	22,2614
11100	22,2239	22,3161	22,263	22,2482
11400	22,2155	22,3044	22,2498	22,2358
11700	22,2073	22,2927	22,2366	22,2241
12000	22,1992	22,281	22,2257	22,2132
12300	22,1913	22,2693	22,2148	22,2029
12600	22,1835	22,2576	22,204	22,1932
12900	22,176	22,2458	22,1949	22,1841
13200	22,1685	22,2341	22,1858	22,1755
13500	22,1613	22,2224	22,1768	22,1674
13800	22,1541	22,2107	22,1692	22,1598
14100	22,1472	22,199	22,1615	22,1526
14400	22,1404	22,1873	22,1539	22,1458



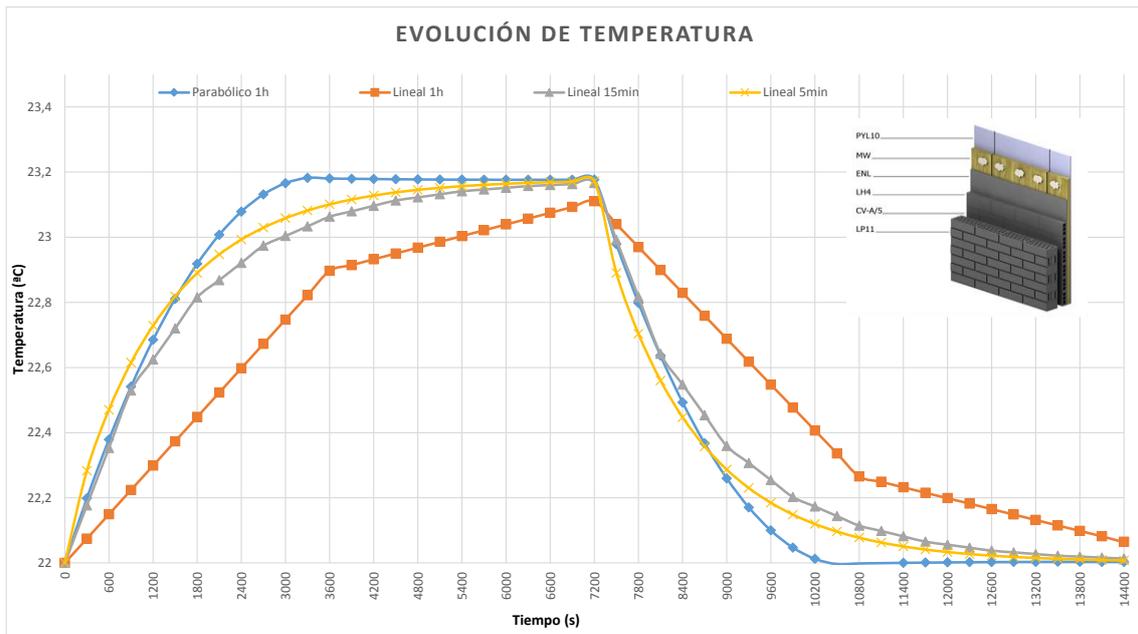
FCO2 EXT						
Intervalo	Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-24282	-15740	-21505	-23037	-1245,00	7297,00
3600-7200	-16036	-17225	-16805	-16514	478,00	-711,00
7200-10800	11598	2003	8430	10129	1469,00	-8126,00
10800-14400	5314	5720	5841	5640	-326,00	80,00
14400-18000	3166	3647	3401	3265	-99,00	382,00
18000-21600	2018	2374	2152	2060	-42,00	314,00
21600-25200	1420	1660	1495	1430	-10,00	230,00
25200-28800	1094	1252	1138	1088	6,00	164,00
28800-32400	907	1011	933	891	16,00	120,00
32400-36000	790	861	807	770	20,00	91,00
36000-39600	710	760	721	687	23,00	73,00
39600-43200	650	687	658	625	25,00	62,00
43200-46800	601	630	607	576	25,00	54,00
46800-50400	559	583	564	533	26,00	50,00
50400-54000	521	542	526	495	26,00	47,00
54000-57600	487	505	491	460	27,00	45,00
57600-61200	455	472	459	428	27,00	44,00
61200-64800	426	441	430	399	27,00	42,00
64800-68400	399	413	402	371	28,00	42,00
68400-72000	373	386	376	345	28,00	41,00
7200-75600	349	361	352	321	28,00	40,00
75600-79200	327	338	330	298	29,00	40,00
79200-82800	306	317	309	277	29,00	40,00
82800-86400	287	296	289	258	29,00	38,00

FCO2 EXT						
Intervalo	Qconvección (J/m2)				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	-4394	-2537	-3900	-4325	-69	1788
3600-7200	-7486	-6211	-7124	-7295	-191	1084
7200-10800	-4349	-5444	-4663	-4330	-19	-1114
10800-14400	-1993	-2782	-2247	-2124	131	-658
14400-18000	-1187	-1630	-1300	-1229	42	-401
18000-21600	-757	-1025	-819	-775	18	-250
21600-25200	-532	-694	-567	-537	5	-157
25200-28800	-410	-508	-430	-408	-2	-100
28800-32400	-340	-400	-351	-335	-5	-65
32400-36000	-296	-334	-303	-289	-7	-45
36000-39600	-266	-291	-271	-258	-8	-33
39600-43200	-244	-261	-247	-235	-9	-26
43200-46800	-225	-238	-228	-216	-9	-22
46800-50400	-210	-220	-212	-200	-10	-20
50400-54000	-195	-204	-197	-186	-9	-18
54000-57600	-183	-190	-184	-173	-10	-17
57600-61200	-171	-177	-172	-161	-10	-16
61200-64800	-160	-166	-161	-150	-10	-16
64800-68400	-150	-155	-151	-139	-11	-16
68400-72000	-140	-145	-141	-129	-11	-16
72000-75600	-131	-136	-132	-120	-11	-16
75600-79200	-123	-127	-124	-112	-11	-15
79200-82800	-115	-119	-116	-104	-11	-15
82800-86400	-107	-111	-108	-97	-10	-14

FCO2 EXT						
Intervalo	Qradiación (J/m2)				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	-7324	-4229	-6500	-7208	-116	2979
3600-7200	-12478	-10352	-11873	-12159	-319	1807
7200-10800	-7249	-9073	-7772	-7216	-33	-1857
10800-14400	-3321	-4636	-3746	-3541	220	-1095
14400-18000	-1979	-2717	-2167	-2048	69	-669
18000-21600	-1262	-1708	-1365	-1291	29	-417
21600-25200	-887	-1156	-945	-896	9	-260
25200-28800	-684	-846	-716	-681	-3	-165
28800-32400	-567	-667	-586	-558	-9	-109
32400-36000	-494	-557	-506	-481	-13	-76
36000-39600	-444	-485	-452	-430	-14	-55
39600-43200	-406	-435	-412	-391	-15	-44
43200-46800	-376	-397	-380	-360	-16	-37
46800-50400	-349	-366	-353	-333	-16	-33
50400-54000	-326	-340	-329	-309	-17	-31
54000-57600	-304	-317	-307	-288	-16	-29
57600-61200	-285	-296	-287	-268	-17	-28
61200-64800	-266	-276	-269	-249	-17	-27
64800-68400	-249	-258	-251	-232	-17	-26
68400-72000	-233	-242	-235	-216	-17	-26
72000-75600	-218	-226	-220	-201	-17	-25
75600-79200	-204	-212	-206	-187	-17	-25
79200-82800	-191	-198	-193	-173	-18	-25
82800-86400	-179	-186	-181	-161	-18	-25

12.6 Resultados modelo fachada FC02 INT

FC02 INT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,1986	22,0747	22,1765	22,2833
600	22,379	22,1494	22,353	22,4704
900	22,5412	22,2241	22,5295	22,6149
1200	22,6851	22,2988	22,6247	22,7285
1500	22,8108	22,3735	22,7199	22,8185
1800	22,9182	22,4482	22,8151	22,89
2100	23,0075	22,523	22,8681	22,9471
2400	23,0785	22,5977	22,921	22,9927
2700	23,1312	22,6724	22,9739	23,0291
3000	23,1658	22,7471	23,0036	23,0584
3300	23,1821	22,8218	23,0332	23,0818
3600	23,1802	22,8965	23,0628	23,1006
3900	23,1793	22,9143	23,0795	23,1156
4200	23,1786	22,9322	23,0962	23,1277
4500	23,1779	22,95	23,1128	23,1375
4800	23,1774	22,9678	23,1222	23,1453
5100	23,1769	22,9856	23,1316	23,1516
5400	23,1766	23,0035	23,141	23,1566
5700	23,1764	23,0213	23,1463	23,1607
6000	23,1762	23,0391	23,1516	23,164
6300	23,1762	23,057	23,1569	23,1667
6600	23,1763	23,0748	23,16	23,1688
6900	23,1765	23,0926	23,163	23,1706
7200	23,1768	23,1105	23,166	23,172
7500	22,9784	23,0401	22,9913	22,8899
7800	22,7982	22,9697	22,8166	22,7037
8100	22,6362	22,8993	22,6418	22,56
8400	22,4925	22,8289	22,5476	22,4471
8700	22,367	22,7585	22,4534	22,3577
9000	22,2597	22,6881	22,3592	22,2866
9300	22,1706	22,6177	22,3069	22,2299
9600	22,0998	22,5474	22,2546	22,1847
9900	22,0471	22,477	22,2023	22,1485
10200	22,0127	22,4066	22,1731	22,1195
10500	21,9965	22,3362	22,1438	22,0963
10800	21,9985	22,2658	22,1146	22,0777
11100	21,9995	22,2491	22,0982	22,0628
11400	22,0004	22,2323	22,0818	22,0509
11700	22,0011	22,2156	22,0654	22,0413
12000	22,0017	22,1989	22,0562	22,0336
12300	22,0023	22,1822	22,047	22,0275
12600	22,0027	22,1654	22,0378	22,0225
12900	22,003	22,1487	22,0326	22,0185
13200	22,0033	22,132	22,0275	22,0154
13500	22,0034	22,1152	22,0223	22,0128
13800	22,0034	22,0985	22,0194	22,0107
14100	22,0033	22,0818	22,0165	22,0091
14400	22,0031	22,0651	22,0135	22,0077



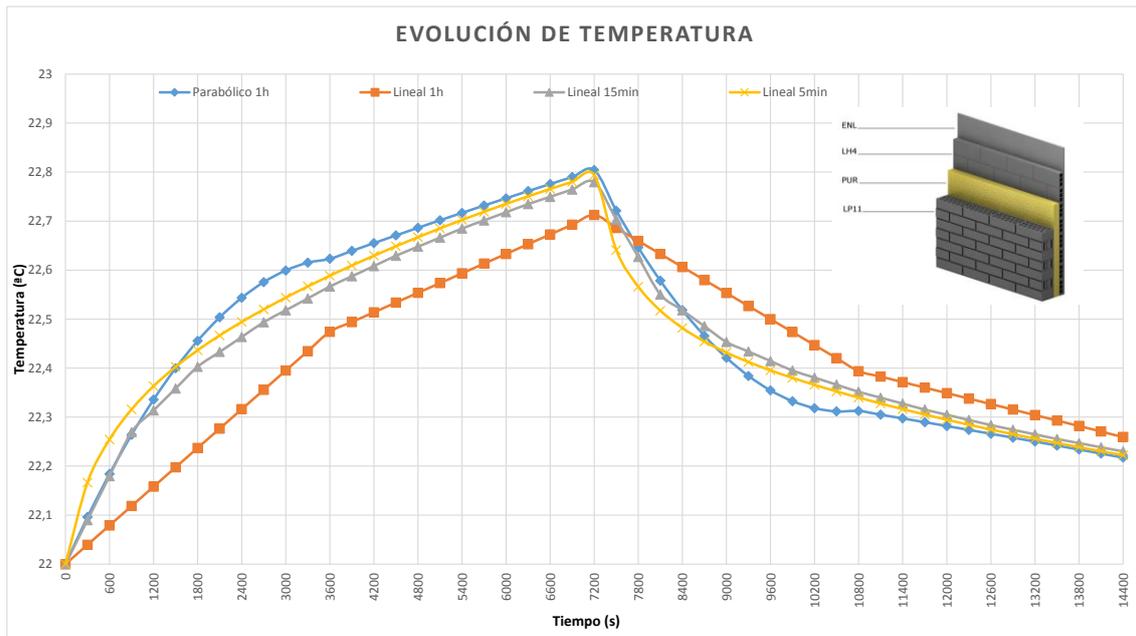
FCO2 INT						
Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-12705	-8980	-11274	-11821	-884	2841
3600-7200	-2096	-4142	-3155	-2842	746	-1300
7200-10800	10627	6411	9094	9697	930	-3286
10800-14400	60	1974	1105	800	-740	1174
14400-18000	72	521	169	117	-45	404
18000-21600	58	169	69	62	-4	107
21600-25200	51	80	53	52	-1	28
25200-28800	46	54	46	46	0	8
28800-32400	41	45	41	41	0	4
32400-36000	37	39	37	37	0	2
36000-39600	33	35	33	33	0	2
39600-43200	29	31	30	30	-1	1
43200-46800	26	28	27	27	-1	1
46800-50400	24	25	24	24	0	1
50400-54000	21	23	22	21	0	2
54000-57600	19	20	20	19	0	1
57600-61200	17	18	18	17	0	1
61200-64800	16	16	16	16	0	0
64800-68400	14	15	14	14	0	1
68400-72000	13	13	13	13	0	0
72000-75600	11	12	12	11	0	1
75600-79200	10	11	10	10	0	1
79200-82800	9	10	9	9	0	1
82800-86400	8	9	8	8	0	1

FCO2 INT						
Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-8736	-4841	-7695	-8519	-217	3678
3600-7200	-12714	-10838	-12218	-12421	-293	1583
7200-10800	-3985	-7432	-4978	-4184	199	-3248
10800-14400	-22	-1787	-512	-313	291	-1474
14400-18000	-27	-444	-73	-45	18	-399
18000-21600	-22	-122	-27	-23	1	-99
21600-25200	-19	-44	-20	-19	0	-25
25200-28800	-17	-24	-17	-17	0	-7
28800-32400	-15	-18	-16	-15	0	-3
32400-36000	-14	-15	-14	-14	0	-1
36000-39600	-12	-13	-12	-12	0	-1
39600-43200	-11	-12	-11	-11	0	-1
43200-46800	-10	-11	-10	-10	0	-1
46800-50400	-9	-9	-9	-9	0	0
50400-54000	-8	-9	-8	-8	0	-1
54000-57600	-7	-8	-7	-7	0	-1
57600-61200	-6	-7	-7	-7	1	0
61200-64800	-6	-6	-6	-6	0	0
64800-68400	-5	-6	-5	-5	0	-1
68400-72000	-5	-5	-5	-5	0	0
7200-75600	-4	-5	-4	-4	0	-1
75600-79200	-4	-4	-4	-4	0	0
79200-82800	-3	-4	-3	-3	0	-1
82800-86400	-3	-3	-3	-3	0	0

FCO2 INT						
Qradiación (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-14559	-8068	-12825	-14198	-361	6130
3600-7200	-21190	-18063	-20363	-20702	-488	2639
7200-10800	-6642	-12386	-8297	-6973	331	-5413
10800-14400	-37	-2978	-853	-522	485	-2456
14400-18000	-45	-740	-122	-75	30	-665
18000-21600	-36	-204	-45	-39	3	-165
21600-25200	-32	-74	-33	-32	0	-42
25200-28800	-28	-40	-29	-29	1	-11
28800-32400	-25	-29	-26	-26	1	-3
32400-36000	-23	-25	-23	-23	0	-2
36000-39600	-20	-22	-21	-21	1	-1
39600-43200	-18	-20	-19	-18	0	-2
43200-46800	-17	-18	-17	-17	0	-1
46800-50400	-15	-16	-15	-15	0	-1
50400-54000	-13	-14	-14	-13	0	-1
54000-57600	-12	-13	-12	-12	0	-1
57600-61200	-11	-11	-11	-11	0	0
61200-64800	-10	-10	-10	-10	0	0
64800-68400	-9	-9	-9	-9	0	0
68400-72000	-8	-8	-8	-8	0	0
72000-75600	-7	-8	-7	-7	0	-1
75600-79200	-6	-7	-6	-6	0	-1
79200-82800	-6	-6	-6	-6	0	0
82800-86400	-5	-5	-5	-5	0	0

12.7 Resultados modelo fachada FC02 MED

FC02 MED				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,096	22,0395	22,0898	22,1665
600	22,1839	22,079	22,1796	22,2544
900	22,2639	22,1185	22,2693	22,3157
1200	22,3358	22,1581	22,3138	22,3633
1500	22,3998	22,1976	22,3583	22,4026
1800	22,4557	22,2371	22,4028	22,4365
2100	22,5036	22,2766	22,4331	22,4667
2400	22,5435	22,3161	22,4634	22,4943
2700	22,5755	22,3556	22,4937	22,5198
3000	22,5993	22,3952	22,518	22,5439
3300	22,6152	22,4347	22,5422	22,5667
3600	22,6231	22,4742	22,5665	22,5885
3900	22,6392	22,4941	22,5874	22,6094
4200	22,6551	22,5139	22,6083	22,6294
4500	22,6708	22,5338	22,6293	22,6487
4800	22,6863	22,5537	22,6478	22,6672
5100	22,7017	22,5735	22,6663	22,6851
5400	22,7168	22,5934	22,6849	22,7024
5700	22,7318	22,6133	22,7015	22,719
6000	22,7466	22,6331	22,7181	22,7351
6300	22,7613	22,653	22,7347	22,7506
6600	22,7757	22,6729	22,7496	22,7656
6900	22,79	22,6927	22,7646	22,7801
7200	22,8041	22,7126	22,7795	22,794
7500	22,7212	22,686	22,7031	22,641
7800	22,646	22,6595	22,6268	22,5661
8100	22,5783	22,6329	22,5504	22,5173
8400	22,5183	22,6063	22,518	22,4819
8700	22,4659	22,5798	22,4856	22,4543
9000	22,4211	22,5532	22,4532	22,4317
9300	22,384	22,5266	22,4338	22,4124
9600	22,3544	22,5	22,4144	22,3954
9900	22,3325	22,4735	22,395	22,38
10200	22,3182	22,4469	22,3806	22,3658
10500	22,3116	22,4203	22,3661	22,3524
10800	22,3125	22,3938	22,3516	22,3398
11100	22,3049	22,3826	22,3396	22,3278
11400	22,2973	22,3714	22,3275	22,3163
11700	22,2896	22,3602	22,3154	22,3053
12000	22,2818	22,349	22,3048	22,2947
12300	22,2739	22,3378	22,2942	22,2845
12600	22,266	22,3266	22,2837	22,2747
12900	22,2581	22,3154	22,2742	22,2652
13200	22,2501	22,3042	22,2648	22,256
13500	22,242	22,2931	22,2554	22,2472
13800	22,2338	22,2819	22,2469	22,2387
14100	22,2256	22,2707	22,2384	22,2305
14400	22,2173	22,2595	22,23	22,2225



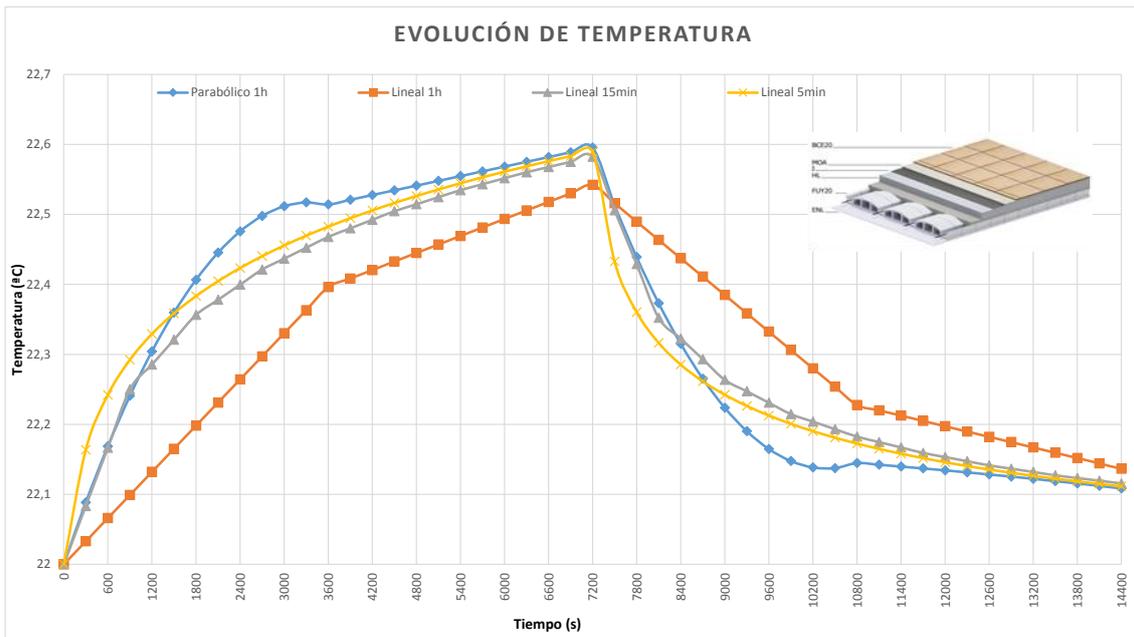
FCO2 MED						
Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-24259	-15821	-21500	-22995	-1264	7174
3600-7200	-15386	-17014	-16241	-15852	466	-1162
7200-10800	13446	3506	10169	11947	1499	-8441
10800-14400	7651	8110	8145	7957	-306	153
14400-18000	5098	5720	5366	5224	-126	496
18000-21600	3347	3864	3536	3435	-88	429
21600-25200	2202	2603	2333	2261	-59	342
25200-28800	1451	1754	1541	1490	-39	264
28800-32400	957	1183	1019	983	-26	200
32400-36000	631	799	674	649	-18	150
36000-39600	417	540	447	429	-12	111
39600-43200	276	365	296	284	-8	81
43200-46800	183	247	197	188	-5	59
46800-50400	121	167	131	125	-4	42
50400-54000	80	113	87	83	-3	30
54000-57600	53	77	58	55	-2	22
57600-61200	36	52	39	37	-1	15
61200-64800	24	35	26	24	0	11
64800-68400	16	24	17	16	0	8
68400-72000	11	16	11	11	0	5
72000-75600	7	11	8	7	0	4
75600-79200	5	8	5	5	0	3
79200-82800	3	5	3	3	0	2
82800-86400	2	4	2	2	0	2

FCO2 MED						
Qconvección (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-4403	-2561	-3913	-4342	-1,39	41,03
3600-7200	-7730	-6409	-7349	-7545	-2,45	15,07
7200-10800	-5042	-5974	-5303	-5009	-0,67	-19,28
10800-14400	-2869	-3528	-3092	-2990	4,03	-17,99
14400-18000	-1912	-2342	-2032	-1963	2,59	-19,31
18000-21600	-1255	-1573	-1339	-1291	2,74	-21,88
21600-25200	-826	-1059	-883	-850	2,78	-24,61
25200-28800	-544	-713	-584	-560	2,83	-27,38
28800-32400	-359	-481	-386	-369	2,88	-30,19
32400-36000	-237	-324	-255	-244	2,92	-33,02
36000-39600	-156	-219	-169	-161	2,97	-35,88
39600-43200	-104	-148	-112	-107	3,01	-38,75
43200-46800	-69	-100	-74	-71	3,06	-41,66
46800-50400	-45	-68	-50	-47	3,10	-44,57
50400-54000	-30	-46	-33	-31	3,14	-47,51
54000-57600	-20	-31	-22	-21	3,18	-50,45
57600-61200	-13	-21	-15	-14	3,22	-53,41
61200-64800	-9	-14	-10	-9	3,26	-56,37
64800-68400	-6	-10	-7	-6	3,30	-59,35
68400-72000	-4	-7	-4	-4	3,34	-62,32
72000-75600	-3	-4	-3	-3	3,37	-65,30
75600-79200	-2	-3	-2	-2	3,41	-68,29
79200-82800	-1	-2	-1	-1	3,45	-71,27
82800-86400	-1	-1	-1	-1	3,48	-74,25

FCO2 MED						
Qradiación (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-7338	-4268	-6521	-7237	-1,39	41,03
3600-7200	-12884	-10681	-12248	-12576	-2,45	15,07
7200-10800	-8403	-9957	-8839	-8348	-0,67	-19,28
10800-14400	-4782	-5879	-5153	-4983	4,03	-17,99
14400-18000	-3186	-3902	-3387	-3271	2,59	-19,31
18000-21600	-2092	-2622	-2232	-2151	2,74	-21,88
21600-25200	-1376	-1764	-1472	-1416	2,78	-24,61
25200-28800	-907	-1189	-973	-933	2,83	-27,38
28800-32400	-598	-801	-643	-616	2,88	-30,19
32400-36000	-395	-541	-426	-407	2,92	-33,02
36000-39600	-261	-365	-282	-269	2,97	-35,88
39600-43200	-173	-247	-187	-178	3,01	-38,76
43200-46800	-114	-167	-124	-118	3,06	-41,66
46800-50400	-76	-113	-83	-78	3,10	-44,57
50400-54000	-50	-77	-55	-52	3,14	-47,51
54000-57600	-33	-52	-37	-34	3,18	-50,45
57600-61200	-22	-35	-24	-23	3,22	-53,41
61200-64800	-15	-24	-16	-15	3,26	-56,37
64800-68400	-10	-16	-11	-10	3,30	-59,35
68400-72000	-7	-11	-7	-7	3,34	-62,32
72000-75600	-4	-7	-5	-5	3,37	-65,30
75600-79200	-3	-5	-3	-3	3,41	-68,29
79200-82800	-2	-3	-2	-2	3,45	-71,27
82800-86400	-1	-2	-1	-1	3,48	-74,25

12.8 Resultados modelo fachada QB01

QB01				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0885	22,033	22,0833	22,1637
600	22,1687	22,066	22,1666	22,2421
900	22,2406	22,099	22,2499	22,2922
1200	22,3042	22,132	22,2854	22,3291
1500	22,3595	22,1651	22,3208	22,3586
1800	22,4065	22,1981	22,3563	22,3832
2100	22,4452	22,2311	22,3779	22,4045
2400	22,4756	22,2641	22,3995	22,4233
2700	22,4977	22,2971	22,4211	22,4402
3000	22,5115	22,3301	22,4367	22,4555
3300	22,517	22,3631	22,4522	22,4695
3600	22,5141	22,3961	22,4678	22,4824
3900	22,5208	22,4083	22,48	22,4944
4200	22,5276	22,4204	22,4922	22,5056
4500	22,5343	22,4326	22,5044	22,5162
4800	22,541	22,4448	22,5144	22,5261
5100	22,5478	22,4569	22,5245	22,5355
5400	22,5546	22,4691	22,5345	22,5444
5700	22,5614	22,4812	22,543	22,5529
6000	22,5682	22,4934	22,5516	22,5609
6300	22,575	22,5056	22,5601	22,5686
6600	22,5818	22,5177	22,5676	22,576
6900	22,5887	22,5299	22,575	22,5831
7200	22,5955	22,542	22,5824	22,5898
7500	22,5132	22,5158	22,5057	22,4326
7800	22,439	22,4896	22,4289	22,3605
8100	22,373	22,4634	22,3522	22,3164
8400	22,3151	22,4372	22,3226	22,2853
8700	22,2653	22,411	22,2931	22,2615
9000	22,2237	22,3848	22,2635	22,2423
9300	22,1902	22,3586	22,2472	22,2263
9600	22,1648	22,3324	22,2309	22,2127
9900	22,1476	22,3062	22,2146	22,2008
10200	22,1385	22,28	22,2039	22,1903
10500	22,1375	22,2538	22,1932	22,181
10800	22,1447	22,2276	22,1825	22,1726
11100	22,1423	22,22	22,1747	22,165
11400	22,1397	22,2125	22,167	22,1581
11700	22,137	22,2049	22,1592	22,1518
12000	22,1343	22,1973	22,1533	22,1459
12300	22,1314	22,1897	22,1474	22,1405
12600	22,1284	22,1822	22,1414	22,1355
12900	22,1254	22,1746	22,1367	22,1309
13200	22,1222	22,167	22,132	22,1265
13500	22,1189	22,1594	22,1272	22,1224
13800	22,1156	22,1519	22,1233	22,1186
14100	22,1121	22,1443	22,1195	22,1149
14400	22,1085	22,1367	22,1156	22,1115



QB01							
Intervalo	Qconducción (J/m2)				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	-25727	-15849	-22686	-24456	-1271	8607	
3600-7200	-20026	-20554	-20573	-20380	354	-174	
7200-10800	7848	-2735	4543	6450	1398	-9185	
10800-14400	3682	3604	4044	3949	-267	-345	
14400-18000	2676	2888	2800	2735	-59	153	
18000-21600	2032	2233	2108	2063	-31	170	
21600-25200	1610	1768	1661	1628	-18	140	
25200-28800	1312	1434	1348	1322	-10	112	
28800-32400	1092	1187	1119	1098	-6	89	
32400-36000	924	999	945	927	-3	72	
36000-39600	791	852	808	792	-1	60	
39600-43200	684	734	698	684	0	50	
43200-46800	596	638	607	594	2	44	
46800-50400	522	557	531	519	3	38	
50400-54000	458	489	466	455	3	34	
54000-57600	404	431	411	401	3	30	
57600-61200	357	380	363	353	4	27	
61200-64800	315	336	321	311	4	25	
64800-68400	279	297	284	275	4	22	
68400-72000	247	263	251	243	4	20	
72000-75600	219	233	223	215	4	18	
75600-79200	195	207	198	190	5	17	
79200-82800	173	184	175	167	6	17	
82800-86400	153	163	156	148	5	15	

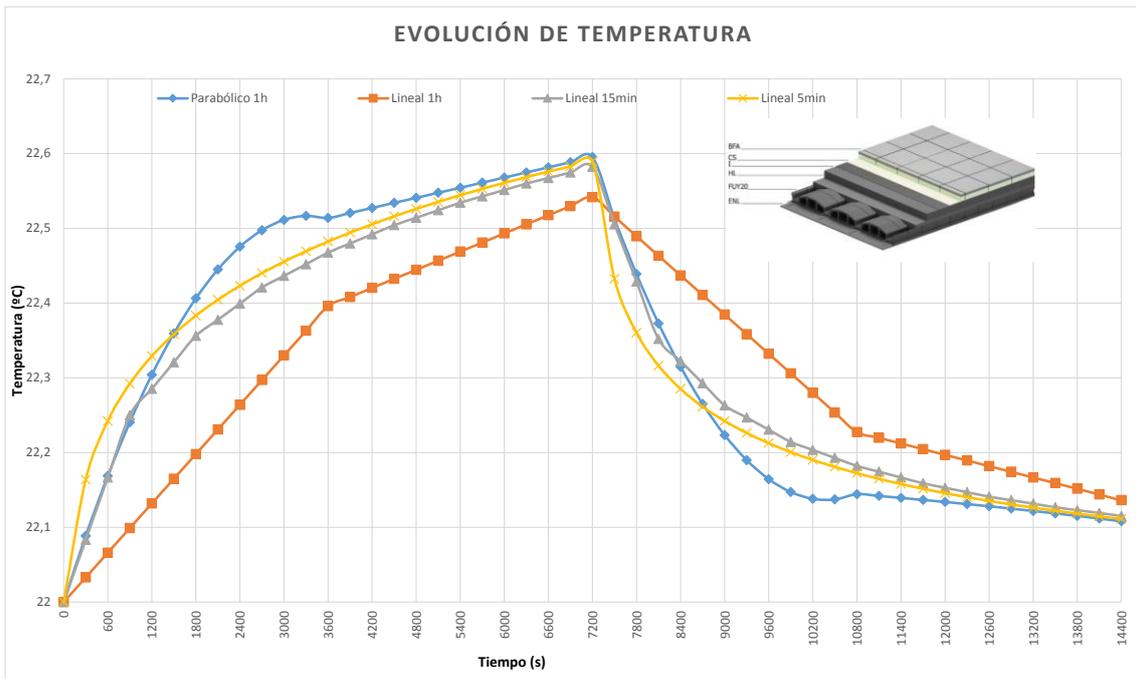
QB01						
Qconvección (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-3852	-2139	-3986	-3783	-69	1644
3600-7200	-5990	-5066	-5905	-5850	-140	784
7200-10800	-2943	-4156	-2793	-2962	19	-1194
10800-14400	-1381	-1967	-1457	-1487	106	-480
14400-18000	-1004	-1255	-1014	-1028	24	-227
18000-21600	-762	-906	-767	-774	12	-132
21600-25200	-604	-698	-607	-611	7	-87
25200-28800	-492	-558	-494	-496	4	-62
28800-32400	-410	-458	-411	-412	2	-46
32400-36000	-346	-383	-347	-348	2	-35
36000-39600	-297	-326	-297	-297	0	-29
39600-43200	-257	-280	-257	-256	-1	-24
43200-46800	-223	-242	-224	-223	0	-19
46800-50400	-196	-211	-196	-195	-1	-16
50400-54000	-172	-185	-172	-171	-1	-14
54000-57600	-151	-163	-152	-150	-1	-13
57600-61200	-134	-144	-134	-132	-2	-12
61200-64800	-118	-127	-118	-117	-1	-10
64800-68400	-105	-112	-105	-103	-2	-9
68400-72000	-93	-99	-93	-91	-2	-8
72000-75600	-82	-88	-82	-81	-1	-7
75600-79200	-73	-78	-73	-71	-2	-7
79200-82800	-65	-69	-65	-63	-2	-6
82800-86400	-57	-62	-57	-55	-2	-7

Qradiación (J/m2)					Frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-6420	-3565	-6644	-6305	-115	2740
3600-7200	-9984	-8444	-9841	-9750	-234	1306
7200-10800	-4905	-6927	-4654	-4937	32	-1990
10800-14400	-2301	-3279	-2429	-2478	177	-801
14400-18000	-1673	-2091	-1691	-1713	40	-378
18000-21600	-1270	-1510	-1279	-1291	21	-219
21600-25200	-1007	-1163	-1011	-1018	11	-145
25200-28800	-820	-930	-823	-827	7	-103
28800-32400	-683	-763	-685	-687	4	-76
32400-36000	-577	-639	-579	-579	2	-60
36000-39600	-495	-543	-495	-495	0	-48
39600-43200	-428	-466	-428	-427	-1	-39
43200-46800	-372	-404	-373	-372	0	-32
46800-50400	-326	-352	-326	-325	-1	-27
50400-54000	-286	-309	-287	-285	-1	-24
54000-57600	-252	-272	-253	-250	-2	-22
57600-61200	-223	-240	-223	-221	-2	-19
61200-64800	-197	-212	-197	-195	-2	-17
64800-68400	-175	-187	-175	-172	-3	-15
68400-72000	-155	-166	-155	-152	-3	-14
72000-75600	-137	-147	-137	-134	-3	-13
75600-79200	-122	-130	-122	-119	-3	-11
79200-82800	-108	-116	-108	-105	-3	-11
82800-86400	-96	-103	-96	-92	-4	-11

QB01					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-25727	-3852	-6420	36000	0
3600-7200	-20026	-5990	-9984	36000	0
7200-10800	7848	-2943	-4905	0	0
10800-14400	3682	-1381	-2301	0	0
14400-18000	2676	-1004	-1673	0	0
18000-21600	2032	-762	-1270	0	0
21600-25200	1610	-604	-1007	0	0
25200-28800	1312	-492	-820	0	0
28800-32400	1092	-410	-683	0	0
32400-36000	924	-346	-577	0	0
36000-39600	791	-297	-495	0	0
39600-43200	684	-257	-428	0	0
43200-46800	596	-223	-372	0	0
46800-50400	522	-196	-326	0	0
50400-54000	458	-172	-286	0	0
54000-57600	404	-151	-252	0	0
57600-61200	357	-134	-223	0	0
61200-64800	315	-118	-197	0	0
64800-68400	279	-105	-175	0	0
68400-72000	247	-93	-155	0	0
72000-75600	219	-82	-137	0	0
75600-79200	195	-73	-122	0	0
79200-82800	173	-65	-108	0	0
82800-86400	153	-57	-96	0	0
					Σ 0
QB01					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-15849	-2139	-3565	36000	14446
3600-7200	-20554	-5066	-8444	36000	1937
7200-10800	-2735	-4156	-6927	0	-13818
10800-14400	3604	-1967	-3279	0	-1642
14400-18000	2888	-1255	-2091	0	-458
18000-21600	2233	-906	-1510	0	-184
21600-25200	1768	-698	-1163	0	-92
25200-28800	1434	-558	-930	0	-54
28800-32400	1187	-458	-763	0	-34
32400-36000	999	-383	-639	0	-23
36000-39600	852	-326	-543	0	-16
39600-43200	734	-280	-466	0	-12
43200-46800	638	-242	-404	0	-9
46800-50400	557	-211	-352	0	-7
50400-54000	489	-185	-309	0	-5
54000-57600	431	-163	-272	0	-4
57600-61200	380	-144	-240	0	-3
61200-64800	336	-127	-212	0	-3
64800-68400	297	-112	-187	0	-2
68400-72000	263	-99	-166	0	-2
72000-75600	233	-88	-147	0	-2
75600-79200	207	-78	-130	0	-2
79200-82800	184	-69	-116	0	-1
82800-86400	163	-62	-103	0	-1
					Σ 10

12.9 Resultados modelo fachada QB01 EXT

QB01 EXT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,0885	22,033	22,0833	22,1637
600	22,1686	22,066	22,1666	22,2421
900	22,2405	22,099	22,2498	22,2922
1200	22,3041	22,132	22,2853	22,3291
1500	22,3594	22,165	22,3207	22,3585
1800	22,4063	22,198	22,3561	22,3832
2100	22,445	22,231	22,3777	22,4045
2400	22,4754	22,264	22,3993	22,4232
2700	22,4975	22,297	22,4209	22,4401
3000	22,5113	22,33	22,4365	22,4554
3300	22,5167	22,363	22,452	22,4694
3600	22,5139	22,396	22,4676	22,4823
3900	22,5206	22,4081	22,4798	22,4943
4200	22,5273	22,4203	22,492	22,5055
4500	22,5341	22,4324	22,5042	22,5161
4800	22,5408	22,4446	22,5142	22,526
5100	22,5476	22,4567	22,5242	22,5354
5400	22,5543	22,4689	22,5343	22,5443
5700	22,5611	22,481	22,5428	22,5528
6000	22,5679	22,4932	22,5513	22,5608
6300	22,5748	22,5054	22,5599	22,5685
6600	22,5816	22,5175	22,5673	22,5759
6900	22,5884	22,5297	22,5747	22,5829
7200	22,5953	22,5418	22,5822	22,5897
7500	22,513	22,5156	22,5054	22,4325
7800	22,4388	22,4894	22,4287	22,3604
8100	22,3727	22,4632	22,3519	22,3163
8400	22,3148	22,437	22,3224	22,2852
8700	22,265	22,4108	22,2928	22,2614
9000	22,2234	22,3846	22,2632	22,2422
9300	22,1899	22,3584	22,2469	22,2262
9600	22,1645	22,3322	22,2306	22,2126
9900	22,1473	22,306	22,2143	22,2007
10200	22,1382	22,2798	22,2036	22,1902
10500	22,1373	22,2536	22,1929	22,1809
10800	22,1444	22,2274	22,1822	22,1725
11100	22,142	22,2198	22,1745	22,1649
11400	22,1394	22,2122	22,1667	22,158
11700	22,1367	22,2046	22,159	22,1516
12000	22,134	22,197	22,153	22,1458
12300	22,1311	22,1895	22,1471	22,1404
12600	22,1282	22,1819	22,1411	22,1354
12900	22,1251	22,1743	22,1364	22,1307
13200	22,1219	22,1667	22,1317	22,1264
13500	22,1187	22,1592	22,1269	22,1223
13800	22,1153	22,1516	22,123	22,1184
14100	22,1118	22,144	22,1192	22,1148
14400	22,1082	22,1364	22,1153	22,1114



QB01EXT						
Intervalo	Qconducción (J/m2)				frente a lineal 5 min (valor-referencia)	
	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1 h
0-3600	-25732	-15858	-22692	-24459	-1273	8601
3600-7200	-20032	-20561	-20580	-20383	351	-178
7200-10800	7840	-2743	4536	6446	1394	-9189
10800-14400	3673	3596	4036	3945	-272	-349
14400-18000	2668	2879	2791	2731	-63	148
18000-21600	2024	2224	2100	2060	-36	164
21600-25200	1606	1761	1656	1628	-22	133
25200-28800	1316	1432	1351	1331	-15	101
28800-32400	1108	1196	1134	1119	-11	77
32400-36000	957	1024	976	965	-8	59
36000-39600	845	896	859	851	-6	45
39600-43200	761	800	771	765	-4	35
43200-46800	696	727	704	699	-3	28
46800-50400	645	670	651	647	-2	23
50400-54000	604	624	609	606	-2	18
54000-57600	570	587	575	572	-2	15
57600-61200	542	556	546	543	-1	13
61200-64800	518	530	521	519	-1	11
64800-68400	496	507	499	497	-1	10
68400-72000	476	486	479	477	-1	9
72000-75600	459	468	461	459	0	9
75600-79200	442	450	444	443	-1	7
79200-82800	426	434	428	427	-1	7
82800-86400	412	419	414	412	0	7

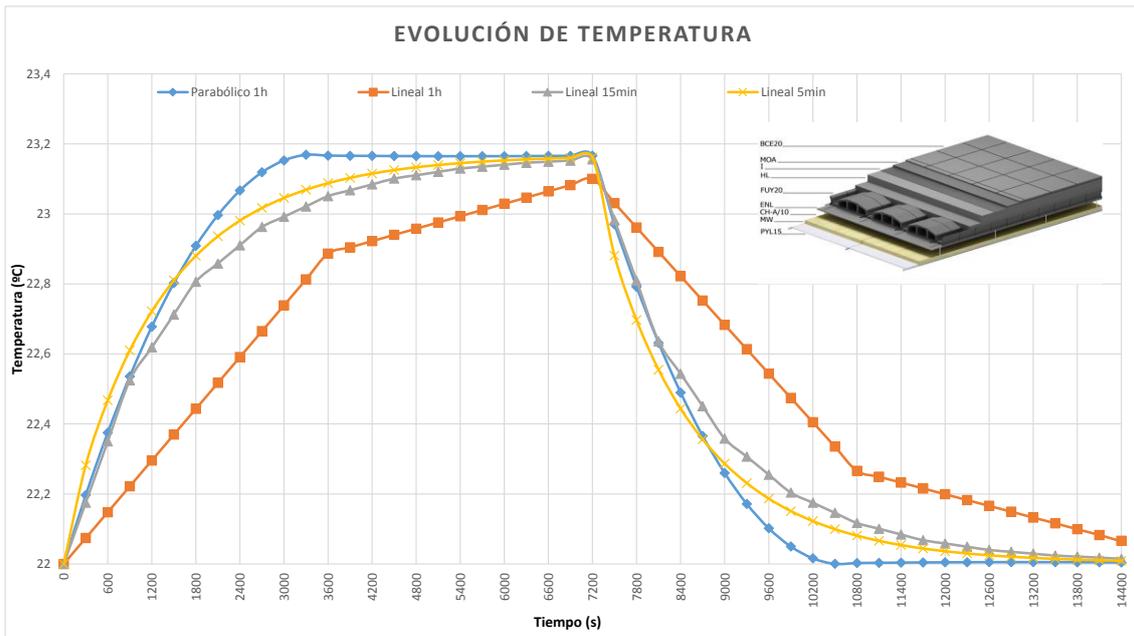
QB01EXT						
Qconvección (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-3851	-2138	-3404	-3782	-69	1644
3600-7200	-5988	-5064	-5733	-5849	-139	785
7200-10800	-2940	-4154	-3272	-2961	21	-1193
10800-14400	-1378	-1964	-1555	-1486	108	-478
14400-18000	-1000	-1252	-1058	-1026	26	-226
18000-21600	-759	-903	-793	-773	14	-130
21600-25200	-602	-696	-624	-611	9	-85
25200-28800	-494	-558	-508	-499	5	-59
28800-32400	-416	-462	-426	-420	4	-42
32400-36000	-359	-393	-367	-362	3	-31
36000-39600	-317	-343	-323	-319	2	-24
39600-43200	-285	-305	-290	-287	2	-18
43200-46800	-261	-276	-264	-262	1	-14
46800-50400	-242	-254	-244	-243	1	-11
50400-54000	-226	-236	-229	-227	1	-9
54000-57600	-214	-222	-216	-215	1	-7
57600-61200	-203	-210	-205	-204	1	-6
61200-64800	-194	-200	-195	-195	1	-5
64800-68400	-186	-191	-187	-186	0	-5
68400-72000	-179	-183	-180	-179	0	-4
72000-75600	-172	-176	-173	-172	0	-4
75600-79200	-166	-169	-167	-166	0	-3
79200-82800	-160	-163	-161	-160	0	-3
82800-86400	-154	-157	-155	-155	1	-2

QB01EXT						
Qradiación (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-6418	-3564	-5673	-6304	-114	2740
3600-7200	-9980	-8440	-9554	-9748	-232	1308
7200-10800	-4900	-6923	-5453	-4935	35	-1988
10800-14400	-2296	-3274	-2591	-2476	180	-798
14400-18000	-1667	-2086	-1764	-1710	43	-376
18000-21600	-1265	-1506	-1321	-1289	24	-217
21600-25200	-1004	-1160	-1040	-1019	15	-141
25200-28800	-823	-930	-847	-832	9	-98
28800-32400	-693	-771	-711	-700	7	-71
32400-36000	-598	-656	-611	-603	5	-53
36000-39600	-528	-571	-538	-532	4	-39
39600-43200	-475	-508	-483	-478	3	-30
43200-46800	-435	-460	-440	-437	2	-23
46800-50400	-403	-423	-407	-405	2	-18
50400-54000	-377	-393	-381	-379	2	-14
54000-57600	-356	-369	-359	-358	2	-11
57600-61200	-339	-349	-341	-340	1	-9
61200-64800	-323	-333	-326	-324	1	-9
64800-68400	-310	-318	-312	-311	1	-7
68400-72000	-298	-305	-299	-298	0	-7
72000-75600	-287	-293	-288	-287	0	-6
75600-79200	-276	-282	-278	-277	1	-5
79200-82800	-267	-272	-268	-267	0	-5
82800-86400	-257	-262	-259	-258	1	-4

QB01 EXT					
Parabólico (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-25732	-3851	-6418	36000	0
3600-7200	-20032	-5988	-9980	36000	0
7200-10800	7840	-2940	-4900	0	0
10800-14400	3673	-1378	-2296	0	0
14400-18000	2668	-1000	-1667	0	0
18000-21600	2024	-759	-1265	0	0
21600-25200	1606	-602	-1004	0	0
25200-28800	1316	-494	-823	0	0
28800-32400	1108	-416	-693	0	0
32400-36000	957	-359	-598	0	0
36000-39600	845	-317	-528	0	0
39600-43200	761	-285	-475	0	0
43200-46800	696	-261	-435	0	0
46800-50400	645	-242	-403	0	0
50400-54000	604	-226	-377	0	0
54000-57600	570	-214	-356	0	0
57600-61200	542	-203	-339	0	0
61200-64800	518	-194	-323	0	0
64800-68400	496	-186	-310	0	0
68400-72000	476	-179	-298	0	0
72000-75600	459	-172	-287	0	0
75600-79200	442	-166	-276	0	0
79200-82800	426	-160	-267	0	0
82800-86400	412	-154	-257	0	0
					Σ 0
QB01 EXT					
Lineal (1h)					
Intervalo	Q cond (J/m2)	Q conv (J/m2)	Q rad (J/m2)	Fuente	Balance
0-3600	-15858	-2138	-3564	36000	14440
3600-7200	-20561	-5064	-8440	36000	1935
7200-10800	-2743	-4154	-6923	0	-13819
10800-14400	3596	-1964	-3274	0	-1643
14400-18000	2879	-1252	-2086	0	-459
18000-21600	2224	-903	-1506	0	-185
21600-25200	1761	-696	-1160	0	-94
25200-28800	1432	-558	-930	0	-56
28800-32400	1196	-462	-771	0	-37
32400-36000	1024	-393	-656	0	-25
36000-39600	896	-343	-571	0	-18
39600-43200	800	-305	-508	0	-13
43200-46800	727	-276	-460	0	-9
46800-50400	670	-254	-423	0	-7
50400-54000	624	-236	-393	0	-5
54000-57600	587	-222	-369	0	-4
57600-61200	556	-210	-349	0	-3
61200-64800	530	-200	-333	0	-2
64800-68400	507	-191	-318	0	-2
68400-72000	486	-183	-305	0	-1
72000-75600	468	-176	-293	0	-1
75600-79200	450	-169	-282	0	-1
79200-82800	434	-163	-272	0	-1
82800-86400	419	-157	-262	0	-1
					Σ -9

12.10 Resultados modelo fachada QB01 INT

QB01 INT				
tiempo (s)	Parabólico	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5min
0	22	22	22	22
300	22,1966	22,0739	22,175	22,282
600	22,3751	22,1478	22,35	22,4674
900	22,5356	22,2217	22,525	22,6101
1200	22,678	22,2956	22,6188	22,7219
1500	22,8023	22,3695	22,7126	22,8102
1800	22,9086	22,4433	22,8064	22,8803
2100	22,9968	22,5172	22,8585	22,9363
2400	23,0669	22,5911	22,9106	22,981
2700	23,119	22,665	22,9627	23,0169
3000	23,1529	22,7389	22,9921	23,0458
3300	23,1689	22,8128	23,0215	23,0691
3600	23,1667	22,8867	23,0509	23,0879
3900	23,1662	22,9045	23,0676	23,103
4200	23,1658	22,9223	23,0843	23,1153
4500	23,1654	22,9401	23,101	23,1252
4800	23,1652	22,9579	23,1105	23,1333
5100	23,165	22,9757	23,1201	23,1398
5400	23,165	22,9934	23,1296	23,1451
5700	23,165	23,0112	23,1351	23,1495
6000	23,1651	23,029	23,1406	23,153
6300	23,1653	23,0468	23,1461	23,1559
6600	23,1657	23,0646	23,1493	23,1582
6900	23,1661	23,0824	23,1525	23,1602
7200	23,1666	23,1002	23,1557	23,1617
7500	22,9703	23,0307	22,9825	22,881
7800	22,792	22,9611	22,8093	22,6966
8100	22,6318	22,8916	22,6361	22,5548
8400	22,4897	22,8221	22,5434	22,4437
8700	22,3656	22,7525	22,4507	22,356
9000	22,2596	22,683	22,358	22,2864
9300	22,1716	22,6135	22,3066	22,231
9600	22,1017	22,5439	22,2552	22,1866
9900	22,0498	22,4744	22,2038	22,151
10200	22,016	22,4049	22,1748	22,1224
10500	22,0002	22,3353	22,1459	22,0994
10800	22,0025	22,2658	22,117	22,0809
11100	22,0032	22,2491	22,1006	22,066
11400	22,0038	22,2325	22,0842	22,0539
11700	22,0042	22,2158	22,0678	22,0441
12000	22,0046	22,1992	22,0585	22,0363
12300	22,0049	22,1825	22,0492	22,0299
12600	22,0051	22,1659	22,0399	22,0247
12900	22,0052	22,1493	22,0346	22,0206
13200	22,0052	22,1326	22,0293	22,0172
13500	22,0051	22,116	22,0239	22,0145
13800	22,0049	22,0993	22,0209	22,0122
14100	22,0046	22,0827	22,0179	22,0104
14400	22,0043	22,066	22,0148	22,009



QB01INT						
Qconducción (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-12955	-9111	-11493	-12062	-893	2951
3600-7200	-2433	-4453	-3484	-3174	741	-1279
7200-10800	10596	6249	9026	9653	943	-3404
10800-14400	131	2011	1165	865	-734	1146
14400-18000	92	544	192	139	-47	405
18000-21600	70	184	82	75	-5	109
21600-25200	63	93	65	64	-1	29
25200-28800	58	67	59	59	-1	8
28800-32400	54	58	55	54	0	4
32400-36000	51	53	51	51	0	2
36000-39600	47	49	48	48	-1	1
39600-43200	45	46	45	45	0	1
43200-46800	42	43	42	42	0	1
46800-50400	40	41	40	40	0	1
50400-54000	37	38	38	37	0	1
54000-57600	35	36	36	35	0	1
57600-61200	33	34	34	33	0	1
61200-64800	31	32	32	32	-1	0
64800-68400	30	31	30	30	0	1
68400-72000	28	29	28	28	0	1
72000-75600	27	27	27	27	0	0
75600-79200	25	26	25	25	0	1
79200-82800	24	24	24	24	0	0
82800-86400	22	23	22	22	0	1

QB01INT						
Qconvección (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-8642	-4788	-7613	-8429	-213	3641
3600-7200	-12588	-10729	-12096	-12297	-291	1568
7200-10800	-3973	-7376	-4952	-4167	194	-3209
10800-14400	-49	-1792	-533	-337	288	-1455
14400-18000	-34	-453	-82	-53	19	-400
18000-21600	-26	-129	-32	-28	2	-101
21600-25200	-24	-49	-25	-24	0	-25
25200-28800	-22	-29	-22	-22	0	-7
28800-32400	-20	-23	-21	-20	0	-3
32400-36000	-19	-20	-19	-19	0	-1
36000-39600	-18	-19	-18	-18	0	-1
39600-43200	-17	-17	-17	-17	0	0
43200-46800	-16	-16	-16	-16	0	0
46800-50400	-15	-15	-15	-15	0	0
50400-54000	-14	-15	-14	-14	0	-1
54000-57600	-13	-14	-13	-13	0	-1
57600-61200	-12	-13	-13	-13	1	0
61200-64800	-12	-12	-12	-12	0	0
64800-68400	-11	-12	-11	-11	0	-1
68400-72000	-11	-11	-11	-11	0	0
72000-75600	-10	-10	-10	-10	0	0
75600-79200	-9	-10	-9	-9	0	-1
79200-82800	-9	-9	-9	-9	0	0
82800-86400	-8	-9	-8	-8	0	-1

QB01INT						
Qradiación (J/m2)				Frente a lineal 5 min (valor-referencia)		
Intervalo	Parabólico 1h	Lineal 1h	Lineal 15min	Lineal 5 min	Diferencia parab 1 h	Diferencia lineal 1h
0-3600	-14403	-7980	-12688	-14048	-355	6068
3600-7200	-20979	-17882	-20160	-20495	-484	2613
7200-10800	-6622	-12294	-8254	-6945	323	-5349
10800-14400	-82	-2986	-889	-562	480	-2424
14400-18000	-57	-755	-137	-89	32	-666
18000-21600	-44	-215	-53	-47	3	-168
21600-25200	-39	-82	-41	-40	1	-42
25200-28800	-36	-48	-37	-37	1	-11
28800-32400	-34	-38	-34	-34	0	-4
32400-36000	-32	-34	-32	-32	0	-2
36000-39600	-30	-31	-30	-30	0	-1
39600-43200	-28	-29	-28	-28	0	-1
43200-46800	-26	-27	-26	-26	0	-1
46800-50400	-25	-26	-25	-25	0	-1
50400-54000	-23	-24	-24	-23	0	-1
54000-57600	-22	-23	-22	-22	0	-1
57600-61200	-21	-22	-21	-21	0	-1
61200-64800	-20	-20	-20	-20	0	0
64800-68400	-19	-19	-19	-19	0	0
68400-72000	-18	-18	-18	-18	0	0
72000-75600	-17	-17	-17	-17	0	0
75600-79200	-16	-16	-16	-16	0	0
79200-82800	-15	-15	-15	-15	0	0
82800-86400	-14	-15	-14	-14	0	-1

13 Anexo III. Modelos para coeficientes de convección

13.1 Introducción

Para un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar mecanismos fundamentales de transmisión: conducción, convección y radiación, además del mecanismo de acumulación.

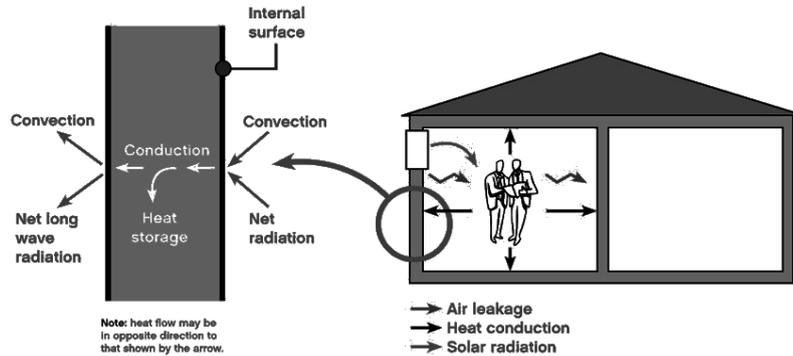
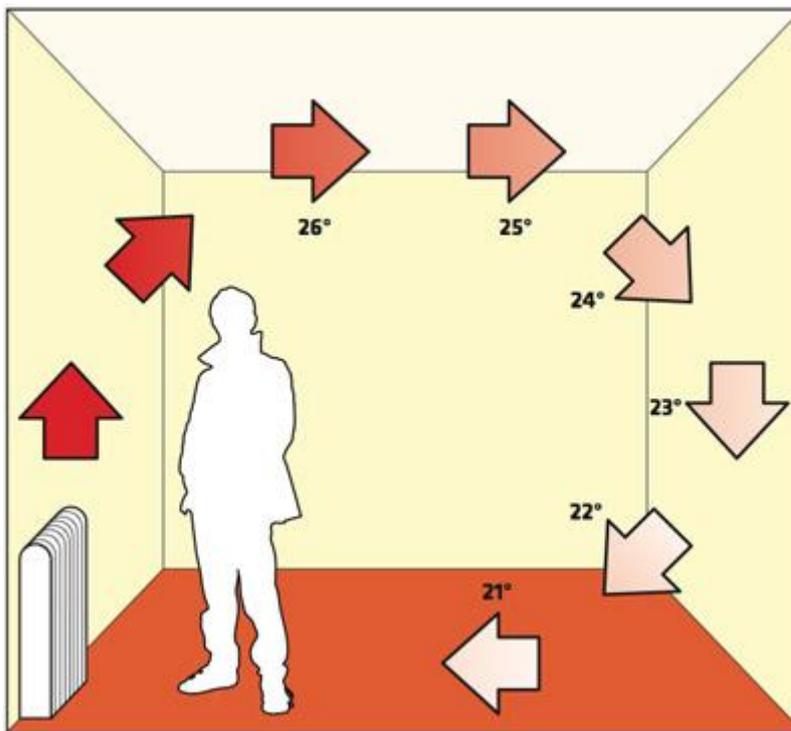


Figura 55. El flujo de calor en un edificio. Fuente: NZ Wood , 2014



La convección es un mecanismo de transferencia de energía térmica que consiste en el traspaso de calor por contacto directo de las partículas adyacentes, con presencia de flujo de masa.

Figura 56. Convection heating
Fuente :Thermoglance, 2014

Debido a que existe flujo de masa, esta sólo está presente en medios fluidos, pues en ellos las diferencias de temperaturas producen variaciones de densidades internas locales, lo que se traduce en un movimiento interno del fluido, llamado convección. Por esta convección las partículas que están más calientes ascienden llevando calor hacia zonas más heladas, en dichas zonas ceden el calor por contacto directo con partículas

adyacentes, al ceder calor bajan su temperatura, aumentando su densidad y bajan nuevamente, formando el ciclo convectivo.

El calor transmitido por convección es directamente proporcional a la agitación del fluido, al área del cuerpo en contacto con el fluido y a la diferencia de temperatura.

$$\phi = h \cdot A_s \cdot \Delta T$$

En esta ecuación se observa que la agitación del fluido se mide mediante la constante h , llamada coeficiente de película o de convección.

En el campo de la simulación energética, los fenómenos de transferencia, ya sea de flujo de aire o de calor, se modelan dentro de los edificios, entre las distintas partes del edificio (paredes) y el aire, y con el exterior del edificio. Las condiciones de contorno están representadas por la definición de una propiedad termodinámica (flujo) entre las paredes y el flujo de aire interno o externo, o mediante la definición de un estado fijo de la pared. Para modelar la interacción entre la pared (estado) y el fluido (estado) se utiliza a menudo un coeficiente de transferencia, conocido como “coeficiente de fricción”, coeficiente de convección.

En el caso de la convección interna, diversos autores han examinado la sensibilidad de las predicciones térmicas de los programas de simulación energética ((Spitler et al. (1991), Clarke (1991), Fisher and Pederson (1997)) y su trabajo ha demostrado que las predicciones en demanda de energía y consumo pueden estar condicionadas de manera muy fuerte por la elección del método de cálculo (hecho por el desarrollador del programa de simulación o por el usuario). Diferencias de entre 20-40% sobre las predicciones energéticas han sido mencionadas por varios de estos autores.

Los beneficios asignados a algunas medidas en el diseño son sensibles al enfoque utilizado para el cálculo de la convección interna. En consecuencia, la elección del método de cálculo de transferencia de calor puede afectar a las decisiones de diseño elaborado a partir de un análisis basado en la simulación. (Beausoleil-Morrison (1999)).

El coeficiente de transferencia es de hecho una suposición de modelado en sí mismo. El concepto de la transferencia de coeficientes se desarrolla en la teoría de capa límite, primera derivada por Ludwig Prandtl en 1904. Prandtl descubrió que en la mayoría de aplicaciones se limita la influencia de la viscosidad a una región extremadamente delgada muy cerca del cuerpo, y que el resto del flujo podría, con una buena aproximación, ser tratado como no viscoso. La presión en el límite capa y en el flujo principal se supone que es el mismo.

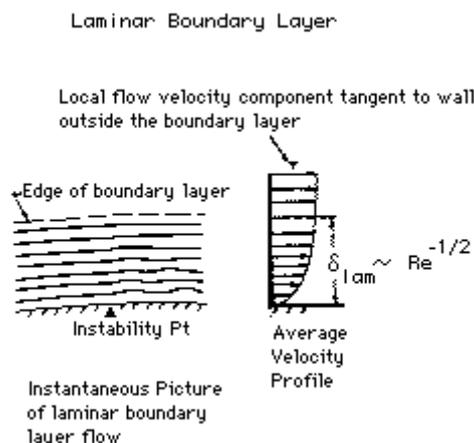


Figura 57. Concepto de teoría de la capa límite. Fuente: <http://adg.stanford.edu/aa200b/blayers/blayers.html>

Esto muestra claramente que los coeficientes de transferencia son por naturaleza una buena aproximación. Deben ser utilizados dentro de las limitaciones de la aproximación, es decir, sólo son aplicables para las condiciones de contorno concretas. El uso indebido de los coeficientes de transferencia, a menudo conduce a resultados no correctos.

En este capítulo se introducen los conceptos básicos de la teoría de la capa límite y la principales parámetros que describen la fricción, calor y transferencia de masa son abordados. Para más crítica se hace referencia a Kays y Crawford (1993) y Welty et al (2001).

Aplicación a los edificios se discute a través de artículos publicados durante ANEXO 41 y publicaciones recientes en la literatura.

Se comentan a continuación los modelos actuales más habituales disponibles tanto para la convección interna como externa.

13.2 Algoritmos de convección interior

Estos modelos se explican con mayor detalle en el Documento de Referencia EnergyPlus Ingeniería. A continuación se hace un breve repaso a dichos 6 algoritmos de convección interna para calcular la convección entre las superficies interiores de las zonas y el aire de las mismas en los procesos de simulación.

13.2.1 Adaptive Convection Algorithm

Este algoritmo de convección avanzado ofrece una selección dinámica de modelos con base en las condiciones existentes. Beausoleil-Morrison (2000, 2002) desarrolló un método para la selección dinámica de las ecuaciones de convección "hc", llamado algoritmo de convección adaptativo. El algoritmo se utiliza para seleccionar entre las ecuaciones hc disponibles la más adecuada para una superficie dada en un momento dado. Como Beausoleil- Morrison notó, el algoritmo de convección adaptativo está destinado a ser expandido y modificado para reflejar diferentes sistemas de clasificación y/o nuevas ecuaciones hc. El algoritmo de convección adaptativo implementado en EnergyPlus para las superficies interiores tiene un total de 45

categorías diferentes, así como 29 diferentes opciones para la selección de ecuaciones hc.

Los cuadros que figuran en el documento Engineering Reference resumen las categorías y las asignaciones predeterminadas de las ecuaciones hc.

13.2.2 Simple.

El modelo de convección simple utiliza coeficientes constantes para diferentes condiciones de transferencia de calor, utilizando los criterios para determinar la convección reducida y mejorada. Los coeficientes se toman directamente de Walton (1983). Walton derivó sus coeficientes de las conductancias superficiales para $\epsilon = 0.90$ del ϵ anual ASHRAE (1985). El componente de transferencia de calor radiante se estimó en $1,02 * 0,9 = 0,918$ BTU/h-ft²-F y luego se restó. Finalmente, los coeficientes se convirtieron a unidades SI para arrojar los siguientes valores:

Superficie vertical: $hc = 3,076$

Superficie horizontal con convección reducida: $hc = 0,948$

Superficie horizontal con convección mejorada: $hc = 4,040$

Superficie inclinada con convección reducida: $hc = 2,281$

Superficie inclinada con convección mejorada: $hc = 3,870$.

13.2.3 CIBSE.

Aplica coeficientes de transmisión de calor constantes, derivados de los valores típicos de CIBSE.

13.2.4 CeilingDiffuser.

Es un modelo de convección mezclada y forzada para la configuración de difusores de techo. El modelo relaciona el coeficiente de transmisión de calor con la tasa de cambios de aire de los techos, muros y suelos. El algoritmo del difusor de techo se basa en correlaciones empíricas desarrolladas por Fisher y Pedersen (1997). La correlación fue reformulada para utilizar la temperatura de salida de la habitación como la temperatura de referencia. Las correlaciones se muestran a continuación:

Suelos: $hc = 3,873 + 0,082 \times ACH^{0,98}$

Techos: $hc = 2,234 + 4,099 \times ACH^{0,503}$

Muros: $hc = 1,208 + 1,012 * 0,604^{ACH}$.

13.2.5 Cavity.

Este algoritmo fue desarrollado para modelar la convección en un "muro Trombe", es decir, el espacio de aire entre la superficie de la pared de almacenamiento y el acristalamiento exterior. El algoritmo es idéntico al modelo de convección basado en la norma ISO 15099. El uso del algoritmo para el modelado de una pared Trombe sin ventilación se ha validado frente a datos experimentales por Ellis (2003). Este algoritmo da los coeficientes de convección para el aire en una cavidad vertical de estrecha y no ventilada. Esto se aplica tanto para el espacio de aire entre los cristales de una ventana o en el espacio de aire entre la pared Trombe acristalamiento y la

superficie interna (a menudo una superficie selectiva). Estos coeficientes de convección son realmente la única diferencia entre una zona normal y una zona Trombe.



13.2.6 TARP.

Se basa en la variación de la convección natural a partir de las diferencias de temperatura, y se deriva de algoritmos de la ASHRAE. Se trata del algoritmo “Detallado” que se encontraba disponible en versiones anteriores de DesignBuilder. Es la opción predeterminada para nuevos modelos en la versión 3.0.0.085 o posteriores.

Para usuarios avanzados también están disponibles las siguientes opciones de convección interior:

- 7-ASHRAEVerticalWall
- 8-WaltonUnstableHorizontalOrTilt
- 9-WaltonStableHorizontalOrTilt
- 10-FisherPedersenCeilingDiffuserWalls
- 11-FisherPedersenCeilingDiffuserCeiling
- 12-FisherPedersenCeilingDiffuserFloor
- 13-AlamdariHammondStableHorizontal
- 14-AlamdariHammondUnstableHorizontal
- 15-AlamdariHammondVerticalWall
- 16-KhalifaEq3WallAwayFromHeat
- 17-KhalifaEq4CeilingAwayFromHeat
- 18-KhalifaEq5WallNearHeat
- 19-KhalifaEq6NonHeatedWalls
- 20-KhalifaEq7Ceiling
- 21-AwbiHattonHeatedFloor
- 22-AwbiHattonHeatedWall
- 23-BeausoleilMorrisonMixedAssistedWall
- 24-BeausoleilMorrisonMixedOpposingWall

- 25-BeausoleilMorrisonMixedStableFloor
- 26-BeausoleilMorrisonMixedUnstableFloor
- 27-BeausoleilMorrisonMixedStableCeiling
- 28-BeausoleilMorrisonMixedUnstableCeiling
- 29-FohannoPolidoriVerticalWall
- 30-KaradagChilledCeiling
- 31-ISO15099Windows
- 32-GoldsteinNovoselacCeilingDiffuserWindow
- 33-GoldsteinNovoselacCeilingDiffuserWalls
- 34-GoldsteinNovoselacCeilingDiffuserFloor

Nota: Para evitar discontinuidades en los cálculos de la tasa de transmisión de calor superficial, todas las correlaciones se extrapolan cuando sobrepasan el límite inferior de los datos asignados (3 renov/h) para un límite de convección natural, el cual aplica durante las horas en que el sistema está inactivo.

13.3 Algoritmo de convección exterior

Ha habido numerosas investigaciones orientadas a formular modelos para estimar el coeficiente de convección exterior. Desde la década de los años '30 se han publicado muchos métodos diferentes para calcular este coeficiente, con mucha disparidad entre ellos (Cole y Sturrock, 1977; Yazdanian y Klems, 1994).

Los coeficientes de convección exterior son esenciales en el análisis energético y la simulación energía cuyo objetivo es el cálculo de las ganancias y pérdidas de calor por convección, entre otros, de fachadas y cubiertas con el medio circundante. Estos coeficientes son funciones complejas que, entre otros factores, dependen de la geometría, los edificios del entorno, la rugosidad de los elementos de la envolvente (fachada, cubierta..), los patrones de flujo de aire, las diferencias de temperatura, etc.

A continuación, se describen los principales modelos para el cálculo de los factores de convección exterior.

13.3.1 Adaptive Convection Algorithm.

El algoritmo de convección adaptativa predeterminada ofrece una selección dinámica de los modelos de convección sobre la base de las condiciones de cada caso concreto. Este algoritmo tiene una estructura que permite un control más preciso sobre los modelos utilizados para superficies que presenten particularidades. El algoritmo para la cara exterior fue desarrollado para EnergyPlus pero toma prestado conceptos y debe su nombre a la investigación realizada por Beausoleil-Morrison (2000, 2002) para la convección en la cara interior (ver más arriba). El algoritmo de convección adaptativo implementado en EnergyPlus para la cara exterior es mucho más simple que la de la cara interior. El sistema de clasificación de la superficie tiene un total de 4 categorías diferentes para las superficies que dependen de direcciones dirección del

viento y de flujo de calor actuales. Sin embargo, en otros aspectos, es más complejo en el que la ecuación h_c se divide en dos partes, para convección forzada y natural.

13.3.2 Simple Combined.

El algoritmo simple utiliza rugosidad de la superficie y la velocidad del viento de superficie local para calcular el coeficiente de transferencia de calor exterior. Este es un coeficiente de transferencia de calor combinada que incluye radiación para cielo, tierra y aire. La correlación se basa en la Figura 1, Página 25.1 (transmisión de vapor de Datos térmica y Agua), 2001 ASHRAE Handbook of Fundamentals.

13.3.3 CIBSE.

Aplica coeficientes de transmisión de calor dependiendo de la orientación, derivados de los valores típicos de CIBSE.

13.3.4 ASHRAE Vertical Wall.

Idéntico a la opción DOE-2.

13.3.5 TARP.

TARP o Programa de Investigación de Análisis Térmico, es un precursor importante de EnergyPlus (Walton 1983). Walton desarrolló un modelo integral para la convección exterior mediante la mezcla de las correlaciones de ASHRAE y experimentos de placa plana por Sparrow et. al. En versiones anteriores de EnergyPlus, anteriores a la versión 6, el modelo "TARP" fue llamado "detallado". El modelo fue reimplantado en la versión 6 para utilizar el Area y los valores de perímetro para el conjunto de superficies que conforman una fachada o en el techo, en lugar de la superficie única que está siendo modelado.

13.3.6 DOE-2.

El modelo de convección DOE-2 es una combinación de la MoWiTT y modelos detallados de convección BLAST (LBL 1994). Es la opción predeterminada para nuevos modelos en v3.0.0.085 o posteriores.

13.3.7 MoWiTT.

El modelo MoWiTT se basa en mediciones realizadas en las instalaciones de Windows Mobile Prueba térmica (MoWiTT) (Yazdanian y Klems 1994). La correlación se aplica a superficies muy lisas y verticales (por ejemplo, vidrio de ventana) en edificios de baja altura. El algoritmo MoWiTT puede no ser apropiado para superficies rugosas, superficies de gran altura, o superficies que emplean aislamiento móvil.

Las siguientes opciones de convección exterior también están disponibles para los usuarios más avanzados:

8-WaltonUnstableHorizontalOrTilt

9-WaltonStableHorizontalOrTilt

- 10-AlamdariHammondStableHorizontal
- 11-AlamdariHammondUnstableHorizontal
- 12-FohannoPolidoriVerticalWall
- 13-NusseltJurges
- 14-McAdams
- 15-Mitchell
- 16-BlockenWindard
- 17-Emmel
- 18-ClearRoof

Nota: Cuando la superficie está mojada (es decir, está lloviendo y la superficie está expuesta al viento), el coeficiente de convección aparece en los resultados como un número muy grande (1000) y la superficie está expuesta al aire libre de la temperatura de bulbo húmedo en vez del exterior Temperatura de bulbo seco.

No se pueden realizar cambios en la configuración de convección de superficie individuales donde la superficie es una partición interna.

13.4 Conclusiones

En los modelos relacionados con la transferencia de calor en edificios se ven comprometidos el calor por conducción, radiación y convección. Si bien los dos primeros se encuentran modelados bajo modelos analíticos y numéricos, el modelado de la transferencia de calor por convección resulta más complejo y normalmente es menos riguroso. Esto es debido a la dependencia de dicho coeficiente con el comportamiento del aire dentro del recinto.

El problema encontrado puede simplificarse en la falta de rigurosidad con la que se establece el "Coeficiente de transferencia de película" o "h". De esta manera, se han presentado en este anexo diversos procedimientos reflejados en el Manual de EnergyPlus que existen para la caracterización de este parámetro.

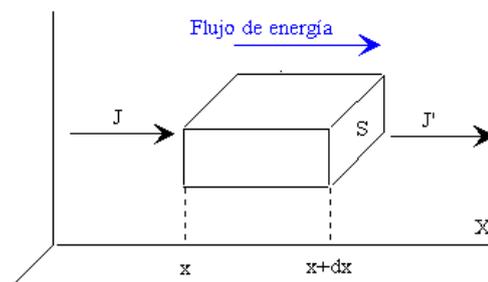
Existe un eslabón relativamente débil en el estudio e implementación de estas técnicas para la mejora del ahorro energético. Se trata de la caracterización de la transferencia de calor producida entre el aire y los elementos constructivos del edificio. El cálculo o medición de dicha caracterización a través del parámetro llamado "Coeficiente de transferencia de calor por convección", que sería por tanto objeto de una futura línea de investigación.

Todos los algoritmos anteriores se describen plenamente en la EnergyPlus Ingeniería de referencia.

14 Anexo IV. Transferencia de calor unidireccional multicapa Método Lineal

14.1 Planteamiento del problema

La resolución de la transmisión de calor multicapa unidimensional (Cannon, 1984) pasa por la resolución de la ecuación de conducción de calor unidimensional¹² siguiente, que debe ser aplicada sobre cada capa de material con ciertas condiciones de contorno. La energía que entra en el elemento de volumen en la unidad de tiempo es $J\delta$, y la que sale es $J'\delta$. La energía del elemento cambia, en la unidad de tiempo, en una cantidad igual a la diferencia entre el flujo entrante y el flujo saliente.



Fuente: García, 2014

Imagen 1. Conducción de calor. ley de Fourier

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$\alpha \equiv$ difusividad térmica [m^2 / s]

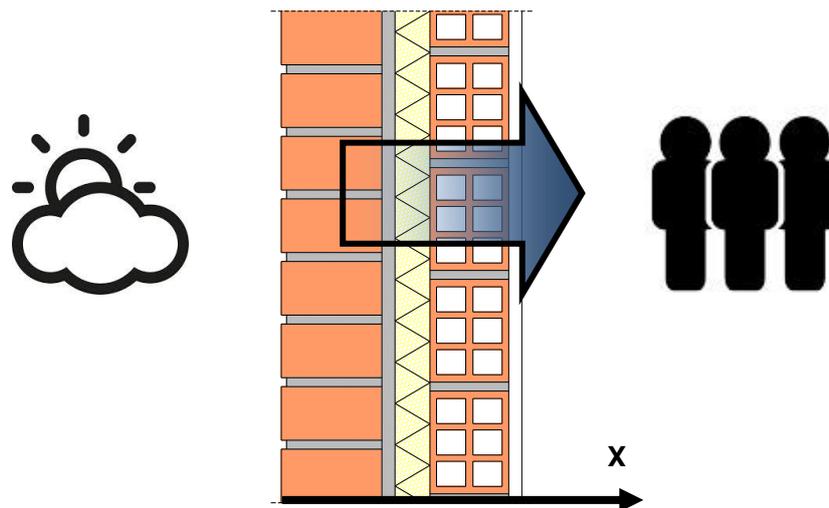
$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot cp}$$

$k \equiv$ conductividad térmica del material [W/mK]

$\rho \equiv$ densidad [kg/m^3]

$cp \equiv$ capacidad calorífica [J/kgK]

¹² Hay que tener en cuenta La ley de Fourier que afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía y el gradiente de temperatura.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 2 . Transferencia de calor unidimensional multicapa

De acuerdo al eje de x tomado, un valor positivo indica que el calor se dirige hacia el interior, mientras que un valor negativo indica que sale o lo pierde el recinto.. Las hipótesis de cálculo tenidas en cuenta son:

- El material es isótropo (homogéneo).
- El calor, la energía, fluye perpendicularmente al muro.
- La temperatura en el contacto de los materiales es la misma.

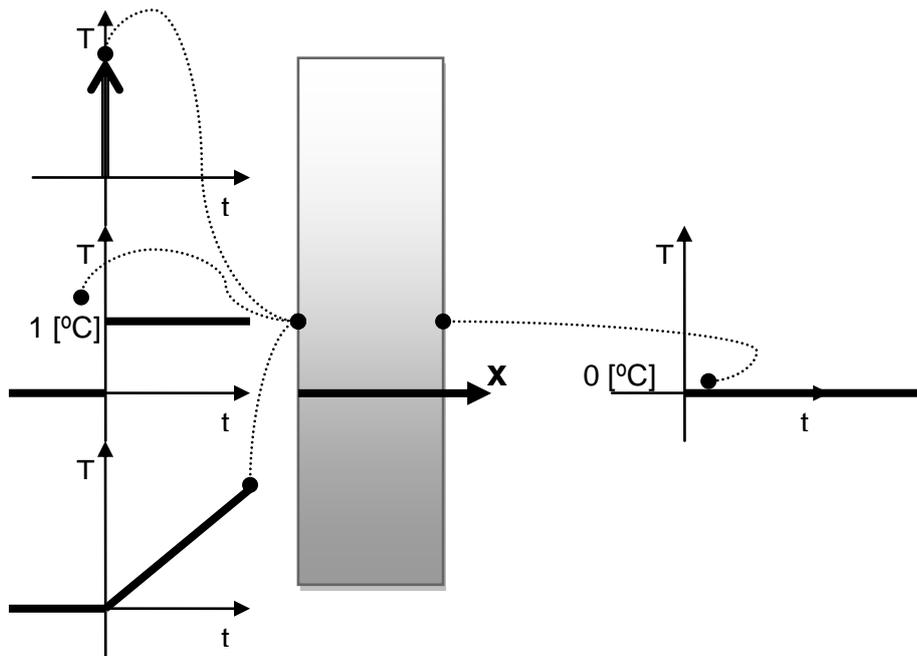
Las excitaciones de la capa son debidas a cambios de temperatura (estrictamente de la superficie). Excitaciones fundamentales son, por ejemplo:

- Impulso de temperatura de duración infinitamente pequeña y magnitud infinitamente grande (Delta de Dirac)(Schwartz, 1966).
- Un escalón (función de Heaviside¹³) (Schwartz, 1966) unitario de temperatura.
- Una subida en rampa de temperatura con cierta pendiente.

Si se observa cada una de estas funciones es la derivada de la siguiente (en el sentido generalizado, o también llamado en matemáticas “distribuciones”¹⁴ (Lighthill, 1958), de la derivada ya que en el sentido clásico de derivada, ésta no existe, por ejemplo en $t=0$ la función escalón no tiene derivada clásica).

¹³ La función escalón de Heaviside, también llamada función escalón unitario, debe su nombre al matemático inglés Oliver Heaviside. Es una función discontinua cuyo valor es 0 para cualquier argumento negativo, y 1 para cualquier argumento positivo.

¹⁴ Una distribución o función generalizada es un objeto matemático que generaliza la noción de función y la de medida, asignan a cada punto del espacio sobre el que están definidas un numero (real o complejo), las distribuciones actúan sobre un espacio de funciones asignando a cada una de ellas un número. La distribución más conocida es Delta de Dirac.



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 3 .Excitaciones producidas : Impulso, escalón y subida con pendiente

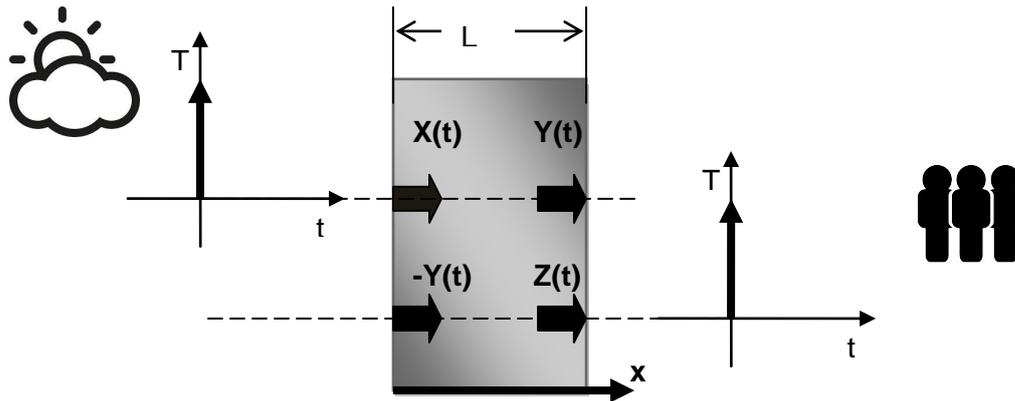
La respuesta buscada es la densidad del flujo de calor [W/m²] que por conducción llega, bien al lado opuesto de la excitación, bien al mismo lado de la excitación. En general, la literatura especializada ha llamado a estas respuestas X(t), Y(t), Z(t) en función de la localización del par (excitación, respuesta). Más tarde se verá que se deben hacer matizaciones adicionales respecto al tipo de señal de excitación (pulso, escalón, rampa, triángulo, etc..) y respecto al modo de muestreo de la respuesta (esto es, con qué cadencia se observa el flujo de calor).

Una representación de dichas respuestas y excitaciones se puede ver en la figura. Como se mostrará más adelante, la respuesta en la densidad de flujo de calor por la cara exterior de un muro debida a cambios interiores de temperatura es igual (cambiado el signo) a la respuesta en la cara interior debida a un cambio exterior. (Nota: Esto es así, siempre y cuando el muro no sea ventilado).

Particularmente interesante es la respuesta Z(t), ya que indica la densidad de flujo de calor interior debida a cambios de temperatura interiores. Esta respuesta sirve, en el método de las series temporales radiantes, para descubrir el ritmo al cual la radiación que incide sobre la cara interior de un muro es devuelta en forma de convección al aire del volumen.

Para resolver la respuesta de una capa se debe resolver la ecuación:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$



Fuente: Elaboración propia.

Imagen 4 . Excitaciones y respuestas.

Con las condiciones de contorno siguientes:

$$t = 0 \rightarrow T(x,0) = 0$$

$$t > 0 \rightarrow T(0,t) = 1 \quad , \quad T(L,t) = 0$$

Que implican que inicialmente la capa está a 0[°C] y que la temperatura en la cara exterior se levanta súbitamente a 1[°C] (respuesta ante un escalón, llamada también respuesta inicial).

Para hallar la solución se usa la transformada de Laplace en la variable temporal.

$$\underbrace{y(t)}_{\substack{\text{Symbols} \\ \text{for} \\ \text{original function}}} \xrightarrow{\text{Laplace Transform}} \underbrace{Y(s)}_{\substack{\text{Symbols} \\ \text{for} \\ \text{Laplace Transformed Function}}} = \underbrace{\int_0^{\infty} e^{-st} y(t) dt}_{\substack{\text{Definition} \\ \text{of} \\ \text{Laplace Transformed Function}}}$$

Fuente: ShareTechNote, 2014.

Imagen 5 .Esquema de Transformada de laplace

Como se puede ver en el esquema la Transformada de Laplace puede ser una herramienta muy útil que ayuda a encontrar una solución de una ecuación diferencial. Al transformar una ecuación diferencial en una forma de Laplace, la forma transformada se convierte en una forma algebraica de la que se puede obtener la solución de una forma más sencilla.

Una vez que se obtiene la solución usando la transformada de Laplace, se usa la "transformada inversa de Laplace" para expresar la solución en formato más significativo al problema real.

Este proceso de cómo transformada de Laplace se está utilizando se puede ilustrar como sigue.

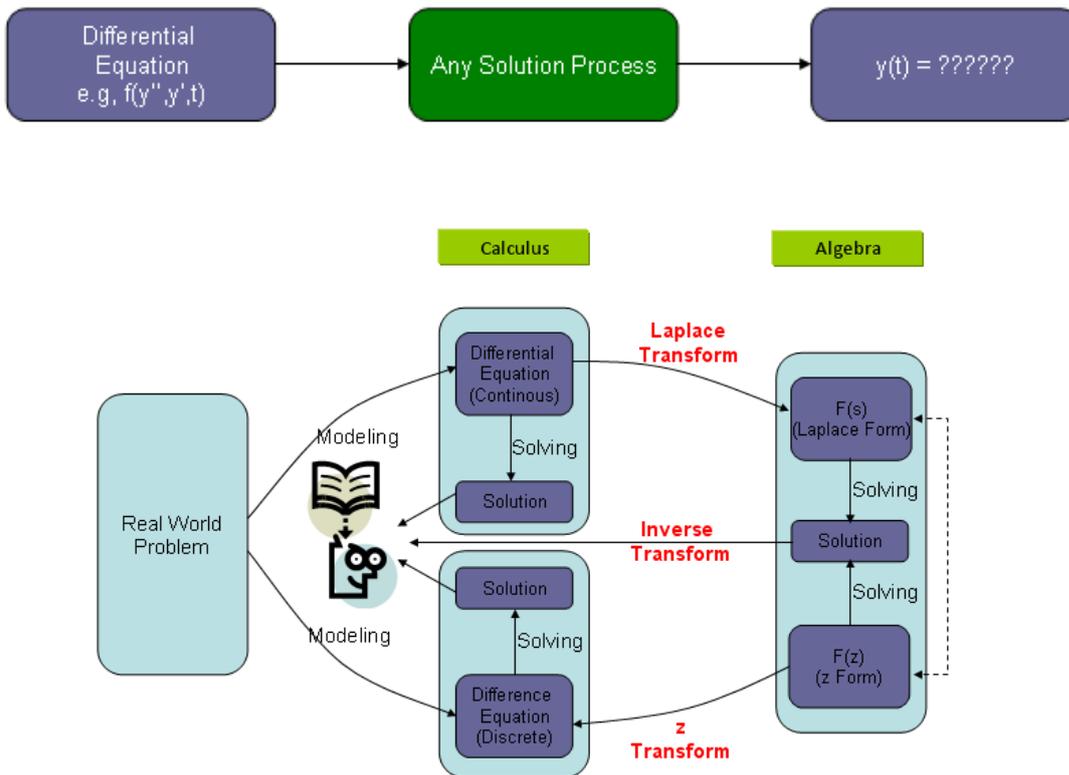


Imagen 6 .Proceso utilizando laTransformada de laplace Fuente: ShareTechNote, 2014

Como se ha mencionado, el objetivo es hallar la solución usando la transformada de Laplace¹⁵ en la variable temporal.

$$L(T(x,t)) = LT(x,s) = \int_0^{\infty} e^{-st} T(x,t) dt$$

$$L\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t)\right) = \frac{\partial^2 LT}{\partial x^2}(x,s) = \frac{d^2 LT}{dx^2}(x,s)$$

$$L\left(\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}(x,t)\right) = \frac{1}{\alpha} [s \cdot LT - T(x,0)] = \frac{s}{\alpha} LT(x,s)$$

De manera que la ecuación diferencial parcial pasa a ser ordinaria en x y con la variable compleja s como “parámetro”. Ecuación diferencial de 2º orden homogénea.

Teniendo en cuenta las condiciones de contorno:

$$LT(0,s) = \frac{1}{s}$$

$$LT(L,s) = 0$$

¹⁵ La transformada de laplace es un operador LINEAL muy útil para la resolución de ecuaciones diferenciales. Laplace demostró cómo transformar las ecuaciones lineales NO HOMOGENEAS en ecuaciones algebraicas que pueden resolverse por medios algebraicos.

La primera representa la transformada de Laplace de un escalón en $t=0$. La solución general de la ecuación es:

$$LT(x, s) = C_1 \exp\left[-x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] + C_2 \exp\left[x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]$$

al aplicar la condiciones de contorno queda:

$$LT(x, s) = \frac{1}{s} \frac{sh\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Esta es la transformada de Laplace de la respuesta temporal de la temperatura en cualquier punto ante una excitación escalón de temperatura (de $1[^\circ\text{C}]$) en el exterior.

+++++

Si nos fijamos en una señal de entrada (fuerza aquí) podemos dividirla en segmentos muy pequeños en el tiempo. A medida que el tiempo se convierte en pequeño lo llamamos una función de impulso.

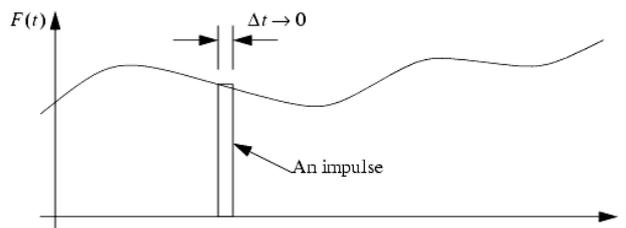
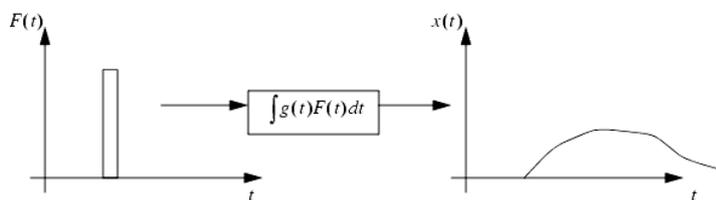
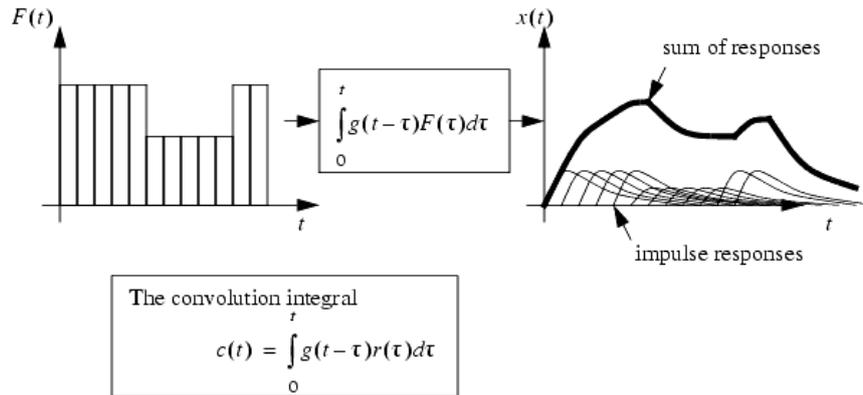


Imagen 7 . Señal de impulso. Fuente: Engineer On A Disk, 2014

Si ponemos un impulso en un sistema de la salida será una respuesta de impulso.



Si sumamos todas las respuestas de impulso juntos vamos a obtener una respuesta total del sistema. Esta operación se denomina la convolución.



La integral de convolución puede ser difícil de solucionar. Pero, la transformada de Laplace para la integral de convolución lo convierte en una simple multiplicación.

+++++

La función de transferencia de un sistema es la respuesta ante una excitación impulso (delta de Dirac). Esta excitación se obtiene como la derivada generalizada de la excitación escalón. Si se usa la propiedad de la transformada de Laplace:

$$L\left[\frac{df}{dx}\right] = s \cdot L[f] - f(0)$$

Tenemos:

$$LT_{\delta,0}(x,s) = \frac{sh\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Esta es la transformada de la respuesta en temperatura ante una excitación impulsiva de temperatura en la cara externa. Dado que lo que deseamos es la densidad del flujo de calor debemos usar la fórmula:

$$q(x,t) = -k \frac{dT}{dx}(x,t) \quad [W/m^2]$$

Luego derivando respecto a x normalmente :

$$Lq_{\delta,0}(x,s) = k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{ch\left[(L-x)\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}$$

Análogamente, pero esta vez excitando a la capa con un escalón de temperaturas en la superficie interior se obtiene:

$$LT(0, s) = 0$$

$$LT(L, s) = \frac{1}{s}$$

$$LT_{\delta,L}(x, s) = \frac{sh \left[x \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \right]}{sh \left[L \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \right]}$$

$$Lq_{\delta,L}(x, s) = -k \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{ch \left[x \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \right]}{sh \left[L \sqrt{\frac{s}{\alpha}} \right]}$$

Utilizando estas expresiones, finalmente podemos relacionar la temperatura y el flujo de calor a un lado de la capa con la temperatura y el flujo de calor al otro lado. Para ello hay que recordar que la respuesta ante una excitación cualquiera se construye como la convolución de la respuesta ante impulsos de un tamaño proporcional al valor de la señal de entrada. La transformada de la convolución¹⁶ es el producto de las transformadas de Laplace; de la función de transferencia – respuesta ante un impulso- y la transformada de la señal de entrada. Adicionalmente al ser un modelo lineal la respuesta ante una combinación lineal de las entradas es la combinación lineal de las respuestas. De otro modo, la densidad del flujo de calor en un cierto punto es la suma de aquel debido a las excitaciones a un lado de la capa más la debida a excitaciones en el otro lado.

Con todo lo anterior la respuesta final del sistema “capa” de un material se puede resumir en la siguiente ecuación matricial:

¹⁶ La convolución se define como la operación entre dos funciones. Si se utiliza esta definición, se pueden hallar ciertas simplificaciones que son útiles en el análisis, pues la transformada de Laplace de la convolución de dos funciones en el dominio del tiempo, resulta ser la multiplicación de las transformadas de las funciones en el dominio de la frecuencia:

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lq_{\delta,0}(0,s) & Lq_{\delta,L}(0,s) \\ Lq_{\delta,0}(L,s) & Lq_{\delta,L}(L,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} & -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} \\ k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{1}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} & -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}} \frac{ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1(s) & -G_0(s) \\ G_0(s) & -G_1(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\delta}(s) & Y_{\delta}(s) \\ -Y_{\delta}(s) & Z_{\delta}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

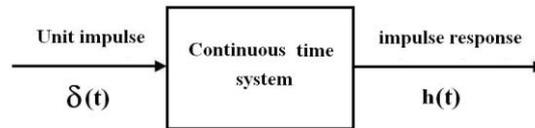
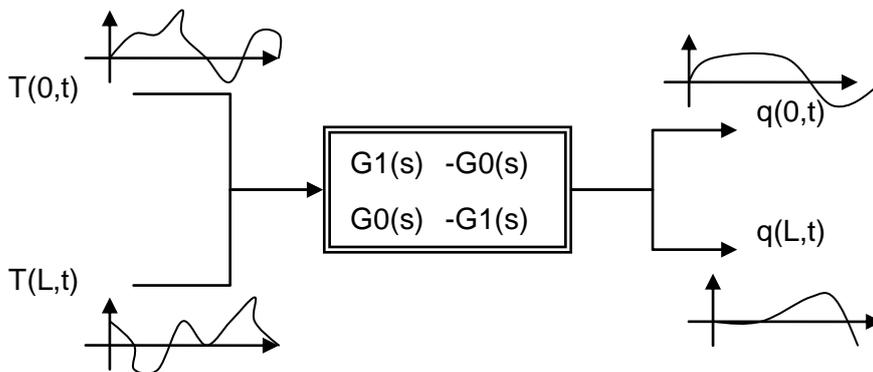
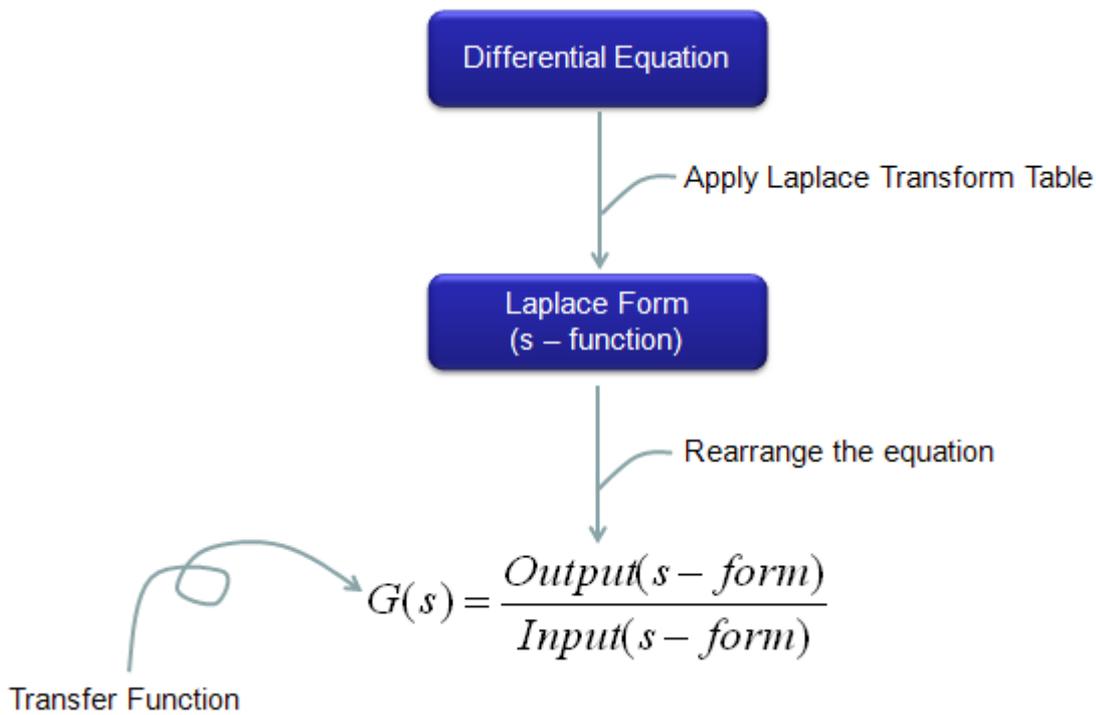


Imagen 8 . Respuesta impulso $h(t)$ en un sistema de tiempo continuo. Fuente: OpenStax, 2014

La expresión anterior muestra la transformada de Laplace de las respuestas “parciales” X, Y, Z debidas a una excitación impulso (de temperatura). De ahí el subíndice delta. La notación con $G(s)$ es más común en la literatura de control automático de sistemas. Una representación podría ser.





LT(0,s) y LT(L,s) representan la transformada de Laplace temporal de las excitaciones arbitrarias que puede recibir este sistema “capa” y las Lq(0,s) y Lq(L,s) son las transformadas de Laplace de la respuesta en densidad de flujo de calor.

Se puede escribir también como:

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lq_{\delta,0}(0,s) & Lq_{\delta,L}(0,s) \\ Lq_{\delta,0}(L,s) & Lq_{\delta,L}(L,s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/R \cdot M(s) \frac{ch[M(s)]}{sh[M(s)]} & -1/R \cdot M(s) \frac{1}{sh[M(s)]} \\ 1/R \cdot M(s) \frac{1}{sh[M(s)]} & -1/R \cdot M(s) \frac{ch[M(s)]}{sh[M(s)]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

con

$$R = \frac{L}{k} \quad , \quad M(s) = L\sqrt{\frac{s}{\alpha}} = \sqrt{L^2 \frac{1}{k/\rho \cdot cp}} \sqrt{s} = \sqrt{RC} \sqrt{s}$$

$$C = \rho \cdot cp \cdot L$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} & -\frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{1}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} \\ \frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{1}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} & -\frac{\sqrt{RC}}{R} \sqrt{s} \frac{ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ LT(L,s) \end{bmatrix}$$

Dónde R es la resistividad térmica de la capa y C es la capacidad de almacenamiento de energía por unidad de superficie de la capa. Así se aprecia que el producto RC y R determinan el comportamiento dinámico de la capa.

Sin embargo los muros están formados por muchas capas “conectadas” en serie, de forma que la temperatura de un lado de una capa es la temperatura del otro lado de la

siguiente capa y lo mismo con el flujo de calor. Por esta razón se debe despejar la temperatura y la densidad del flujo de calor a un lado en función de sus valores al otro lado, para poder componer la solución final.

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & -\frac{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{k\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ -k\sqrt{\frac{s}{\alpha}}sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & -R\frac{sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right]}{L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ -\frac{1}{R}L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}sh\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] & ch\left[L\sqrt{\frac{s}{\alpha}}\right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[M(s)] & -R\frac{sh[M(s)]}{M(s)} \\ -\frac{1}{R}M(s)sh[M(s)] & ch[M(s)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[\sqrt{RC}\sqrt{s}] & -R\frac{sh[\sqrt{RC}\sqrt{s}]}{\sqrt{RC}\sqrt{s}} \\ -\frac{1}{R}(\sqrt{RC}\sqrt{s})sh[\sqrt{RC}\sqrt{s}] & ch[\sqrt{RC}\sqrt{s}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

O bien la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[M(s)] & R\frac{sh[M(s)]}{M(s)} \\ \frac{1}{R}M(s)sh[M(s)] & ch[M(s)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix}$$

nota : A(s) = D(s)

Finalmente si en lugar de usar la temperatura de la superficie, como excitación, se usara la temperatura del aire u otra temperatura equivalente (con su coeficiente de convección asociado, constante en el tiempo) que incluyera efectos de la radiación la relación entre las temperaturas y los flujos de calor se podría escribir:

$$q_{ext} = h_{ext} \cdot (T_{ext}(t) - T(0,t))$$

$$Lq_{ext}(s) = h_{ext} \cdot (LT_{ext}(s) - LT(0,s)) = Lq(0,s)$$

$$q_{int} = h_{int} \cdot (T(L,t) - T_{int}(t))$$

$$Lq_{int}(s) = h_{int} \cdot (LT(L,s) - LT_{int}(s)) = Lq(L,s)$$

$$\begin{bmatrix} LT(0,s) \\ Lq(0,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix}$$

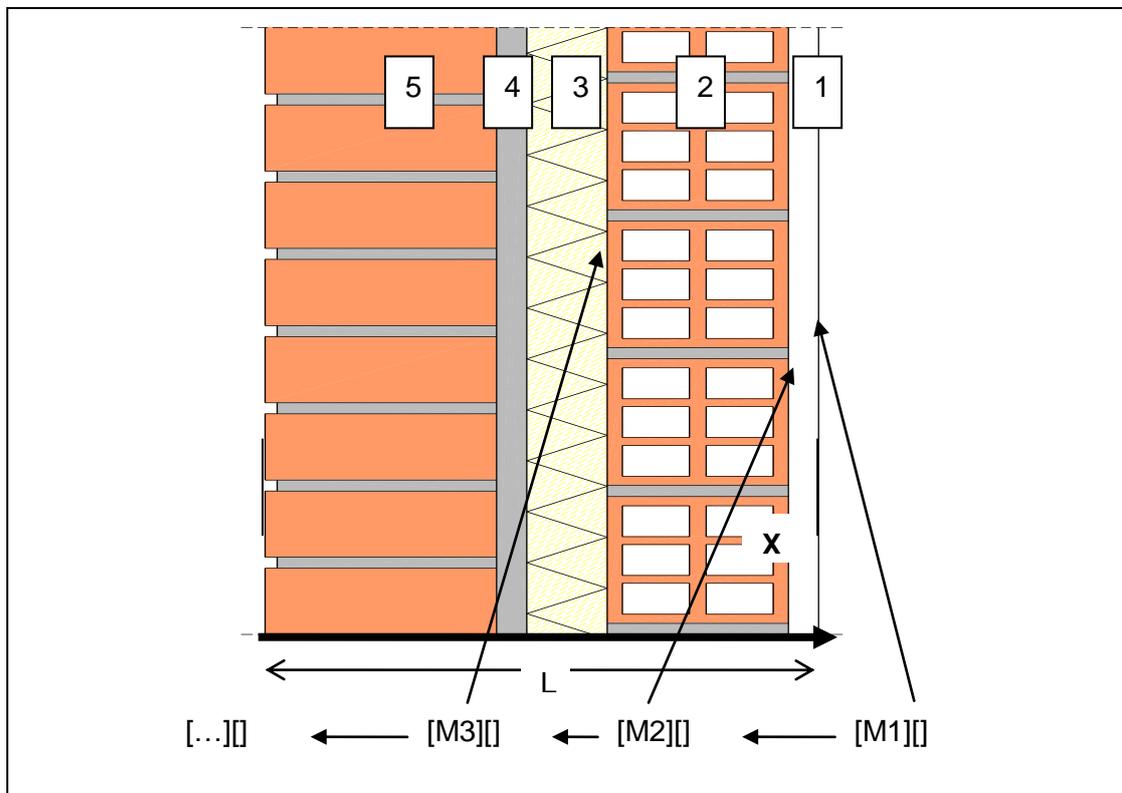
O bien la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,s) \\ Lq(0,s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(L,s) \\ Lq(L,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

Esta también es la forma general cuando existe una “capa” que no acumula energía y sólo ofrece resistencia térmica. Sería el caso de una cámara de aire no ventilada. En ese caso $1/h$ se debería substituir por la resistividad ($[km^2/W]$) de la capa.

Una vez tenemos cómo se relaciona la temperatura y la densidad del flujo de calor a ambas caras de una capa se puede componer la respuesta de un muro multicapa.



Matemáticamente supone multiplicar las matrices de cada capa en el orden que poseen (de fuera hacia adentro) :

$$\begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_n \cdots \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} A(s) & B(s) \\ C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix}$$

O bien en orden inverso, esto es de la capa más interna a la más externa teniendo en cuenta el cambio de signo de ciertos elementos de cada matriz, si se usan la matrices inversas :

$$\begin{bmatrix} LT(L, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \cdots \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_{n-1} \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ Lq(0, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_1 \cdots \begin{bmatrix} A(s) & -B(s) \\ -C(s) & D(s) \end{bmatrix}_n \begin{bmatrix} 1 & -1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix}$$

$x=0$ es la superficie exterior del muro y $x=L$ es la cara interior. Si se añade la convección a la matriz y se usa las temperaturas del aire a ambos lados, se modifica como sigue, cuando expresamos lo que ocurre fuera en función de lo que ocurre dentro (inverso al anterior):

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AA(s) & BB(s) \\ CC(s) & DD(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{int} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} LT_{ext}(s) \\ Lq_{ext}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA_h(s) & BB_h(s) \\ CC_h(s) & DD_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT_{int}(s) \\ Lq_{int}(s) \end{bmatrix}$$

Teniendo en cuenta que el orden del producto de matrices no es conmutativo. Eso significa que el orden de colocación de las capas cambia la dinámica. A modo de ejemplo se puede señalar que si ponemos el aislante en el interior de la vivienda, cuando arranquemos la calefacción la potencia irá a subir la temperatura del aire interior muy rápidamente ya que la masa del muro no se puede calentar al estar el aislante primero. Sin embargo, si el aislante se coloca más al exterior, el aire interior del recinto tardará más en llegar a la temperatura de confort ya que la masa interna del muro se irá calentando. En cualquier caso, cuando se llega a un estado estacionario la cantidad de calor que fluirá a través del muro será la misma en los dos casos, ya que sólo depende de la resistencia térmica total del muro y ésta si es la misma independientemente del orden de las capas.

Por tanto, la composición anterior ha servido para construir la **matriz de transferencia** del muro multicapa. No obstante la respuesta que nos interesa se encuentra en la densidad del flujo de calor en cada lado, de forma que hay que reescribir el sistema así.

$$\begin{bmatrix} Lq(0, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(s)/BB_h(s) & -1/BB_h(s) \\ 1/BB_h(s) & -AA_h(s)/BB_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ LT(L, s) \end{bmatrix}$$

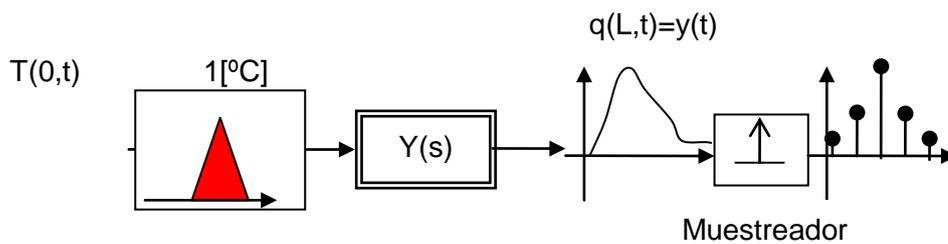
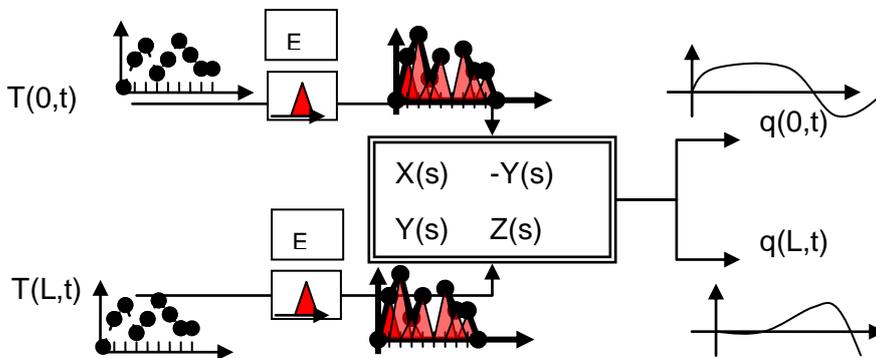
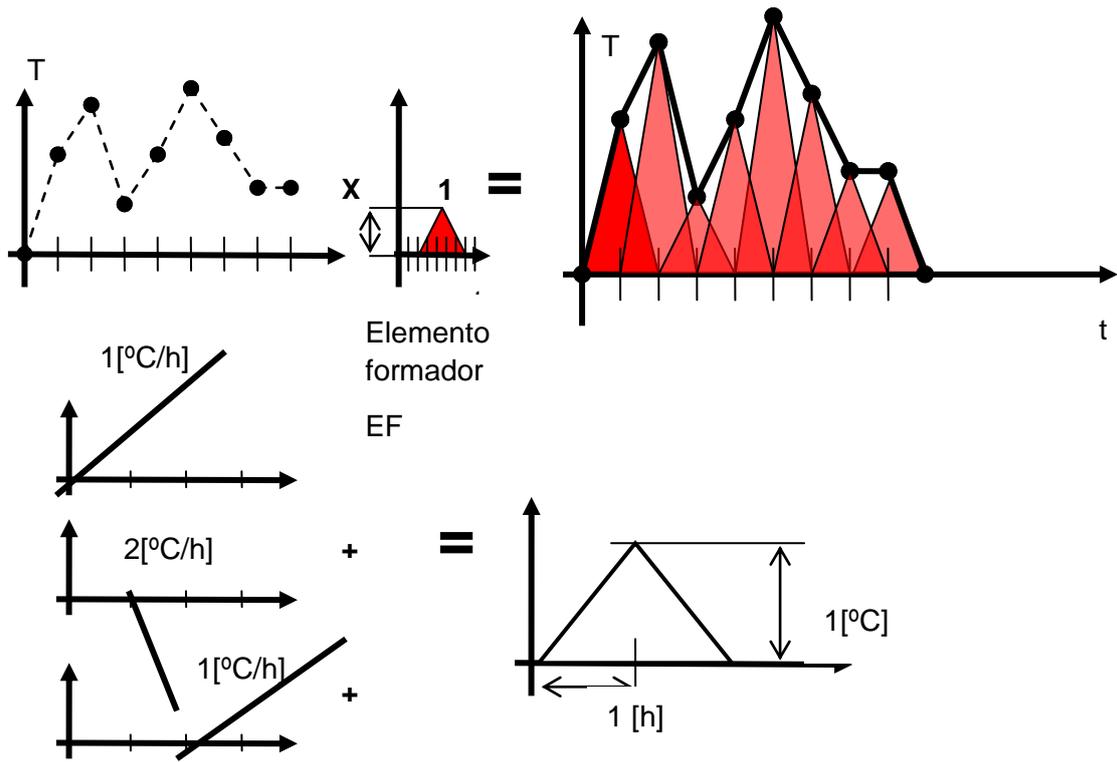
$$\begin{bmatrix} Lq(0, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ LT(L, s) \end{bmatrix}$$

En teoría este sería el final. Buscando la antitransformada de Lq para ciertas excitaciones anuales T(0,t) y T(L,t), obtendríamos los flujos de energía. Sin embargo aquí es dónde empiezan una serie de métodos para intentar resolver y manipular la solución. A continuación se exponen los más comunes más comunes.

14.2 Factores de respuesta

Como habitualmente los programas de simulación disponen de información meteorológica horaria, esto es radiación, temperatura seca exterior, etc... a intervalos de 1 hora, la señal de entrada debe "reconstruirse". La forma más simple es uniendo los valores con una línea recta. Para que dicha reconstrucción sea automática se utiliza un **elemento formador EF**, que en el caso de los factores de respuesta es un triángulo. El triángulo tiene una base de 2 pasos de tiempo (2 horas habitualmente) y una altura de 1[°C]. Por lo tanto la pendiente es de 1[°C/h]. Dicho triángulo se forma como combinación lineal de la respuesta a una rampa.

Los factores de respuesta son el conjunto de valores **muestreados** a una cierta cadencia (1 hora normalmente) de la respuesta en densidad de flujo de calor que se obtienen a una excitación triángulo de 1[°C] de salto. Por la linealidad del comportamiento del muro, la respuesta ante un triángulo de otro tamaño, 10[°C] digamos, será 10 veces la respuesta en densidad de flujo de calor obtenida para el triángulo unidad. La figura muestra los **factores de respuesta** del flujo interior de calor debido a una excitación exterior.



Altura 1[°C]	Altura T[°C]
$q(< 0) = 0$	$q(< 0) = 0$
$q(0) = y(0)$	$q(0) = y(0) \cdot T$
$q(1\Delta t) = y(1)$	$q(1\Delta t) = y(1) \cdot T$
$q(2\Delta t) = y(2)$	$q(2\Delta t) = y(2) \cdot T$
.....

La respuesta total es la respuesta a la suma de una sucesión de triángulos de diferente altura (temperatura) decalados un cierto paso de tiempo (1 hora). Por lo tanto la respuesta es la suma de las respuestas al triángulo de altura variable y decaladas en el tiempo. En forma matemática:

$$q(L, j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(0, j\Delta t - n\Delta t)$$

$$j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

, esto es, el flujo de calor en un momento es la suma de las infinitas contribuciones de las temperaturas previas y la actual (triángulos previos y el actual). Aquella que sucedió hace mucho tendrá poco peso (valor $y(x)$ bajo), mientras que las más recientes tendrán un peso mayor.

Si se tiene en cuenta la respuesta debida a variaciones de temperatura en el otro lado (en el interior) la respuesta total es la suma de ambas respuestas parciales:

$$q(L, j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(0, j\Delta t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} z(n) \cdot T(L, j\Delta t - n\Delta t)$$

$$j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Del mismo modo para flujo de calor en el exterior – aunque este es menos interesante- sería:

$$q(0, j\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} x(n) \cdot T(0, j\Delta t - n\Delta t) - \sum_{n=0}^{\infty} y(n) \cdot T(L, j\Delta t - n\Delta t)$$

$$j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Estas expresiones aparecen comúnmente en los **manuales de programas de simulación** (Manuales del LIDER, CALENERGT, DOE-2, EnergyPlus etc..).

Obviamente en la práctica no se usa una suma de términos infinita con una cantidad de valores muestreados infinitos. Más adelante se mostrará cómo se puede hacer la operación anterior. Por ahora, el problema que tenemos es cómo calcular esos factores de respuesta. A esta labor hay muchas alternativas según autores.

Las funciones de transferencia $X(s)$, $Y(s)$ y $Z(s)$ contienen toda la información sobre la respuesta dinámica del muro. De hecho si la variable compleja se substituye por su valor imaginario puro $j\omega$ (ω se mide en radianes/segundo = $2\pi/T$, T es el período en segundos), estas funciones nos dan la **respuesta ante excitaciones periódicas (senoidales)** de temperatura con una pulsación ω (frecuencia $1/T$ hercios). Por ejemplo, para la temperatura diaria, si variara de forma senoidal pura – más fría a las 7 a.m. y más caliente a las 2 p.m.- tendría una frecuencia $1/(24 \cdot 3600) = 1.16 \cdot 10^{-5}$ Hz o una pulsación de $2\pi/(24 \cdot 3600) = 7.3 \cdot 10^{-5}$ rad/s. Para

una cierta frecuencia $j\omega_0$, $X(j\omega_0)$ nos da la admitancia exterior, $Y(j\omega_0)$ la impedancia y $Z(j\omega_0)$ la admitancia interior. Esto son números complejos, que como en el caso de redes eléctricas, relaciona la excitación (aquí cierta pulsación de temperatura) con la respuesta (densidad de flujo de calor) y desfasa y amortigua su efecto. Así cuando la temperatura es máxima fuera, por ejemplo, el flujo de calor dentro no tiene porqué serlo, ese máximo se producirá en otro momento y la densidad del flujo de calor será más reducida que en un caso estacionario puro (que representa un caso de impedancia puramente resistiva, sólo parte real). En casas antiguas de muros gruesos apreciamos que hacia el atardecer, cuando fuera hace frío, dentro de casa se está caliente. Ese es un caso en el que el flujo de calor llega más tarde al interior (se desfasa respecto a la temperatura exterior).

Las funciones de transferencia también se caracterizan por la localización de sus **polos**. Esto es, aquellos valores de su argumento complejo que hacen que la función se “dispare” hacia infinito. Polos con parte imaginaria indican respuestas oscilantes del sistema ante una excitación impulsional. Este no es el caso de “cosas térmicas” como el calentamiento de los muros, de forma que los polos sólo pueden ser números reales. Adicionalmente, no pueden ser reales positivos ya que la respuesta se “dispararía” de nuevo hacia infinito (flujos de calor infinitos ante un impulso de temperatura no tienen sentido físico). Por lo tanto los polos sólo pueden ser números reales negativos ya que dan lugar a respuestas no oscilantes que desaparecen con el tiempo. Hay que tener especial cuidado ya que se trata de un sistema representado por una ecuación diferencial parcial y éstas, de algún modo, son equivalentes a un sistema infinito de ecuaciones diferenciales ordinarias y por lo tanto va a tener una cantidad infinita de “modos” asociados a polos todos ellos negativos. Recordemos la expresión de la matriz de transferencia y las funciones que la forman:

$$\begin{bmatrix} Lq(0, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(s)/BB_h(s) & -1/BB_h(s) \\ 1/BB_h(s) & -AA_h(s)/BB_h(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ LT(L, s) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0, s) \\ Lq(L, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X(s) & -Y(s) \\ Y(s) & Z(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, s) \\ LT(L, s) \end{bmatrix}$$

Esto es:

$$X(s) = DD_h(s)/BB_h(s)$$

$$Y(s) = 1/BB_h(s)$$

$$Z(s) = -AA_h(s)/BB_h(s)$$

Dónde $DD(s)$, $AA(s)$ $BB(s)$ son el resultados de multiplicar las tres funciones siguientes:

$$A(s) = D(s) = ch\left[\sqrt{RC}\sqrt{s}\right]$$

$$B(s) = R \frac{sh\left[\sqrt{RC}\sqrt{s}\right]}{\sqrt{RC}\sqrt{s}}$$

$$C(s) = \frac{1}{R} \left(\sqrt{RC}\sqrt{s}\right) sh\left[\sqrt{RC}\sqrt{s}\right]$$

en algún orden. El lector debe advertir que los polos de $X(s)$, $Y(s)$ y $Z(s)$ son aquellos valores que anulan el denominador de todas ellas y que es igual a $BB(s)$. Luego, como era de esperar, los polos son iguales para las tres y caracterizan al muro, que a su vez depende de los valores de resistencia térmica R y capacidad de acumulación de energía C de cada capa.

Existen diversos autores que en lugar de buscar las raíces de $BB(s) = 0$ -ecuación característica- que como se verá puede llegar a ser bastante complicado y costoso, utilizan un método que consiste en aproximar las funciones de transferencia por un modelo con un número de polos finito. Así, por ejemplo Wang y Chen, aplican un método que llaman regresión en el dominio de la frecuencia de las funciones de transferencia. Consiste en ajustar un modelo en la variable s a las funciones de transferencia $X(s)$, $Y(s)$ y $G(s)$. Esto es a la forma general:

$$\tilde{G}(s) = \frac{\beta_0 + \beta_1 s + \beta_2 s^2 + \beta_3 s^3 + \dots + \beta_r s^r}{1 + \alpha_1 s + \alpha_2 s^2 + \dots + \alpha_m s^m} = \frac{\tilde{B}(s)}{1 + \tilde{A}(s)}$$

$$r \leq m$$

Se escogen N (habitualmente 50) frecuencias (normalmente entre 10^{-3} y 10^{-8} Hz, recuerde el lector que 10^{-5} Hz es la frecuencia de un día) y se hace que la función G de aproximación y la función de transferencia original se aproximen de acuerdo con algún criterio. Por ejemplo Wang y Chen escogen como función a minimizar:

$$J(\bar{\theta}) = \sum_{k=1}^N \left| \tilde{B}(j\omega_k) - G(j\omega_k) \cdot [1 + \tilde{A}(j\omega_k)] \right|^2$$

$$\bar{\theta} = [\beta_0 \quad \beta_1 \quad \dots \quad \beta_r \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots]$$

Los betas y los alfas son los parámetros del ajuste y G representa cualquier función $X(s)$, $Y(s)$ o $Z(s)$.

Como no es la intención de esta guía el hacer un estudio pormenorizado, sino el dar las claves o guías para entender los principios usados por los programas de simulación, en este punto y para más detalles sobre éstos métodos, remitimos al lector a las referencias.

Prosigamos pues con la forma general para el cálculo de los polos del sistema original.

Dado que sabemos que s debe ser real y negativo, para buscar los polos se puede hacer el cambio de variable:

$$\begin{aligned}
 A(s) &= D(s) = ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \\
 B(s) &= R \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} \\
 C(s) &= \frac{1}{R} (\sqrt{RC} \sqrt{s}) sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \\
 M(s) &= \begin{bmatrix} ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] & R \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} \\ \frac{1}{R} (\sqrt{RC} \sqrt{s}) sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}] & ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La derivada de esta matriz respecto a s será necesaria más tarde por ello se reproduce aquí. La expresión siguiente es cuando $s \neq 0$:

$$\frac{dM(s)}{ds} = \frac{RC}{2} \begin{bmatrix} \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} & \frac{R}{RC \cdot s} \left\{ ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] - \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} \right\} \\ \frac{1}{R} \left\{ \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} + ch[\sqrt{RC} \sqrt{s}] \right\} & \frac{sh[\sqrt{RC} \sqrt{s}]}{\sqrt{RC} \sqrt{s}} \end{bmatrix}$$

En el caso de $s=0$ la derivada se ha de obtener como límite y vale:

$$\frac{dM(0)}{ds} = \frac{RC}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R}{3} \\ \frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$$

Si tenemos en cuenta que

$$\begin{aligned}
 sh(jx) &= j \sin(x) \\
 ch(jx) &= \cos(x)
 \end{aligned}$$

Obtenemos finalmente para el valor de A(s),B(s),C(s) y por ende para AA(s),BB(s),CC(s) y DD(S) cuando el argumento es un número real negativo (*atención: x es positivo*):

$$s = -x, x = -s, \sqrt{s} = \sqrt{-x} = j\sqrt{x}, x > 0$$

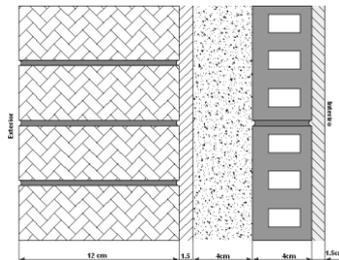
$$A(x) = D(s) = \cos[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}]$$

$$B(x) = R \frac{\sin[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}]}{\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}}$$

$$C(x) = \frac{-1}{R} (\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}) \sin[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}]$$

$$M(x) = \begin{bmatrix} \cos[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}] & R \frac{\sin[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}]}{\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}} \\ \frac{-1}{R} (\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}) \sin[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}] & \cos[\sqrt{RC} \cdot \sqrt{x}] \end{bmatrix}$$

Tomemos un muro de peso medio (307 kg/m²) y veamos cómo es su función característica:



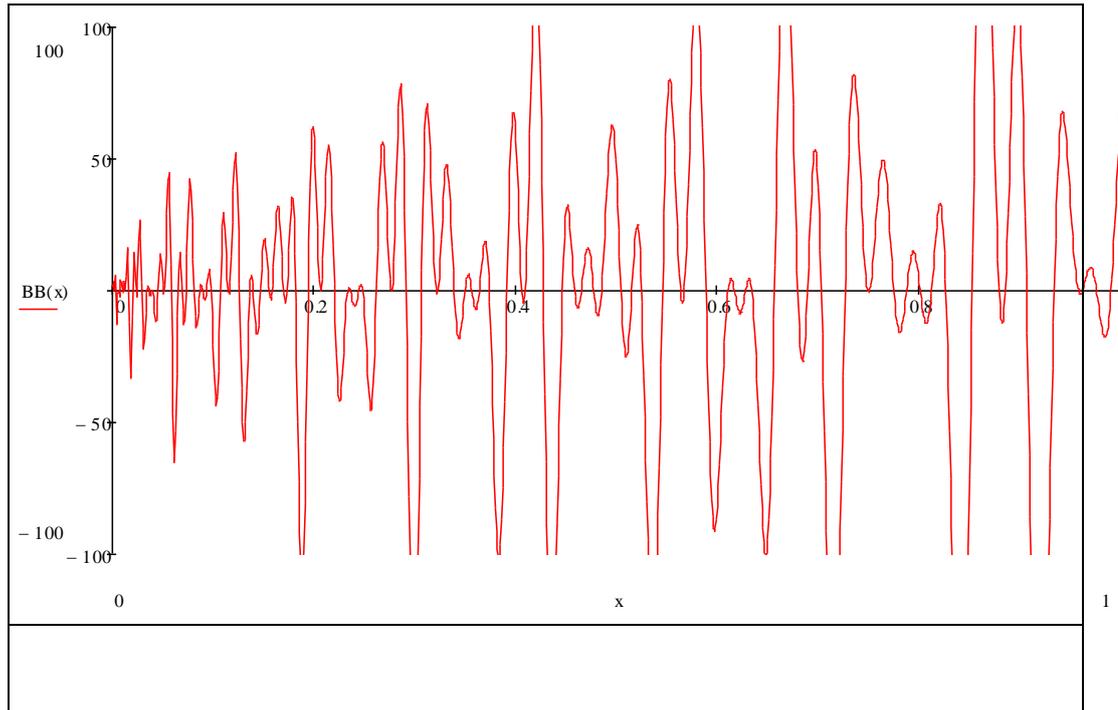
		Espesor[m]	K[W/mK]	Densidad[kg/m ³]	Cp[J/kgK]	R[m ² K/W]	C[J/m ² K]	RC[s]
	Exterior					1/16.67		0
5	Ladrillo macizo 1/2pie	0.12	0.87	1800	1380	0.14	298080	41731.2
4	Enfoscado de cemento	0.015	1.4	2000	1050	0.01	31500	315
3	Poliestireno expandido	0.04	0.033	25	837	1.21	837	1012.7
2	Ladrillo hueco sencillo	0.04	0.49	1200	920	0.08	44160	3532.8
1	Enlucido de yeso	0.015	0.3	800	920	0.05	11040	552
	Interior					1/9.09		0

El cálculo del valor de la matriz de transferencia sobre el eje real negativo es:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0,x) \\ Lq(0,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_5 \cdots \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_2 \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix}_1 \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} LT(0,x) \\ Lq(0,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} AA(x) & BB(x) \\ CC(x) & DD(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/h_{ext} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} LT(0,x) \\ Lq(0,x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AA_h(x) & BB_h(x) \\ CC_h(x) & DD_h(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(L,x) \\ Lq(L,x) \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Lq(0, x) \\ Lq(L, x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DD_h(x)/BB_h(x) & -1/BB_h(x) \\ 1/BB_h(x) & -AA_h(x)/BB_h(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LT(0, x) \\ LT(L, x) \end{bmatrix}$$

La representación gráfica de $BB_h(x)$ (x está radianes/segundo).



Cada corte con el eje de abscisas representa una raíz de $BB(x)$ y por lo tanto un polo. El lector puede observar la forma de oscilar de la función, sobretodo cerca del origen. En principio, los polos más cercanos al origen se corresponden con aquellos modos que perduran más en el tiempo ante una excitación impulsional.

14.2.1 Cálculo de las raíces

La obtención de todos los puntos donde una función de estas características corta el eje x es complicado, pudiendo no hallar todos esos puntos. Para obtener dichas raíces suele emplearse el método de Hittle y Bishop (1983) que se describe a continuación.

Para ello hay que reescribir la matriz de transferencia de otra forma mediante un cambio de variable.

$$M(xz) = \begin{bmatrix} ch[\sqrt{u2}] & \frac{sh[\sqrt{u2}]}{\sqrt{v2}} \\ (\sqrt{v2}) \cdot sh[\sqrt{u2}] & ch[\sqrt{u2}] \end{bmatrix}$$

$$u2(s) = RC \cdot s \quad , \quad v2(s) = \frac{RC}{R^2} s$$

$$s(xz) = \frac{1}{xz}$$

luego el cambio totales :

$$u2(xz) = \frac{RC}{xz} \quad , \quad v2(xz) = \frac{RC}{R^2} \frac{1}{xz}$$

Si sustituimos la nueva variable por su valor real positivo con signo menos (que se utiliza como antes para transformar las funciones hiperbólicas en trigonométricas) , podemos obtener la expresión de la matriz en el eje real negativo, esto es:

$$M(xx) = \begin{bmatrix} \cos[\sqrt{u2}] & \frac{\sin[\sqrt{u2}]}{\sqrt{v2}} \\ -(\sqrt{v2}) \cdot \sin[\sqrt{u2}] & \cos[\sqrt{u2}] \end{bmatrix}$$

$$xz = -xx$$

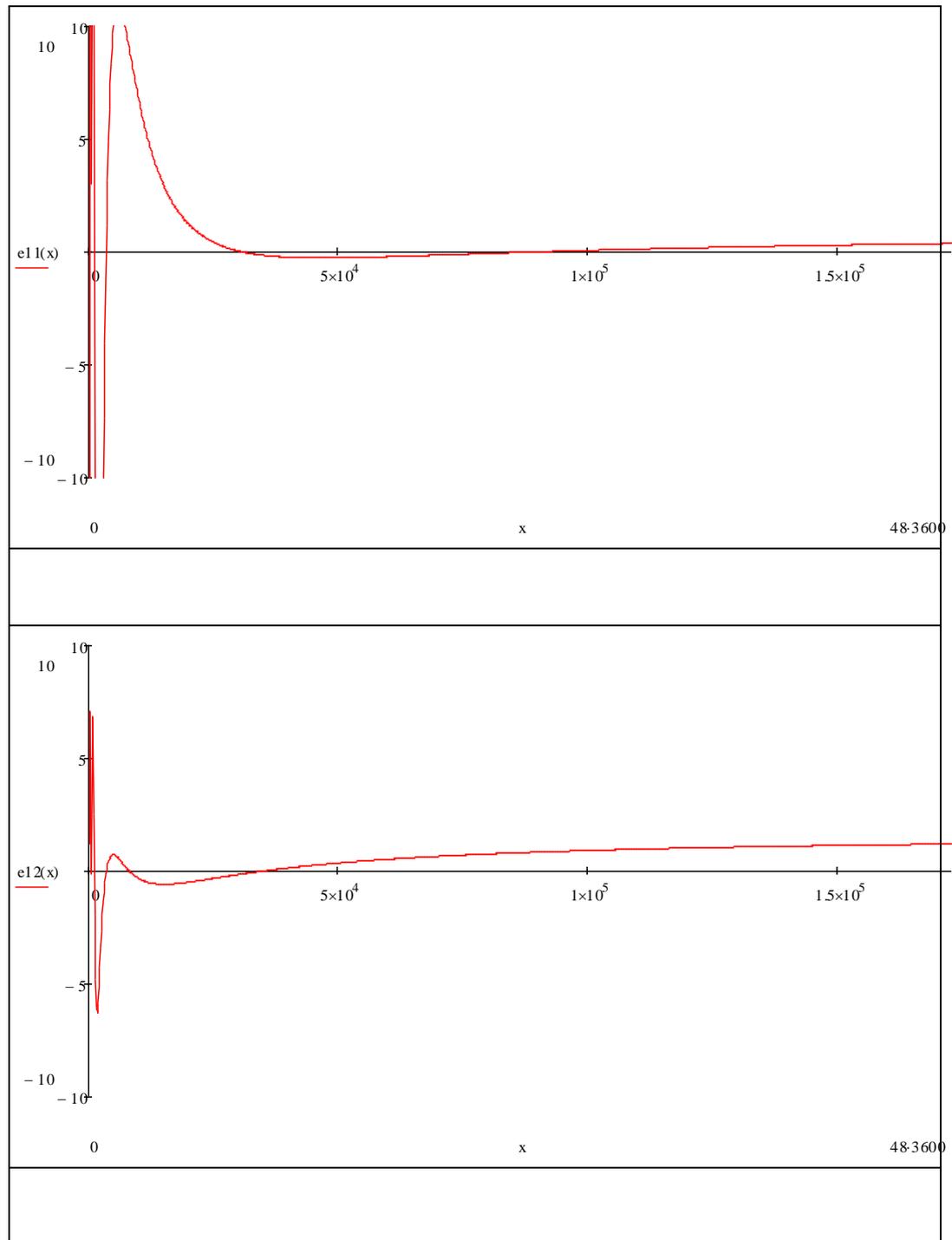
luego el cambio totales :

$$u2(xx) = \frac{RC}{xx} \quad , \quad v2(xx) = \frac{RC}{R^2} \frac{1}{xx}$$

El producto de todas las capas con esta forma de la matriz de transferencia daría las funciones AA_h , BB_h , CC_h y DD_h expresadas, sobre el eje real negativo, en función de xx . Vamos a llamar a $AA_h(xx)$ y $BB_h(xx)$ expresadas en estas coordenadas como $e11(xx)$ y $e12(xx)$ respectivamente. La gráfica muestra la forma de las gráficas en esta variable:

$$L\{L, s\} = 0$$

La solución general de la ecuación es:



Es interesante ver que ahora xx , al ser la inversa de x , viene dada directamente en segundos. Las gráficas anteriores muestran $48 \cdot 3600$ segundos (2 días). Hittle y Bishop se dieron cuenta de que las raíces de $e12(xx)=0$ (nota: $1/xx$ son los polos de BB que es lo que buscamos) y las raíces de $e11(xx)=0$ cumplen una curiosa relación: entre cada par de raíces de $e12$ la función $e11$ debe cambiar de signo, esto es $e11$ tiene una raíz (de algún modo, se van cruzando). Si cuando se calculan las raíces de $e12$, resulta que $e11$ cambia de signo más de una vez entre

las dos raíces consecutivas calculadas de e12, eso indica que nos hemos dejado alguna raíz de e12 y debemos volver atrás.

Adicionalmente dado que usamos la inversa de x, podemos empezar a buscar por tiempos muy lejanos (2 días por ejemplo) para poder buscar así el polo (1/xx) más cercano a 0, que es el tiempo de relajación más lento. Paulatinamente nos vamos acercando a 0 en la escala de tiempo xx (nos alejamos a polos más grandes en valor absoluto), de forma geométrica multiplicando la posición actual xx por algún factor (por ejemplo 0.99995). (El método es arduo y se pueden consultar maás detalles en Davies M.G. o Hittle and Bishop).

14.2.2 Obtención de los factores de respuesta

La respuesta se obtiene calculando la respuesta ante una excitación rampa de temperatura y , como se vió, usando después una combinación de rampas, se genera la respuesta ante una excitación triangulo de temperatura unitario. La respuesta ante una rampa con cierta pendiente se puede obtener como la transformada inversa de Laplace del producto de la función de transferencia correspondiente por la transformada de Laplace de la rampa. Finalmente, los polos son útiles para hallar la inversa de la transformada de Laplace y por tanto la solución.

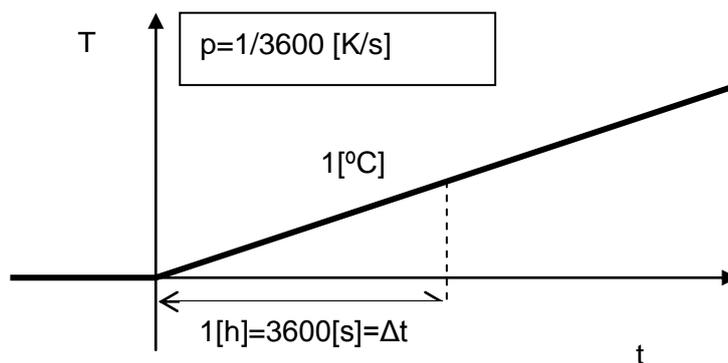
El problema que tenemos ahora es calcular la siguiente fórmula:

$$q(L,t) = L^{-1}[Y(s) \cdot Lrampa(s)]$$

$$Lrampa(s) = LT(0, s)$$

$$rampa(t) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot t & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$Lrampa(s) = \frac{p}{s^2}$$



Por lo tanto la función compleja cuya inversa hay que calcular para obtener el flujo de calor en el interior ante una rampa externa de aumento de temperatura con un paso de tiempo de 1 [h] es:

$$Lq_{rampa}(L, s) = \frac{p}{s^2 BB(s)}$$

$$p = 1/3600$$

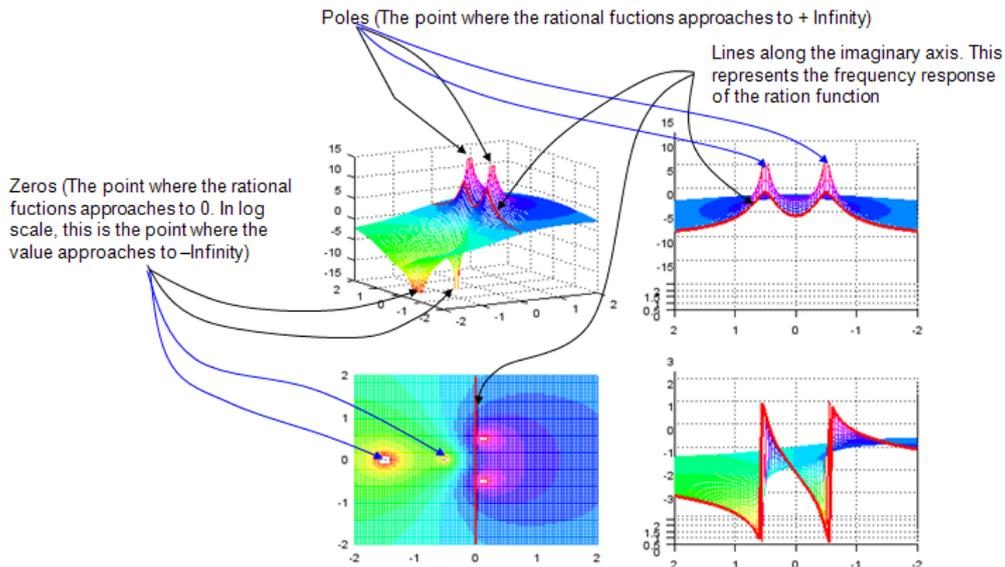
Si se aplica la teoría de números complejos, una función compleja $f(s)$ uniforme y analítica como son las que nos ocupan, (en concreto meromorfa, esto es que posee ciertas características aplicables a sus ceros y polos – que en este caso son infinitos-) se puede expresar utilizando la teoría de residuos de los números complejos, que dice que la función se puede descomponer como una suma infinita:

$$f(s) = \sum_{k=0}^{\infty} GP_k(s)$$

donde $GP_k(s)$ es la parte principal de la expansión de la función $f(s)$ en serie de McLaurin alrededor de su k -ésimo polo. Esto es, si una raíz s_n del denominador de $f(s)$ – que son los polos de $f(s)$ - tiene multiplicidad m (se repite m veces) la función $GP(s)$ para ese polo se escribe como:

$$GP(s) = \frac{A_m}{(s - s_n)^m} + \frac{A_{m-1}}{(s - s_n)^{m-1}} + \frac{A_{m-2}}{(s - s_n)^{m-2}} + \dots + \frac{A_1}{(s - s_n)^1}$$

dónde los m valores A son los residuos en este polo de orden m .



Así la función anterior que hay que antitransformar se puede escribir :

$$Lq_{rampa}(L, s) = \frac{p}{s^2 BB(s)} = p \cdot \frac{1}{s^2 BB(s)} = p \cdot \left[\frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} \right] = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

$$p = 1 / \Delta t$$

Para p = 1 tenemos :

$$\frac{1}{s^2 BB(s)} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

Obviamente s=0 es un polo de orden 2 (se ha llamado a sus residuos con la letra C) y el resto de polos (ceros de BB(s)) sabemos que son números reales negativos (-x_k) y se puede demostrar que todos son de orden 1. A su residuo asociado se le ha llamado A_(k).

Cálculo de los residuos de la función

De su definición se puede ver facilmente que en el caso de ser de orden 1 la fórmula es:

$$A_1 = \lim_{s \rightarrow s_n} [f(s) \cdot (s - s_n)]$$

Si es un polo de orden m los residuos se obtendrán de las fórmulas

$$A_m = \lim_{s \rightarrow s_n} [f(s) \cdot (s - s_n)^m]$$

$$A_{m-1} = \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d [f(s) \cdot (s - s_n)^m]}{ds} \right]$$

$$A_{m-2} = \frac{1}{2} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^2 [f(s) \cdot (s - s_n)^m]}{ds^2} \right]$$

$$A_{m-3} = \frac{1}{3 \cdot 2} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^3 [f(s) \cdot (s - s_n)^m]}{ds^3} \right]$$

...

$$A_1 = \frac{1}{(m-1)!} \lim_{s \rightarrow s_n} \left[\frac{d^{m-1} [f(s) \cdot (s - s_n)^m]}{ds^{m-1}} \right]$$

Así para la función Lq_{rampa}(L,s) tendremos:

Para $s = 0$, polo de 2 orden \Rightarrow dos residuos

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{1}{BB(0)}$$

$$C_1 = \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = -\frac{1}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)$$

Para $s = -x_k$ polos de orden 1 \Rightarrow solo un residuo

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{1}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{1}{s^2 \cdot \frac{dBB(s)}{ds}} = \frac{1}{(-x_k)^2 \cdot \frac{dBB(-x_k)}{ds}}$$

En la última expresión para calcular el límite indeterminado (0/0) se ha usado la regla de L'Hopital (derivar el numerador y el denominador).

Debido al comportamiento tan cambiante de las funciones, el cálculo de las derivadas es preferible hacerlo de forma analítica. Para ello se debe usar la expresión para la deriva de la matriz de transferencia **M** para una capa que se obtuvo anteriormente. Para calcular la derivada de la matriz producto se puede usar la regla de la derivada del producto para funciones escalares habitual. A continuación se propone una función recursiva que realizaría el cálculo de la derivada de un producto de N matrices **M_j**:

$$M(s) = \prod_{j=1}^N M_j$$

$$\frac{dM_j}{ds}(s) \quad \text{derivada de la matriz de transferencia de la } j\text{-ésima capa}$$

$$M_j(s) \quad \text{matriz de transferencia de la } j\text{-ésima capa}$$

$$\frac{dPM(s,k,N)}{ds} = \begin{cases} \frac{dM_k}{ds} \cdot \prod_{l=k+1}^N M_l + M_k \cdot \frac{dPM(s,k+1,N)}{ds} \leftarrow si \quad k < N \\ \frac{dM_k}{ds} \leftarrow si \quad k = N \end{cases}$$

La derivada de la matriz producto **PM=M_nM_{n-1}...M₁** se obtiene de la expresión anterior haciendo k=0:

$$\frac{dPM(s,0,N)}{ds}(s) = \begin{bmatrix} \frac{dAA}{ds} & \frac{dBB}{ds} \\ \frac{dCC}{ds} & \frac{dDD}{ds} \end{bmatrix}$$

La derivada analítica de la matriz de una capa es:

$$\frac{dM_j}{ds}(-x) = \frac{RC_j}{2} \left[\begin{array}{c} \frac{\text{sen}(\sqrt{RC_j} \sqrt{x})}{\sqrt{RC_j} \sqrt{x}} \\ \frac{1}{R_j} \left(\frac{\text{sen}(\sqrt{RC_j} \sqrt{x})}{\sqrt{RC_j} \sqrt{x}} + \cos(\sqrt{RC_j} \sqrt{x}) \right) \end{array} \right] \frac{R_j}{RC_j \cdot x} \left(\frac{\text{sen}(\sqrt{RC_j} \sqrt{x})}{\sqrt{RC_j} \sqrt{x}} - \cos(\sqrt{RC_j} \sqrt{x}) \right) \left[\begin{array}{c} \frac{\text{sen}(\sqrt{RC_j} \sqrt{x})}{\sqrt{RC_j} \sqrt{x}} \\ \frac{\text{sen}(\sqrt{RC_j} \sqrt{x})}{\sqrt{RC_j} \sqrt{x}} \end{array} \right]$$

$$\frac{dM_j}{ds}(0) = \frac{RC_j}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{R_j}{3} \\ \frac{2}{R_j} & 1 \end{bmatrix}$$

Los residuos son números reales. Así una vez obtenidos queda por invertir la transformada de Laplace anterior. La transformada inversa de una suma es la suma de las antitransformadas, de manera que si se hace uso de antitransformadas básicas:

$$L^{-1} \left[\frac{1}{s^2} \right] = f(t) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ t & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$L^{-1} \left[\frac{1}{s} \right] = f(t) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ 1 & \rightarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$L^{-1} \left[\frac{1}{s-a} \right] = f(t) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ e^{at} & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

, obtenemos la dependencia temporal de la respuesta del flujo de calor interior ante una rampa de temperatura exterior de pendiente p :

$$q_{rampa}(L, t, p) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot \left[C_2 \cdot t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{(k)} \cdot e^{-x_k \cdot t} \right] & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$p = 1 / \Delta t$$

Ya casi hemos obtenido la respuesta buscada, que nos va a permitir obtener los factores de respuesta. Debemos obtener el flujo de calor ante una excitación triángulo exterior. Para ello se superpone la respuesta anterior a tres rampas decaladas en el tiempo (un paso de tiempo – 1[h]- cada vez) y con la pendiente adecuada.

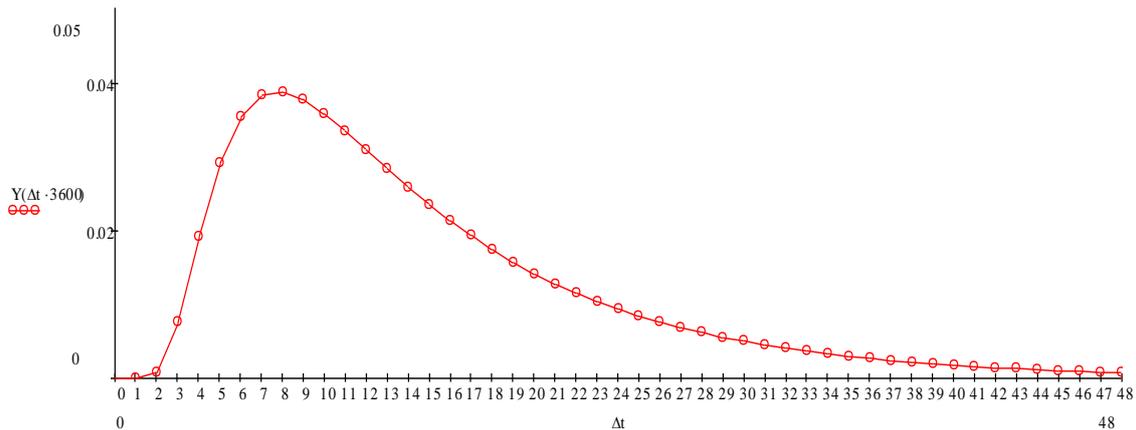
$$q_{\text{triángulo_unitario}}(L, t) = q_{\text{rampa}}(L, t, p) + q_{\text{rampa}}(L, t - \Delta t, -2p) + q_{\text{rampa}}(L, t - 2\Delta t, p)$$

$$q_{\text{triángulo_unitario}}(L, t) = q_{\text{rampa}}(L, t, p) - 2 \cdot q_{\text{rampa}}(L, t - \Delta t, p) + q_{\text{rampa}}(L, t - 2\Delta t, p)$$

$$p = 1 / \Delta t$$

$$\Delta t = 3600[\text{segundos}] \text{ habitualmente}$$

La gráfica que sigue muestra la respuesta de la densidad del flujo de calor [W/m²K] en el interior (x=L) ante una excitación exterior triángulo unitario de temperatura con un paso de 1 [h] , para el muro del ejemplo:



Finalmente con esta respuesta se estiman los factores de respuesta Y como el valor de la respuesta anterior a cada paso de tiempo (mostrado en círculos):

$$y_j = q_{\text{triángulo_unitario}}(L, j \cdot \Delta t)$$

$$j = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$\Delta t = 3600[\text{segundos}] \text{ habitualmente}$$

Del mismo modo se obtendría la respuesta para X y para Z. En el caso de X se debería calcular:

Para s = 0, polo de 2 orden ⇒ dos residuos

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{DD(0)}{BB(0)}$$

$$C1 = \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = \frac{dDD(0)}{ds} \cdot \frac{1}{BB(0)} - \frac{DD(0)}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)$$

Para s = -x_k polos de orden 1 ⇒ solo un residuo

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{DD(s)}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{\frac{dDD(s)}{ds} (s + x_k) + DD(s)}{s^2 \cdot \frac{dBB(s)}{ds}}$$

$$= \frac{DD(-x_k)}{(-x_k)^2 \cdot \frac{dBB(-x_k)}{ds}}$$

, y por último para Z tendríamos:

Para $s = 0$, polo de 2 orden \Rightarrow dos residuos

$$C_2 = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right] = \frac{-AA(0)}{BB(0)}$$

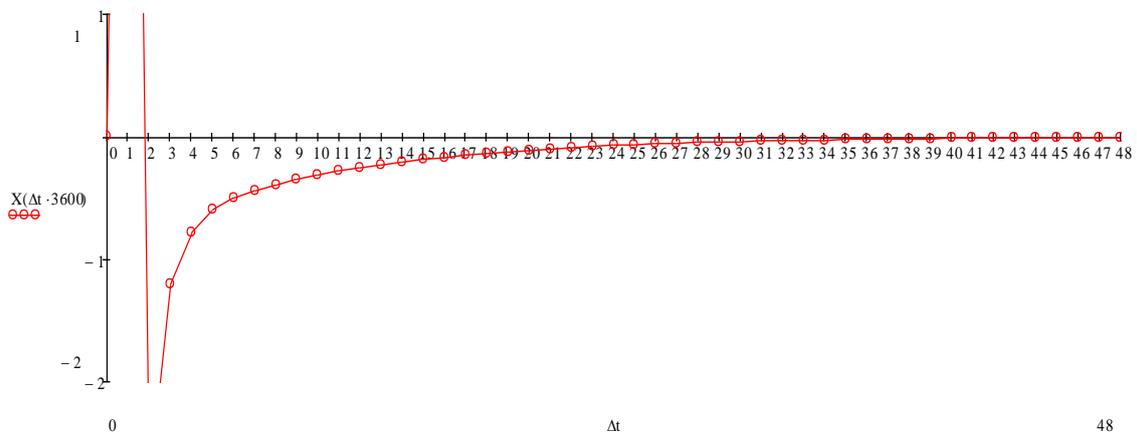
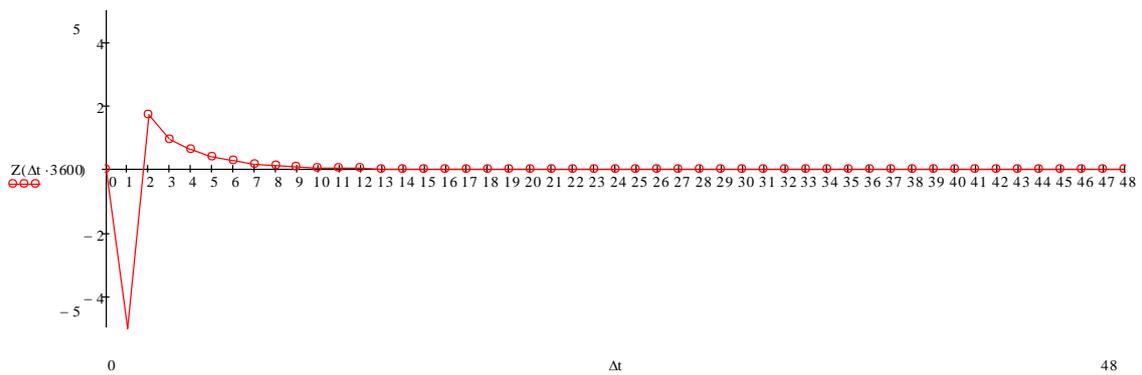
$$C1 = \frac{1}{(2-1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{d}{ds} \left(\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot s^2 \right) \right] = \frac{-dAA(0)}{ds} \cdot \frac{1}{BB(0)} - \frac{-AA(0)}{BB(0)^2} \cdot \frac{dBB}{ds}(0)$$

Para $s = -x_k$ polos de orden 1 \Rightarrow solo un residuo

$$A_{(k)} = \lim_{s \rightarrow -x_k} \left[\frac{-AA(s)}{s^2 BB(s)} \cdot (s - (-x_k)) \right] = \lim_{s \rightarrow -x_k} \frac{\frac{-dAA(s)}{ds} (s + x_k) - AA(s)}{s^2 \cdot dBB(s)/ds}$$

$$= \frac{-AA(-x_k)}{(-x_k)^2 \cdot dBB(-x_k)/ds}$$

Las figuras siguientes representan dichas respuestas



La tabla siguiente muestra dichos factores horarios de respuesta.

Hora	y_j [W/m ² K]	z_j [W/m ² K]	x_j [W/m ² K]
0	0	-0.0001	1.128e-4
1	2.953e-6	-5.03836	10.855
2	8.77e-4	1.71531	-2.846
3	7.635e-3	0.94904	-1.202
4	0.019	0.61076	-0.781
5	0.029	0.39396	-0.599
6	0.035	0.25481	-0.502
7	0.038	0.1654	-0.438
8	0.039	0.10789	-0.389
9	0.038	0.07084	-0.349
10	0.036	0.04693	-0.313
11	0.033	0.03144	-0.282
12	0.031	0.02138	-0.254
13	0.028	0.01481	-0.228
14	0.026	0.01049	-0.206
15	0.023	0.00762	-0.185
16	0.021	0.00569	-0.167
17	0.019	0.00437	-0.15
18	0.017	0.00346	-0.135
19	0.016	0.00281	-0.122
20	0.014	0.00233	-0.11
21	0.013	0.00197	-0.099
22	0.012	0.00169	-0.089
23	0.01	0.00147	-0.08
24	9.345e-3	0.00129	-0.072

Forma que presentan las funciones

La respuesta Y es el la densidad del flujo de calor debida al cambio de temperatura fuera. Por eso inicialmente no sabe que ha habido un cambio y no hay flujo. Luego aparece el flujo hacia el interior (positivo), va creciendo hasta alcanzar un

máximo y luego decrece hasta cero, como era de esperar. Para este muro, su valor máximo de calor está a las 7 u 8 horas de producirse el pico de temperatura fuera.

La respuesta X es inicialmente positiva, muy rápida y grande, ya que el flujo de calor se mide en el mismo lado (fuera) donde se está produciendo el cambio de temperatura. A la hora la temperatura baja, el muro está caliente y empieza a perder calor por ese mismo lado (flujo negativo) y se va reduciendo hasta cero.

La respuesta Z es inicialmente grande y negativa porque estamos mirando el flujo de calor en el interior ($x=L$) debido a un cambio interior. Es negativa porque el calor sale del recinto. Sin embargo pasada una hora, cuando la temperatura dentro vuelve a bajar el flujo se hace positivo – el muro está más caliente- y devuelve el calor a al recinto de forma cualitativamente similar a X, pero no idéntica ya que la composición del muro no es simétrica. Este comportamiento de Z devolviendo energía pasado un tiempo se usa como base del método de las series radiantes.

Aplicación práctica: evolución del flujo de calor que atraviesa el muro.

Como no se pueden tomar los infinitos factores de respuesta, como se comentó, se usa el hecho de que las exponenciales se reducen y tras cierto tiempo solo queda la primera exponencial que corresponde al primer polo. Al formar el triángulo con rampas, la respuesta a partir del segundo paso de tiempo sólo depende del sumatorio de exponenciales. A partir de ese instante se supone que la razón entre dos factores de respuesta se mantiene constante y depende del primer polo:

$$\frac{Y(j\Delta t)}{Y((j-1)\Delta t)} = \frac{Cte \cdot e^{-x_1 \Delta t \cdot j}}{Cte \cdot e^{-x_1 \Delta t \cdot (j-1)}} = e^{-x_1 \cdot \Delta t} = e^{-x_1 \cdot 3600}$$

Esta se conoce como la **razón común**.

La respuesta en flujo de calor interno debida a cambios de temperatura fuera sería:

$$q(n\Delta t) = y_0 \cdot T_{ext}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p y_k \cdot T_{ext}((n-k)\Delta t) + \\ + c \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-1)\Delta t) + c^2 \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-2)\Delta t) + \dots$$

Dónde la respuesta se ha truncado en el p-ésimo termino y para el resto se ha usado la razón común. Si ahora se resta a esta expresión su valor un paso de tiempo antes queda:

$$q((n-1)\Delta t) = y_0 \cdot T_{ext}((n-1)\Delta t) + \sum_{k=1}^p y_k \cdot T_{ext}((n-k-1)\Delta t) +$$

$$+ \frac{1}{c} [c^2 \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-2)\Delta t) + c^3 \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-3)\Delta t) + \dots]$$

$$c \cdot q((n-1)\Delta t) = c \cdot y_0 \cdot T_{ext}((n-1)\Delta t) + \sum_{k=1}^p c \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-k-1)\Delta t) +$$

$$+ [c^2 \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-2)\Delta t) + c^3 \cdot y_k \cdot T_{ext}((n-p-3)\Delta t) + \dots]$$

$$q(n\Delta t) = c \cdot q((n-1)\Delta t) + y_0 \cdot T_{ext}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{ext}((n-k)\Delta t) \cdot [y_k - c \cdot y_{k-1}]$$

Esta ecuación relaciona el flujo de calor en el instante n con su valor anterior, la temperatura actual y una historia de temperaturas anteriores. A la misma se le puede superponer, como se vió, el efecto de una respuesta en Z.

$$q(n\Delta t) = c \cdot q((n-1)\Delta t) +$$

$$+ y_0 \cdot T_{ext}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{ext}((n-k)\Delta t) \cdot [y_k - c \cdot y_{k-1}] +$$

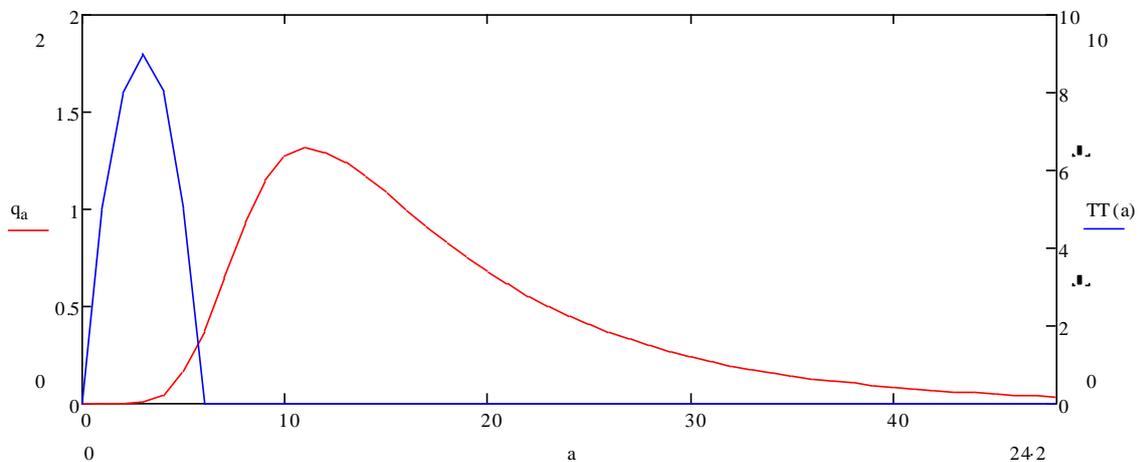
$$+ z_0 \cdot T_{int}(n\Delta t) + \sum_{k=1}^p T_{int}((n-k)\Delta t) \cdot [z_k - c \cdot z_{k-1}]$$

El lector debe apreciar que la razón común es la misma ya que depende del primer polo que es una característica del muro.

La figura siguiente muestra el flujo de calor para un pulso de temperatura parabólico en el exterior según la ecuación:

$$-t[\text{horas}]^2 + 6 \cdot t[\text{horas}] = t[n\Delta t]$$

$$\Delta t = 1 \text{ hora}$$

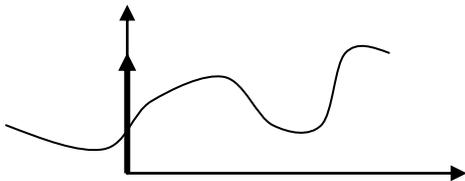


Las ecuaciones anteriores representan unas ecuaciones en diferencias. El valor del flujo de calor depende de su valor anterior, de la excitación en ese momento y en momentos anteriores. Se pueden obtener otras ecuaciones en diferencias que hagan depender el flujo de calor de un número superior de flujos de calor anteriores y por lo tanto la dependencia de las temperaturas anteriores se reduce. Eso hace que se necesiten menos “pesos” (valores de respuesta). Para obtener dichas ecuaciones se suele usar la transformada-Z. A los “pesos” obtenidos hasta aquí la literatura los llama factores de respuesta (**Thermal Response Factors TRF**), a los obtenidos del uso de la transformada Z los llama factores de respuesta de conducción (**Conduction Transfer Factors CTF**).

Método de la transformada Z

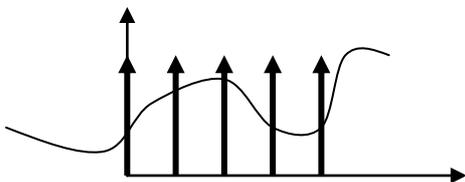
Quizá la figura lo aclare un poco. En el método anterior disponemos de la señal de entrada (la temperatura) muestreada cada cierto paso de tiempo. Así la idea ahora es muestrear la salida con la misma cadencia y obtener la relación entre ambas. Dicha relación es la transformada-Z del sistema dinámico (el muro en nuestro caso).

Muestrear se puede representar como la aplicación de una Delta de Dirac a una función $f(t)$. El resultado es un pulso en $t=0$ con una “fuerza” igual al valor de la función $f(t)$ en $t=0$. Nota: el lector debe ser consciente que la función Delta de Dirac como tal no es una función sino una distribución, una funcional o una función generalizada.



$$\delta(f(t)) = f(0) \cdot \delta(0)$$

Así si queremos muestrear lo que se debe hacer es crear una función tren de impulsos unitarios decalados el paso de muestreo, llamdo muestreador (**sampler** en inglés).



$$Muestreador(f(t)) = f(0) \cdot \delta(0) + f(\Delta t)\delta(t - \Delta t) + f(2\Delta t)\delta(t - 2\Delta t) + f(3\Delta t)\delta(t - 3\Delta t) + \dots$$

A esta función se le llama función muestreada, denotada como $f^*(t)$. ¿Cuál es la transformada de Laplace de esta función?. Bien si tenemos en cuenta que la

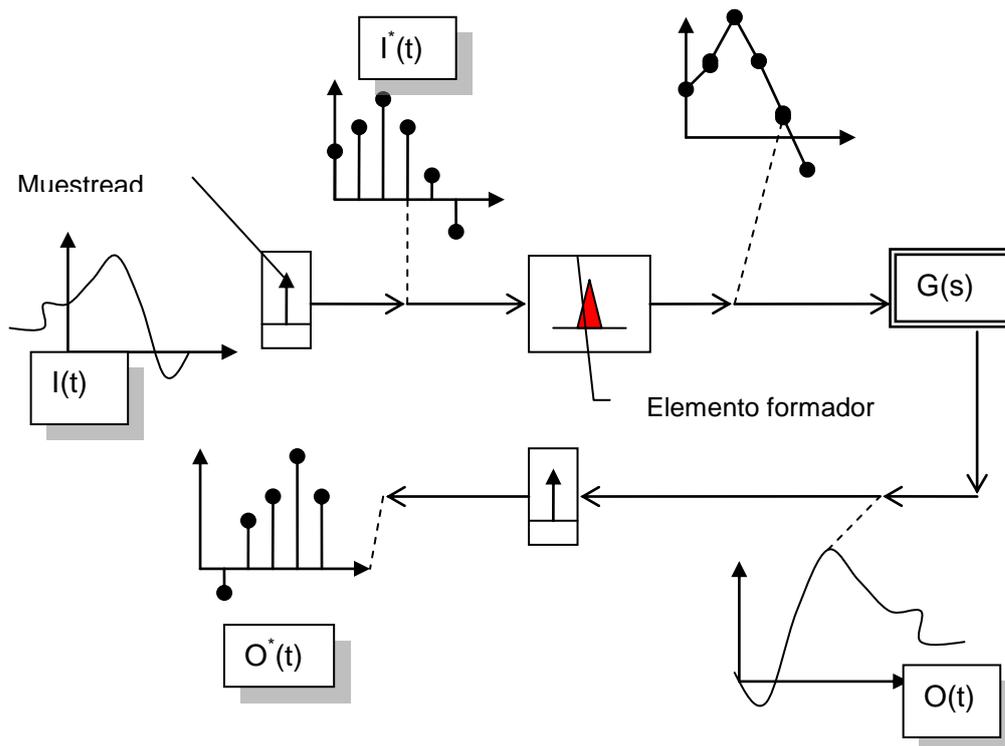
transformada del impulso unitario es 1 y teniendo presente que decalar en el tiempo una función implica multiplicar la función transformada original por $e^{-s\Delta t}$ tenemos:

$$Lf^*(s) = f(0) \cdot 1 + f(\Delta t)e^{-s\Delta t} + f(2\Delta t)e^{-s2\Delta t} + f(3\Delta t)e^{-s3\Delta t} + \dots$$
$$z = e^{s\Delta t}$$
$$Lf^*(s) = f(0) \cdot z^0 + f(\Delta t)z^{-1} + f(2\Delta t)z^{-2} + f(3\Delta t)z^{-3} + \dots$$

La figura resume pues, el concepto de la transformada Z. La relación entre las transformadas de Laplace de la señal de salida muestreada $O^*(t)$ y la señal de entrada muestreada $I^*(t)$ es la transformada Z del sistema. Hay que señalar que implícitamente se asume que se ha tomado un elemento formador **EF** para reconstruir la señal de entrada. En muchos libros a la matriz de transferencia que contiene la respuesta al elemento formador unitario (en nuestro caso un triángulo unitario de temperatura) recibe la denominación $G^*(s)$ y que expresada en función de $z = e^{-s\Delta t}$ es la matriz de transferencia-Z $G(z)$ (para un elemento formador dado).

Como curiosidad, el lector puede apreciar que de forma muy similar un reproductor mp3 ó mp4, reconstruye una canción a partir de datos discretos leídos en su disco duro.

$$G(z) = \frac{O(z)}{I(z)}$$
$$O(z) = L(O^*(t))$$
$$I(z) = L(I^*(t))$$



Teniendo en cuenta las expresiones para las transformadas z que están relacionadas con los valores discretos de las entradas y salidas medidos con cierta cadencia, como polinomios en z con exponentes negativos y con infinitos términos, tenemos:

$$G(z) = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \dots}$$

La razón de que existan infinitos términos arriba y abajo para esta función de transferencia es porque, como se dijo más arriba, un sistema dinámico representado por una ecuación en derivadas parciales es “parecido” a un sistema dinámico formado por un número infinito de ecuaciones diferenciales ordinarias. Cada una de ellas representa la dinámica de un “modo o forma” en que la variable (en este caso el flujo de calor) se relaja hasta cero (de algún modo, representa la cantidad de tiempos característicos del sistema). Como se verá en otro apartado, en simulación, para ciertas respuestas (la de I aire de los recintos) , programas como CALENER (VyP y GT (DOE2)) utilizan modelos aproximados más sencillos. En ellos $G(z)$ es un cociente de polinomios finitos. El orden de estos polinómios indica cuántos tiempos característicos han sido considerados.

Cuando le aplicamos una señal de entrada muestreada cualquiera $I^*(t)$ la salida muestreada $O^*(t)$ debe venir dada por la ecuación:

$$O(z) = G(z) \cdot E(z) = \frac{a_0 z^0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + \dots}{b_0 z^0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + \dots} = \frac{N(z)}{D(z)} \cdot I(z)$$

$$O(z) \cdot D(z) = N(z) \cdot I(z)$$

$$\{o_0 z^0 + o_1 z^{-1} + o_2 z^{-2} + o_3 z^{-3} + \dots\} \cdot D(z) = N(z) \cdot \{i_0 z^0 + i_1 z^{-1} + i_2 z^{-2} + i_3 z^{-3} + \dots\}$$

Como se trata de polinomios para que sean iguales deben ser iguales los coeficientes de cada término z . Luego para un término z^{-m} cualquiera la ecuación es:

$$o_m \cdot b_0 + \{o_{m-1} \cdot b_1 + o_{m-2} \cdot b_2 + o_{m-3} \cdot b_3 + o_{m-4} \cdot b_4 + \dots\} = \\ = i_m \cdot a_0 + \{i_{m-1} \cdot a_1 + i_{m-2} \cdot a_2 + i_{m-3} \cdot a_3 + i_{m-4} \cdot a_4 + \dots\}$$

$$o_m \cdot b_0 = i_m \cdot a_0 + \{i_{m-1} \cdot a_1 + i_{m-2} \cdot a_2 + i_{m-3} \cdot a_3 + i_{m-4} \cdot a_4 + \dots\} - \\ - \{o_{m-1} \cdot b_1 + o_{m-2} \cdot b_2 + o_{m-3} \cdot b_3 + o_{m-4} \cdot b_4 + \dots\}$$

Esta última ecuación relaciona la salida en el instante m con la entrada en el instante m , entradas anteriores y valores de la salida anteriores. Es por lo tanto una generalización de la ecuación que obtuvimos para los factores de respuesta. Para poder calcularla hay que conocer los valores de los coeficientes a y b . Estos son el resultado de aplicar el elemento formador (el triángulo unitario) a la matriz de transferencia del muro. Las series infinitas dentro de los corchetes, como se verá, se truncan en función de la precisión buscada y del pasode tiempo usado. Como se vio dicha respuesta en flujo de calor dentro se obtiene a partir de la respuesta a una rampa de temperatura fuera como:

$$Lq_{rampa}(L, s) = \frac{p}{s^2 BB(s)} = p \cdot \frac{1}{s^2 BB(s)} = p \cdot \left[\frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)} \right]$$

$$p = 1 / \Delta t$$

Para $p = 1$ tenemos :

$$\frac{1}{s^2 BB(s)} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s - (-x_k))} = \frac{C_2}{s^2} + \frac{C_1}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{(s + x_k)}$$

Se sabe que cada término anterior corresponde a; una rampa, un valor constante y exponenciales negativas, respectivamente, pues bien, si se muestrean se obtiene su transformada-Z como suma de las transformadas-Z:

$$Lq_{rampa}(L, z) = p \cdot \left[\frac{C_2 \Delta t}{z(1 - z^{-1})^2} + \frac{C_1}{1 - z^{-1}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_{(k)}}{1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1}} \right]$$

$$p = 1 / \Delta t$$

Cuando hacemos la suma de los quebrados anteriores su común denominador necesario para poder sumar es:

$$D_{denominador} = z(1 - z^{-1})^2 \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

Teniendo en cuenta que la entrada a esta respuesta, es una rampa con una transformada Z igual a:

$$LT_{rampa}(0, z) = p \frac{\Delta t}{z(1 - z^{-1})^2}$$

El denominador de la función de transferencia Z queda:

$$D(z) = \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

$$b_1 = - \sum_{k=1}^{\infty} e^{-x_k \Delta t}$$

De aquí se puede ver que :

$$b_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_3 = - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} \sum_{j=k+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t} \cdot e^{-x_j \Delta t}$$

¿Cuántos términos son necesarios para evaluar cada coeficiente?

.....
 Bien, como los polos son números negativos cada vez más grandes (en valor absoluto) los términos a retener depende del paso de tiempo y de la precisión. Por ejemplo si se deseara una precisión de $\pm 10^{-10}$ entonces:
 $e^{-x_{max} \Delta t} < 10^{-10} \approx e^{-23}$

$$x_{max} \cdot (\Delta t = 3600[s]) > 23$$

$$x_{max} > 23/3600[Hz]$$

Valores absolutos del polos mayores que esta frecuencia serían despreciados en el cálculo.

Obtención coeficientes numerador

Se podrían obtener como lo se ha hecho con el denominador, evaluando los productos y las sumas, pero se puede hacer de forma algo más eficiente. La respuesta temporal sabemos que tiene la forma:

$$q_{rampa}(L, t, p) = \begin{cases} 0 & \leftarrow t < 0 \\ p \cdot \left[C_2 \cdot t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{(k)} \cdot e^{-x_k \cdot t} \right] & \leftarrow t \geq 0 \end{cases}$$

$$p = 1 / \Delta t$$

Así podemos evaluar su valor a cada paso de tiempo $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$, etc.. de forma que:

$$\frac{O(z) \cdot D(z)}{I(z)} = N(z)$$

$$D(z) = \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1})$$

$$I(z) = \frac{\Delta t}{z(1 - z^{-1})^2}$$

$$\frac{z(1 - z^{-1})^2}{\Delta t} \cdot \prod_{k=1}^{\infty} (1 - e^{-x_k \Delta t} \cdot z^{-1}) \cdot O(z) = N(z)$$

De dónde se obtiene:

$$a_0 = \frac{1}{\Delta t} \left\{ C_2 \Delta t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} d_n e^{-x_k \Delta t} \right\}$$

$$a_1 = \frac{1}{\Delta t} \left\{ C_2 2\Delta t + C_1 + \sum_{k=1}^{\infty} d_n e^{-x_k 2\Delta t} \right\}$$

....

Por lo tanto el método se resume en:

- 1) Encontrar los polos del muro.
- 2) Calcular $D(z)$ con dichos polos.
- 3) Evaluar la respuesta temporal a una rampa a cada paso de tiempo y con ello obtener $O^*(t)$.
- 4) Evaluar los coeficientes a usando la expresión:

$$\frac{z(1 - z^{-1})^2}{\Delta t} \cdot D(z) \cdot O(z) = N(z)$$

Existe una alternativa del método anterior, que consiste en usar los factores de respuesta.

Se basa en el hecho de que el cociente entre salida y entrada muestreada, sea cual sea la entrada siempre da el mismo resultado, por lo tanto. Cuando la entrada es un triángulo su transformada-Z es 1 (es el valor que toma el triángulo en $t=0$). Por lo tanto igualando los cocientes de la respuesta ante una rampa y ante el triángulo:

$$G(z) = \frac{N\Delta(z)}{1} = \frac{y_0 + y_1z^{-1} + y_2z^{-2} + \dots}{1} = \frac{N(z)}{D(z)}$$

$$\{y_0 + y_1z^{-1} + y_2z^{-2} + \dots\} \cdot \{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots\} = N(z)$$

Igualando potencias de z iguales tenemos:

$$a_0 = y_0 \cdot b_0$$

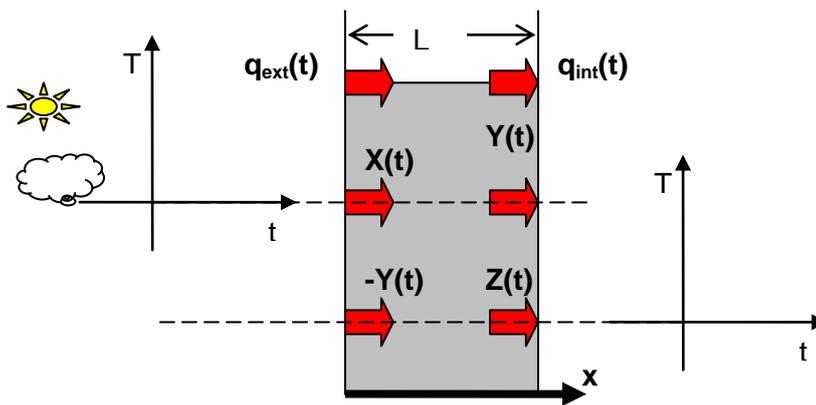
$$a_1 = y_0 \cdot b_1 + y_1 \cdot b_0$$

$$a_2 = y_0 \cdot b_2 + y_1 \cdot b_1 + y_2 \cdot b_0$$

....

$$a_j = \sum_{k=0}^j y_k \cdot b_{j-k}$$

, para el flujo en el interior debido a un excitación de temperatura exterior.



La aplicación de todo lo anterior a un muro, la respuesta total dentro y fuera debido a excitaciones dentro y fuera usando la expresión general vista anteriormente da como result

$$q_{ext}(n\Delta t) = \sum_{j=0}^m T_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot ax_j - \sum_{j=0}^m T_{int}((n-j)\Delta t) \cdot ay_j - \left\{ \sum_{j=1}^m q_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot b_j \right\}$$

$$q_{int}(n\Delta t) = \sum_{j=0}^m T_{ext}((n-j)\Delta t) \cdot ay_j + \sum_{j=0}^m T_{int}((n-j)\Delta t) \cdot az_j - \left\{ \sum_{j=1}^m q_{int}((n-j)\Delta t) \cdot b_j \right\}$$

$$b_0 = 1$$

$$b_1 = -\sum_{k=1}^{\infty} e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t}$$

$$b_3 = -\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=m+1}^{\infty} \sum_{j=k+1}^{\infty} e^{-x_m \Delta t} \cdot e^{-x_k \Delta t} \cdot e^{-x_j \Delta t}$$

Usando los factores de respuesta x , y y z :

$$ax_j = \sum_{k=0}^j x_k \cdot b_{j-k}, \quad ay_j = \sum_{k=0}^j y_k \cdot b_{j-k}, \quad az_j = \sum_{k=0}^j z_k \cdot b_{j-k}$$

O de otra forma :

$$q_{ext}(n\Delta t) = T_{ext}(n\Delta t) \cdot ax_0 - T_{int}(n\Delta t) \cdot ay_0 + \text{historia_}q_{ext} T_{ext} - \text{historia_}q_{ext} T_{ext} - \text{historia}q_{ext}$$

$$q_{int}(n\Delta t) = T_{ext}(n\Delta t) \cdot ay_0 + T_{int}(n\Delta t) \cdot az_0 + \text{historia_}q_{int} T_{ext} + \text{historia}q_{int} T_{int} - \text{historia}q_{int}$$

Esta última forma de cálculo es la empleada por por ejemplo por EnergyPlus

15 Anexo V. Determinación práctica de las antitransformadas de Laplace utilizadas

Como ha quedado establecido en las ecu. 27 para calcular los coeficientes finales a utilizar en la determinación de la potencia térmica intercambiada y en las ecuaciones 39 para estimar los coeficientes finales a utilizar en la determinación de la cantidad de energía intercambiada por conducción en un intervalo es necesario determinar las funciones $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ y $F_4(t)$.

11.1 Determinación de las expresiones $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$ y $F_4(t)$.

La ec. 23 plantea determinar antitransformadas de la Laplace de expresiones de la forma:

$$q(t) = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^m} \right] (t)$$

Una ecuación de este tipo se puede descomponer algebraicamente de la forma:

$$\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^m} = \frac{C_m}{s^m} + \frac{C_{m-1}}{s^{m-1}} + \dots + \frac{C_1}{s} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{f_r}{s + x_r}$$

donde x_r son las raíces de la ecuación $G(s)=0$.

Podemos determinar las constantes C_i y f_r mediante:

1) Si multiplicamos por s^m la anterior expresión :

$$\frac{H(s)}{G(s)} = C_m + sC_{m-1} + \dots + s^{m-1}C_1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{f_r s^m}{s + x_r}$$

Y haciendo el límite cuando s tiende a cero

$$C_m = \lim_{s \rightarrow 0} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] = \frac{H(0)}{G(0)}$$

2) Si hacemos la derivada primera de la ecuación anterior

$$\frac{d}{ds} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] = C_{m-1} + \dots + (m-1)s^{m-2}C_1 + \sum_{r=1}^{\infty} f_r \frac{ms^{m-1}(s+x_r) - s^m}{(s+x_r)^2}$$

Y haciendo el límite cuando s tiende a cero

$$C_{m-1} = \frac{1}{1!} \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d}{ds} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] \right)$$

3) Si lo hacemos para la segunda derivada

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{d^2s} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] &= 2C_{m-2} + \dots + (m-1)(m-2)s^{m-3}C_1 + \\ &+ \sum_{r=1}^{\infty} f_r \frac{(m(m-1)s^{m-2}(s+x_r) + ms^{m-1} - ms^{m-1})((s+x_r)^2 - 2(s+x_r)(ms^{m-1}(s+x_r) - s^m))}{(s+x_r)^4} \end{aligned}$$

Y haciendo el límite cuando s tiende a cero

$$C_{m-2} = \frac{1}{2!} \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d^2}{d^2 s} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] \right)$$

4) Y de forma general

$$C_{m-i} = \frac{1}{i!} \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d^i}{d^i s} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \right] \right)$$

5) Para la determinación de f_i (función de cada solución x_i) podemos multiplicar la expresión inicial por $(s+x_i)$ resultando

$$\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^m} (s+x_i) = \frac{C_m}{s^m} (s+x_i) + \frac{C_{m-1}}{s^{m-1}} (s+x_i) + \dots + \frac{C_1}{s} (s+x_i) + f_i + \sum_{r=1, r \neq i}^{\infty} \frac{f_r (s+x_i)}{s+x_r}$$

ya que cuando coincida en el sumatorio la división será la unidad

Llevando al límite la expresión anterior cuando la s tiende a x_i resulta

$$f_i = \lim_{s \rightarrow x_i} \left(\frac{H(s)}{G(s)} \frac{(s+x_i)}{s^m} \right)$$

Y aplicando l'hopital

$$f_i = \lim_{s \rightarrow x_i} \left(\frac{H(s) + (s+x_i) \frac{dH(s)}{ds}}{ms^{m-1}G(s) + s^m \frac{dG(s)}{ds}} \right) = \lim_{s \rightarrow x_i} \left(\frac{H(s)}{s^m \frac{dG(s)}{ds}} \right)$$

ya que $G(x_i)=0$.

Recomponiendo la expresión inicial tenemos:

$$q(t) = \mathfrak{Z}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^m} \right] (t) = \frac{t^{m-1}}{(m-1)!} \frac{H(0)}{G(0)} + \frac{t^{m-2}}{(m-2)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d}{ds} \frac{H(s)}{G(s)} \right) + \dots$$

$$+ \frac{t}{(1)!} \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d^{m-1}}{d^{m-1} s} \frac{H(s)}{G(s)} \right) + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{H(x_r)}{x_r^m \lim_{s \rightarrow x_r} \left(\frac{dG(s)}{ds} \right)} e^{x_r t}$$

Y definiendo la función $E_0(x_r)$, y las constantes E_1, E_2, E_3 y E_4 como:

$$E_0(x_r) = \frac{H(x_r)}{\lim_{s \rightarrow x_r} \left(\frac{dG(s)}{ds} \right)}$$

$$E_1 = \frac{H(0)}{G(0)}$$

$$\text{para } (n > 1) \Rightarrow E_n = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{d^{n-1} H(s)}{d^{n-1} s G(s)} \right)$$

Podemos reescribir la expresión de+ las antitransformadas como:

$$q(t)_{\text{escalón}} = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s} \right] (t) = E_1 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r} e^{x_r t} = F_1(t)$$

$$q(t)_{\text{rampa}} = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^2} \right] (t) = E_1 t + E_2 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^2} e^{x_r t} = F_2(t)$$

$$q(t)_{\text{parábola}} = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^3} \right] (t) = \frac{E_1}{2} t^2 + E_2 t + E_3 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^3} e^{x_r t} = F_3(t)$$

$$q(t)_{\text{cúbica}} = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^4} \right] (t) = \frac{E_1}{6} t^3 + \frac{E_2}{2} t^2 + E_3 t + E_4 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^4} e^{x_r t} = F_4(t)$$

11.2 Determinación de las constantes E₁, E₂, E₃ y E₄.

Dichas constantes se determinan a través de las ecuaciones 24.

Se entiende que cuando se busquen las funciones Y el valor de H(s)=1 y el valor de G(s)=BB(s). Donde BB(s) significa el resultado en la respectiva posición del producto de capsas que componen enl cerramiento, expresando los flujos de calor en función de las temperaturas.

Se entiende que cuando se busquen las funciones Z el valor de H(s)=-AA(s) y el valor de G(s)=BB(s). Donde AA(s) y BB(s) significa el resultado en la respectiva posición del producto de capsas que componen enl cerramiento, expresando los flujos de calor en función de las temperaturas.

Finalmente para la función X el valor de H(s)=-DD(s) y el valor de G(s)=BB(s). Donde DD(s) y BB(s) significa el resultado en la respectiva posición del producto de capsas que componen enl cerramiento, expresando los flujos de calor en función de las temperaturas.

Cuando determinamos los valores de E₁, E₂, E₃ y E₄ mediante la ecuación 24

El valor de la constante E₁ es inmediato de acuerdo con la ec. 24

$$E_1 = \frac{H(0)}{G(0)}$$

Si observamos las expresiones para E₂, E₃ y E₄ requieren la derivada (n-1) del cociente H(s)/G(s) en el límite cuando se tiende a anular (s tiende a 0). Notemos que

estas expresiones son de difícil cálculo, es mas, con esta técnica se pueden determinar las constantes E2 y E3, no obstante para E4 resulta imposible su determinación (el límite siempre da una indeterminación por muchas veces que se aplique l'hopital).

Si consideramos las expresiones de F(t) de las ecuaciones 25, nos damos cuenta que dichas funciones representan el flujo de calor que atraviesa el muro en el interior o exterior (según el caso) ante excitaciones en el interior o exterior según el caso. Siendo, (de acuerdo con las relaciones básicas de las funciones de transferencia, concretamente utilizando)

$$\mathfrak{I}[at^n] = n! \frac{a}{s^{n+1}}$$

F1 flujo de calor en función del tiempo ante una excitación escalón (está multiplicada por (1/s)

F2 flujo de calor en función del tiempo ante una excitación rampa (empezando con un vapor nulo, está multiplicada por (1/s²))

F3 flujo de calor en función del tiempo ante una excitación parabólica (empezando con un valor nulo, está multiplicada por (1/s³))

F4 flujo de calor en función del tiempo ante una excitación cúbica (empezando con un valor nulo, está multiplicada por (1/s⁴))

Como para las funciones F2, F3 y F4 la excitación (lineal, parabólica o cúbica) empiezan con un valor nulo en la excitación la respuesta en el instante inicial debe ser obligatoriamente también nula, por lo cual en el instante inicial tenemos:

- Para la función F2(t) y t=0:

$$F2(t) = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^2} \right] (t) = E_1 t + E_2 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^2} e^{x_r t}$$

Y para t=0;

$$E_2 = - \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^2}$$

Donde

$$E_0(x_r) = \frac{H(x_r)}{\left. \frac{dG(s)}{ds} \right|_{s=x_r}}$$

Expresiones que se determinan fácilmente conociendo los polos x_r

- Para la función F3(t) y t=0 el procedimiento es el mismo:

$$F3(t) = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^3} \right] (t) = \frac{E_1}{2} t^2 + E_2 t + E_3 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^3} e^{x_r t}$$

Y para t=0;

$$E_3 = - \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^3}$$

- Y finalmente para F4(t) y t=0 siguiendo el mismo procedimiento:

$$F4(t) = \mathfrak{I}^{-1} \left[\frac{H(s)}{G(s)} \frac{1}{s^4} \right] (t) = \frac{E_1}{6} t^3 + \frac{E_2}{2} t^2 + E_3 t + E_4 + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^3} e^{x_r t}$$

Y para $t=0$;

$$E_4 = - \sum_{r=1}^{\infty} \frac{E_0(x_r)}{x_r^4}$$

Mediante estas expresiones resulta fácil determinar las constantes E_2 , E_3 y E_4