



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN EDIFICACIÓN

Proyecto Final de Máster

**CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA
FACHADA DE UN EDIFICIO HISTÓRICO EN
VALENCIA**

Autor: David Lago Navia

Tutores: Juan Soto Camino
Carolina Aparicio Fernández
José Luis Vivancos Bono

E.T.S. de Ingeniería de Edificación

Abril de 2012

David Lago Navia

Proyecto Final de Máster

CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LA FACHADA DE UN EDIFICIO HISTÓRICO EN VALENCIA

ÍNDICE

NOMENCLATURA	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Planteamiento general del trabajo.....	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Alcance.....	10
1.4. Metodología	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	13
2.1. Termodinámica y calor	13
2.2. Modos de transmisión de calor	17
2.3. Conducción del calor.....	18
2.4. Convección	19
2.5. Radiación	21
2.6. Combinación modos de transmisión de calor	23
2.7. Radiación solar	31
3. EDIFICIO OBJETO DEL ESTUDIO	37
3.1. Contexto y localización del edificio	37
3.2. Características formales y constructivas	38
3.3. Estudio de sombras	40
4. MODELO Y SIMULACIÓN DE LA FACHADA	42
4.1. Modelo físico y matemático	42
4.2. Toma y tratamiento de datos.....	46
4.3. Cálculo radiación solar incidente	51
4.4. Cálculo del coeficiente de convección.....	54
4.5. Cálculo conductancia y masa térmica del cerramiento.....	55
4.6. Validación y ajuste del modelo.....	58
4.7. Simulaciones.....	62
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	67
5.1. Datos de la medición in situ	67
5.2. Comportamiento térmico cerramientos	69
5.3. Comparación entre los diferentes cerramientos.....	73
5.4. Perfiles térmicos.....	74
6. CONCLUSIONES.....	79
7. BIBLIOGRAFÍA	81

8. ANEXOS.....	83
8.1. Anexo I. Gráficas de temperaturas reales.....	83
8.2. Anexo II. Gráficas de ajuste mes de junio.....	85
8.3. Anexo III. Gráficas simulación temperatura superficial interior mes de junio	87

NOMENCLATURA

Símbolo	Cantidad	Unidades Sistema Internacional
A	Área; A_c área transversal; A_q área a través de la cual la velocidad de transmisión de calor es q ; A_s área de la superficie.	m^2
c	Calor específico; c_p calor específico a presión constante; c_v calor específico a presión constante.	$J / kg K$
C	Capacidad térmica.	J / K
e	Energía interna por unidad de masa	J / kg
E	Energía interna	J
E	Potencia emisiva de un cuerpo radiante; E_b potencia emisiva del cuerpo negro.	W/m^2
G	Radiación incidente en superficie unitaria por unidad de tiempo.	W / m^2
h	Entalpía por unidad de masa	J / kg
h_c	Coefficiente de transferencia local de calor por convección.	W / m^2
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación	W / m^2
i	Ángulo entre la dirección de los rayos del sol y la normal a la superficie.	rad
i	Corriente eléctrica.	A
I	Intensidad de la radiación.	W / sr
J	Irradiancia	W / m^2
k	Conductividad térmica	$W / m K$
K	Conductancia térmica; K_k conductancia térmica para transferencia de calor por conducción; K_r conductancia térmica para transferencia de calor por radiación	W / K
l	Longitud en general	m
L	Longitud a lo largo de una trayectoria de flujo de calor, o longitud característica de un cuerpo.	m
M	Masa	Kg
p	Presión estática	N / m^2

Símbolo	Cantidad	Unidades Sistema Internacional
q	Velocidad de transmisión de calor; q_k velocidad de transmisión de calor por conducción; q_r velocidad de transmisión de calor por radiación; q_c velocidad de transmisión de calor por convección.	W
q''	Flujo de calor	W / m ²
Q	Cantidad de calor	J
R	Resistencia térmica; R_c resistencia a la transferencia de calor por convección; R_k resistencia a la transferencia de calor por conducción; R_r resistencia a la transferencia de calor por radiación.	K / W
R_e	Resistencia eléctrica	Ohm
t	Tiempo	S
T	Temperatura	K o °C
u	Energía interna por unidad de masa	J / kg
u	Promedio de la velocidad en dirección x con respecto al tiempo.	m / s
U	Coefficiente global de transferencia de calor	W / m ² K
U_∞	Velocidad de corriente libre	m/s
v	Volumen específico	m ³ / kg
V	Volumen	m ³
W	Trabajo	W
Letras griegas		
α	Absortancia de radiación	
α	Difusividad térmica	m ² / s
Δ	Diferencia de valores	
ε	Emisividad	
λ	Longitud de onda	m
ρ	Densidad de volumétrica	Kg / m ³
ρ	Reflectancia de la radiación	
τ	Transmitancia de la radiación	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W / m ² K ⁴
ϕ	Ángulo	rad

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento general del trabajo

En la actualidad, la sociedad está comenzando a tener una mayor sensibilidad en temas como el ahorro energético, la reducción de la contaminación, la reducción de las emisiones de CO₂, el reciclaje, la reutilización, el uso de energías renovables, y toda una serie de medidas orientadas hacia el desarrollo sostenible. Este concepto, resulta un tanto impreciso por estar abierto a diferentes interpretaciones pero constituye un elemento de referencia internacional, y su definición fue acuñada en 1987 en el Informe Brundtland. Esta Comisión forma parte de la Comisión de Medio Ambiente de la ONU y definió el desarrollo sostenible como aquel *"que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades"*.

A partir de esta sensibilidad orientada hacia el desarrollo sostenible, en la actividad de la construcción podemos contribuir al mismo, a través de la aplicación de una serie de medidas encaminadas a la reducción del consumo de materias y energía, la reutilización de materiales, la rehabilitación de los edificios y la incorporación de sistemas de generación de energía para el autoconsumo.

La rehabilitación, reforma o mejora de los edificios existentes es una de las líneas ha desarrollar en la arquitectura para favorecer la reducción del consumo energético en un futuro, debido a que existe un gran parque inmobiliario que no cumple con las condiciones térmicas mínimas exigidas en la actualidad. Esta deficiencia va asociada al mayor consumo de energía que se necesita para poder acondicionar térmicamente los espacios de estos edificios, que a su vez implica un mayor gasto económico en energía para los usuarios.

Es por ello, que con la intención de conocer el comportamiento térmico de la fachada de un edificio que no cumple la actual normativa, se ha planteado el presente trabajo. El inmueble seleccionado es un edificio histórico situado en el centro de Valencia que va a ser rehabilitado, y al que se ha tenido acceso para poder realizar mediciones in situ.

1.2. Objetivos

Objetivo principal

El presente trabajo tiene como objetivo principal la caracterización térmica de la fachada de un edificio histórico a partir de la proposición de un modelo de transferencia de calor que será validado con los datos experimentales recogidos "in situ", y a partir de éste conocer el comportamiento térmico actual y de las mejoras propuestas en su rehabilitación.

Objetivos complementarios

- Analizar como fluctúa la temperatura superficial interior de un muro de fábrica de ladrillo durante el mes de junio.
- Comparar cómo se comportan térmicamente las siguientes soluciones constructivas:
 - Un muro de un pie de fábrica de ladrillo.
 - Un muro de un pie de fábrica de ladrillo con aislamiento en la cara interior.
 - Un muro de un pie de fábrica de ladrillo con aislamiento en la cara exterior
- Analizar las diferencias que existen entre situar el aislamiento en la cara exterior o en la cara interior de la fábrica de ladrillo.

1.3. Alcance

El análisis y resultados que se van a presentar no van a hacer referencia a la caracterización térmica del edificio en su totalidad, sino que el estudio se centra en la fachada Este del espacio bajo cubierta, donde se han situado las sondas que han medido las temperaturas durante el periodo que va desde el 7 de mayo de 2011 hasta el 7 de julio de 2011. Los datos que van a ser empleados para el desarrollo del presente trabajo son los referidos al mes de junio.

1.4. Metodología

Para el desarrollo del presente documento se han seguido los siguientes pasos:

1. Explicación de los fundamentos teóricos que sustentan la transferencia del calor.
2. Datos relativos al edificio analizado, como la situación, las características formales y constructivas, y un estudio del soleamiento.

3. Planteamiento y desarrollo del modelo propuesto de transferencia de calor. Para ello se definirán las ecuaciones que permiten calcular la temperatura interior superficial de la fachada en un estado unidimensional y transitorio
4. Validación a través de la comparación de los resultados de la simulación con los datos obtenidos en la medición in situ.
5. Simulación de los casos propuestos.
6. Obtención de los resultados y análisis.
7. Conclusiones.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Termodinámica y calor

La rama científica que se encarga del estudio de las relaciones entre el calor y otras formas de energía es la termodinámica, que en la actualidad está presente en numerosos campos como la física, la química, la biología, la meteorología, la ingeniería, etc.

Los principios sobre los que se asienta la termodinámica se basan en la observación de la naturaleza, y así en el siglo XIX, se establecieron dos importantes leyes, el *primer principio* y *segundo principio* de la termodinámica. A principios del siglo XX se desarrolló el *tercer principio* de la termodinámica, y por último, decir que existe un *principio cero* que define el concepto de equilibrio térmico y a partir de él, la temperatura. A continuación se describen brevemente los tres principios de la termodinámica:

- El *Primer Principio de la Termodinámica* establece el principio de conservación de la energía, donde la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma. Su enunciado sería: $E = Q + W$, donde "E" es la energía interna del sistema, "Q" es la cantidad de calor aportado al sistema y "W" es el trabajo realizado por el sistema.
- El *Segundo Principio de la Termodinámica* determina cual es la dirección en la que se producen los procesos termodinámicos. La experiencia ha demostrado que el calor se traslada de una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura.
- El *Tercer Principio de la Termodinámica* fija un límite mínimo para la temperatura y la entropía. Tenemos que para un entorno macroscópico no es posible alcanzar la temperatura de cero absoluto.

En relación con la termodinámica vamos a definir una serie de conceptos base sobre los que delimitar nuestro campo de actuación para el presente estudio.

2.1.1. Sistema termodinámico

Definimos como sistema termodinámico a aquella región del espacio objeto del estudio, que está separada del medio que la rodea por una superficie límite. Esta superficie límite determina el tipo de relación que se establece entre el sistema y su entorno, de modo que en función de la influencia de las variables de cambio de volumen, flujo de calor y flujo de

materia determinaremos las características de los límites del sistema según se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación límites del sistema

	Sí	No
Cambio de forma	Móvil	Rígido
Flujo de calor	Diatérmico	Adiabático
Flujo de materia	Permeable	Impermeable

Según el tipo de intercambio que se establezca entre el sistema y su entorno a través de sus límites, podemos clasificar los sistemas en tres tipos, **abierto**, **cerrado** y **aislado**, según se muestra en la figura 1. El sistema abierto permite el intercambio de materia y energía, el sistema cerrado puede intercambiar energía, y el sistema aislado no intercambia ni energía ni materia con sus alrededores.

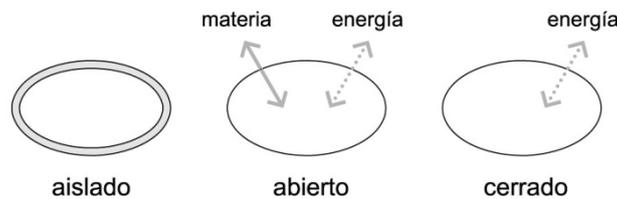


Figura 1. Clasificación de los sistemas según el intercambio de energía y materia con su entorno.

Variables termodinámicas y funciones de estado

Las variables termodinámicas son aquellas magnitudes observables que permiten definir el Estado de un Sistema. Estas variables hacen referencia a las propiedades macroscópicas del sistema como son el volumen, la temperatura, la presión, la densidad, la composición, etc.

Las funciones de estado permiten evaluar el estado de un sistema a partir de las leyes generales del comportamiento de la materia, para lo que definimos diferentes variables termodinámicas. Con estas funciones podemos definir la energía interna, la entalpía, la entropía o el índice de refracción de una sustancia. Sin embargo no podemos determinar el calor ni el trabajo.

Estados de equilibrio

Un sistema se encuentra en equilibrio cuando las variables que lo definen adquieren un valor constante en toda coordenada independiente del tiempo. Todo sistema tiende hacia el estado de equilibrio y una vez alcanzado implica que exista:

- Equilibrio térmico: la temperatura es igual en todos los puntos del sistema.
- Equilibrio mecánico: la presión adquiere el mismo valor en todo punto.
- Equilibrio químico: la composición química es la misma en todos los puntos.

Variables extensivas e intensivas

Las variables extensivas de un sistema son aquellas que dependen del tamaño de la muestra o del sistema. Así, podemos considerar como variables extensivas al volumen, la masa, la carga eléctrica, la entalpía, etc. Cuando el sistema es un punto, el valor de estas variables tiende a cero.

Las variables intensivas son aquellas que no dependen de la dimensión del sistema, como puede ser la temperatura, la presión, la densidad, etc.

Procesos termodinámicos

Un proceso termodinámico tiene lugar cuando en un sistema modificamos alguna de sus variables de estado y éstas van tomando diferentes valores según el tiempo. El sistema pasa de un estado inicial de equilibrio "A" a un estado de equilibrio final "B", y en función de la variable (p , V , T) que permanezca constante podemos denominar el proceso como:

- Isobárico ($p = constante$)
- Isósterico ($V = constante$)
- Isotérmico ($T = constante$)
- Adiabático ($Q = 0$)

Una transformación termodinámica puede ser *reversible* cuando toda la secuencia de estados intermedios desde "A" hasta "B" se han realizado existiendo equilibrio termodinámico entre el sistema y el entorno. Sin embargo, una evolución puede ser *irreversible* si no ha existido equilibrio fisicoquímico entre el sistema y el entorno.

2.1.2. Temperatura

La temperatura es la cantidad de energía cinética media de las moléculas en un sistema o cuerpo, y se puede medir con un termómetro o un calorímetro.

También podemos definir la temperatura como una sensación fisiológica que permite diferenciar entre calor y frío, donde apreciamos las variaciones entre uno y otro. Sin embargo, no podemos determinar de modo cuantitativo los valores de esta magnitud.

2.1.3. El calor

La energía interna de un sistema puede ser modificada por medio de dos mecanismos, el trabajo realizado y el flujo de calor. Para el presente estudio, vamos a analizar únicamente la variación de energía a partir de un flujo de calor.

Siempre que tengamos dos cuerpos entre los que exista una diferencia de temperatura se va a producir una transferencia de energía del cuerpo más caliente hacia el más frío hasta igualar sus temperaturas. Esta energía que se transfiere de un cuerpo a otro en función de la diferencia de temperaturas, se denomina **calor**. Por lo tanto, el fenómeno del calor se considera transitorio, y finaliza una vez se alcanza el estado de equilibrio.

Como el calor es una forma de energía, las **unidades de medida** tienen que ser energéticas, de modo que en el Sistema Internacional se emplean los Julios (J) que se definen como la cantidad necesaria de calor para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14,5 a 15,5 °C bajo la presión de una atmósfera. También es posible encontrar estas unidades en calorías (cal), que equivalen a 4,186 Julios, en BTU (British Thermal Unit), donde $1\text{BTU} \cong 252 \text{ cal}$.

A continuación vamos a definir dos conceptos relacionados con el calor como son la el calor específico y la capacidad calórica de un sistema:

- a) **Calor específico** es la cantidad de calor necesario para incrementar la temperatura de un gramo de material en un grado centígrado.
- b) **Capacidad calórica de un sistema** es la cantidad de calor que puede almacenar un sistema para aumentar su temperatura un grado centígrado. La expresión que permite evaluar la capacidad calórica se obtiene como se expresa a continuación, siendo m_i la masa en gramos de los componentes que forman el sistema y c_{ei} el calor específico tabulado para cada componente:

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_e$$

La cantidad de calor que puede almacenar un sistema cuando pasa de una temperatura T_1 a otra temperatura T_2 , se obtiene como sigue:

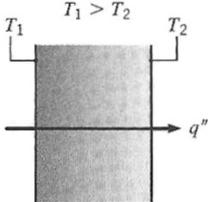
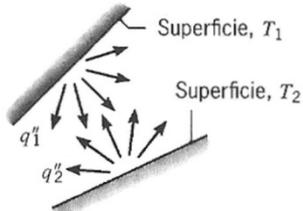
$$Q = \int_{T_1}^{T_2} C \cdot dT = \int_{T_1}^{T_2} \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{ei} \right) \cdot dT$$

2.2. Modos de transmisión de calor

Siempre que en un sistema existe una diferencia de temperaturas se produce un flujo de calor que va desde la zona más caliente hacia la más fría, hasta que ambas se igualan. Los fenómenos de transmisión de calor se clasifican habitualmente en tres tipos, conducción, convección y radiación, aunque lo más frecuente es que aparezcan combinados.

- Conducción:** es el modo de transmisión de calor que se produce en los medios materiales donde la energía calórica se traslada de unas moléculas a otras a través de los impactos que se producen como consecuencia del movimiento vibratorio sin que se produzca transferencia de masa.
- Convección:** es un mecanismo propio de los fluidos y los gases donde la transferencia de calor se genera a partir de los movimientos macroscópicos de la masa de la propia sustancia.
- Radiación:** todo cuerpo que tenga una temperatura superior a cero absoluto emite radiación electromagnética, generada por una excitación térmica denominada radiación térmica. Cuando la radiación llega hasta un cuerpo puede ser reflejada, absorbida o transmitida.

Tabla 2. Transferencia de calor: conducción, convección y radiación. (Incropera, 1999)

Conducción a través de un sólido o un fluido estacionario	Convección de una superficie a un fluido en movimiento	Intercambio neto de calor por radiación entre dos superficies
		

Por último, hay que añadir que un proceso de transmisión de calor se clasifica de acuerdo a las variables que influyen en la temperatura, como son el tiempo y el espacio. Un flujo de calor se denomina *estacionario* o *estado estable* cuando su temperatura no varía con el tiempo, y *no estacionario* o *transitorio* si la temperatura varía con el tiempo. Si la temperatura varía en función de una, dos o tres coordenadas espaciales, tenemos que el flujo puede ser *unidimensional*, *bidimensional* o *tridimensional* respectivamente.

2.3. Conducción del calor

La conducción de calor es un modo de transferencia de calor consecuencia de la actividad atómica y molecular que se produce cuando existe una diferencia energética entre dos puntos de una sustancia. De modo que las partículas más energéticas transfieren parte de su energía calórica a las menos energéticas hasta igualar ambas su temperatura.

Físicamente, el fenómeno de la conducción está asociado con el movimiento traslacional aleatorio, los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas. Esta transferencia de energía neta consecuencia de los movimientos aleatorios a nivel molecular es conocida como difusión de energía.

Para cuantificar el proceso de transferencia de calor existen ecuaciones y modelos que permiten calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de superficie. La ecuación que define la conducción es la **Ley de Fourier** que para una pared plana unidimensional y con una distribución de temperaturas $T(x)$, se expresa como sigue:

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

donde,

q_k : es la velocidad del calor por conducción perpendicular al área A (W)

k : es la constante de proporcionalidad conocida como conductividad térmica (W/m·K)

A : es el área de la superficie por donde fluye el calor (m²)

dT : el gradiente de temperatura entre T_2 y T_1 (K)

dx : es la distancia entre dos puntos x_1 y x_2 (m)

La conductividad térmica se define como la velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura.

Para unas condiciones de estado estable, donde existe una distribución lineal de la temperatura y un espesor L (m), el gradiente de temperatura se expresa como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

de modo que la velocidad de transferencia de calor por conducción queda como muestra la siguiente expresión:

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{L}$$

El signo menos que aparece en la ecuación es debido al convenio de que el flujo de calor que se transfiere de la zona de mayor temperatura a la de menor adopta el signo positivo.

El flujo de calor por conducción es la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo a través de una superficie unitaria y su valor se obtiene como sigue:

$$q_k'' = \frac{q}{A} = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (W/m^2)$$

2.4. Convección

El mecanismo de transferencia de calor por convección está formado por dos fenómenos que se producen simultáneamente la difusión y los movimientos macroscópicos. El primero de ellos, la difusión, que como ya describimos anteriormente, es el modo de transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio. El segundo se fundamenta en los movimientos globales o macroscópicos de los fluidos, donde la energía se transfiere a partir de movimientos de grandes grupos de moléculas. Este movimiento se genera a partir de una diferencia de temperaturas entre las diferentes áreas del fluido que se encuentran a densidades distintas, por lo que la acción de la gravedad da lugar a que las masas más densas tiendan a desplazarse hacia los estratos inferiores.

Para el estudio de los fenómenos de convección nos vamos a centrar en analizar lo que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie cuando existe una diferencia de temperatura entre ambos. Si consideramos una superficie más caliente que el entorno se va a producir un flujo de calor entre la superficie y el ambiente, y entre ambos se va a crear una capa límite que va actuar como intercambiador.

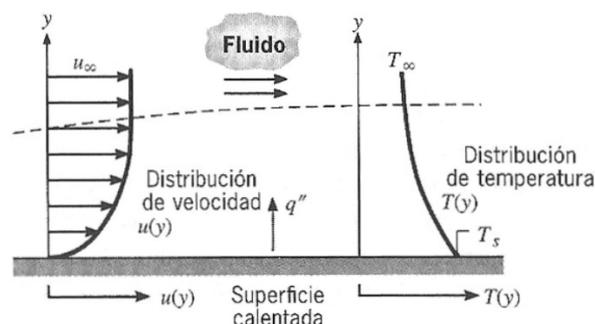


Figura 2. Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por conducción (Incropera, 1999).

Esta región del fluido se puede definir a partir de la velocidad del fluido, denominándose capa límite hidrodinámica. La velocidad varía desde su valor inicial cero, que aparece sobre la superficie hasta un valor final U_{∞} que se mantiene constante asociado al flujo. Esta variación de velocidades define el espesor de la capa límite. También podemos considerar como capa límite la formada por la variación de temperaturas que existe entre la superficie y el fluido, así tenemos la capa límite térmica.

Si nos centramos en el modo de transferencia de calor por convección que se produce en la capa límite según se muestra en la figura 2, tenemos que en el punto de contacto con la superficie la transferencia de calor se produce por difusión únicamente, por ser la velocidad del fluido igual a cero. A medida que nos alejamos de la superficie la velocidad del fluido va aumentando, así tenemos que la transferencia se debe tanto a fenómenos de difusión como a los movimientos macroscópicos de las moléculas del fluido. El espesor de la capa límite no permanece constante, sino que va a aumentar a medida que nos desplazamos sobre la superficie.

La transferencia de calor por convección se puede clasificar según la naturaleza que la origine:

- *Convección natural*: los movimientos están producidos por la acción de la gravedad al existir variaciones de densidad consecuencia del gradiente de temperatura.
- *Convección forzada*: el flujo es causado por movimientos externos, como un ventilador, un agitador o vientos atmosféricos.
- *Convección mixta*: se produce cuando tenemos una acción conjunta de convección forzada y natural.

La velocidad de transferencia de calor por convección, con independencia de la naturaleza de su origen, responde a la ecuación definida a partir de la **Ley de Enfriamiento de Newton**, que define:

$$q_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$

donde,

q_c : es la velocidad de transferencia de calor por convección (W)

\bar{h}_c : coeficiente de transferencia de calor por convección promedio y va a depender de las condiciones de la capa límite, y la dirección del flujo de calor (ascendente, descendente y horizontal). (W/m² K)

A : área de transferencia de calor (m²)

T_s : temperatura de la superficie (K)

T_∞ : temperatura ambiente (K)

El estudio de la convección se centra en los medios posibles para determinar el coeficiente de convección en la que influyen la geometría de la superficie, la rugosidad, el tamaño de la superficie, si existe flujo laminar o turbulento, la viscosidad y el calor específico del fluido.

Tabla 3. Valores típicos para el coeficiente de transferencia de calor por convección

Proceso	h_c (W/m ² K)
Convección libre en gases	2-25
Convección libre en líquidos	50-1000
Convección forzada en gases	25-250
Convección forzada en líquidos	50-20000

2.5. Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura superior al cero absoluto. La energía radiada por un cuerpo se transporta a través de las ondas electromagnéticas, y a diferencia de modos de transferencia de calor por conducción y convección, no precisa de un medio material para desplazarse. Las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad máxima de 300.000 km/s en el vacío, mientras que ésta disminuye si se desplaza en un medio material.

La radiación que emite una superficie se origina a partir de la energía térmica de la materia que está limitada por su superficie, y la velocidad a la que libera esta energía por unidad de superficie (W/m²), se denomina *potencia emisiva*, que es establecida por la **Ley de Stefan-Boltzmann**:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4$$

donde T_s es la temperatura absoluta en Kelvin de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m K}^4$). Dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro.

El *cuerpo negro* se define como aquel que tiene la capacidad para absorber toda la energía que recibe y emitir toda la energía almacenada.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura, y viene dado por:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Los valores están en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia de un cuerpo real con respecto al cuerpo ideal.

Un cuerpo no solo emite radiación sino que también recibe de su entorno, por lo que la velocidad con que esta radiación incide sobre la superficie unitaria se conoce como irradiación G . Si toda la irradiación es absorbida por la superficie estamos ante el caso de radiador ideal, sin embargo la mayoría de los materiales no absorben toda la radiación incidente por lo que tenemos que definir una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α para determinar cuál es la velocidad a la que la energía es absorbida:

$$G_{abs} = \alpha \cdot G$$

Los valores de la absorptividad varían de cero a uno. Si tenemos que $\alpha < 1$ y la superficie es opaca, una parte de la irradiación se refleja. Si la superficie es semitransparente, parte de la radiación se transmite.

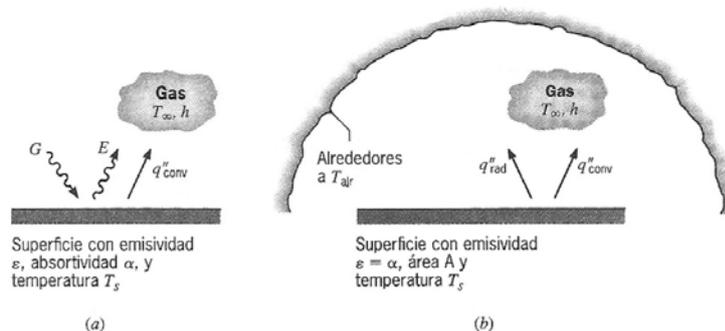


Figura 3. Intercambio de radiación: (a) en la superficie, y (b) entre la superficie y sus alrededores. (Incropera, 1999)

La energía absorbida y emitida, aumenta y disminuye la energía térmica de la materia, mientras que la radiación reflejada y transmitida no tiene ningún efecto sobre esta energía. La absorptividad α de una superficie depende de las características de la radiación electromagnética recibida. Si suponemos un cuerpo gris con valores de absorptividad y emisividad, la velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie es:

$$q_r'' = \frac{q_r}{A} = \varepsilon \cdot E_b \cdot T_s - \alpha G$$

Para el caso en que $\alpha = \varepsilon$ tenemos que el flujo de radiación:

$$q_r'' = \frac{q_r}{A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{alr}^4) \text{ W/m}^2$$

La velocidad de transferencia de calor por radiación de una superficie también se puede expresar en función de un coeficiente de radiación como:

$$q_r = h_r \cdot A \cdot (T_s - T_{alr}) \quad W$$

donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r es:

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{alr}) \cdot (T_s^2 + T_{alr}^2) \quad W/m^2K$$

2.6. Combinación modos de transmisión de calor

En los puntos anteriores se analizaron los tres modos básicos de transferencia de calor por separado, sin embargo, en la práctica es habitual que aparezcan combinados. Por ejemplo, si tenemos una pared en contacto con el ambiente exterior sobre la que incide el sol, la superficie estará afectada por dos mecanismos de transmisión de calor, la radiación y la convección que actuarán simultáneamente. A continuación, se analizarán las diferentes combinaciones de transferencia de calor que se pueden dar, así como la relación que existe entre un circuito térmico y uno eléctrico.

2.6.1. Pared plana y resistencias térmicas

Si consideramos un sistema formado por una pared plana y el entorno próximo a ambos lados, para el caso de un gradiente de temperatura y un flujo de calor constantes en el tiempo y el área de la sección transversal a la dirección del flujo de calor es uniforme, podemos reorganizar las variables de la expresión de la velocidad de transferencia de calor por conducción para definir un nuevo término, la *resistencia térmica* R_k . La ecuación resultante de reorganizar las variables es la siguiente:

$$\frac{q_k}{A} \int_0^l dx = - \int_{T_1}^{T_2} k \cdot dT$$

En esta ecuación si k es independiente de la temperatura, T , después de integrar se obtiene la siguiente expresión para la velocidad de conducción de calor a través de la pared:

$$q_k = \frac{A \cdot k}{L} (T_2 - T_1) = \frac{\Delta T}{L/A \cdot k}$$

La diferencia de temperaturas entre el punto uno y dos es la fuerza impulsora que provoca el flujo de calor. El denominador de la anterior expresión L/Ak equivale a una resistencia térmica R_k de la pared frente al flujo de calor por conducción:

$$R_k = \frac{L}{A \cdot k}$$

Existe una analogía entre los sistemas de flujo de calor y los circuitos eléctricos de corriente continua. Así tenemos que el flujo de corriente eléctrica i , es igual a la diferencia de potencial $E_1 - E_2$, dividido entre la resistencia eléctrica R_e , y la velocidad de transmisión de calor q_k es igual al gradiente de temperatura $T_1 - T_2$ dividido entre la resistencia térmica R_k . Esta analogía es una herramienta útil para resolver los problemas de transmisión térmica. El inverso de la resistencia térmica se conoce como *conductancia térmica* K_k , definida como:

$$K_k = \frac{A \cdot k}{L}$$

La relación k/L de la ecuación anterior se conoce como *conductancia térmica unitaria* por conducción, y su inversa L/k es la *resistencia térmica unitaria*.

Para los modos de transferencia de calor por convección y radiación también es posible definir una resistencia térmica y una conductancia, obtenidas a partir del desarrollo de sus respectivas ecuaciones de velocidad de transferencia de calor. Si tomamos como punto de partida la relación entre la variación de temperatura y la resistencia para el caso de conducción según se muestra en la siguiente ecuación:

$$q_k = \frac{\Delta T}{L/A \cdot k} = \frac{\Delta T}{R_k}$$

podemos obtener los valores de resistencia para los modos de transmisión de calor por convección y radiación. A continuación los valores de resistencia y conductancia térmica:

– Convección:

$$q_c = \bar{h}_c \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) = \frac{\Delta T}{1/\bar{h}_c \cdot A} = \frac{\Delta T}{R_c}$$

Resistencia térmica por convección R_c :

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c \cdot A} \quad (K/W)$$

Conductancia térmica por convección K_c :

$$K_c = \bar{h}_c \cdot A \quad (W/K)$$

– Radiación:

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_S^4 - T_{alr}^4) = \bar{h}_r \cdot A \cdot (T_S - T_{alr}) = \frac{\Delta T}{1/\bar{h}_r \cdot A} = \frac{\Delta T}{R_r}$$

Resistencia térmica por radiación R_r :

$$R_r = \frac{1}{\bar{h}_r \cdot A} \quad (K/W)$$

Conductancia térmica por radiación K_r :

$$K_r = \bar{h}_r \cdot A \quad (W/K)$$

2.6.2. Pared plana en serie y en paralelo

En un sistema formado por dos capas o más colocadas en serie, entre las que existe un buen contacto térmico, la velocidad de transferencia de calor por conducción permanece constante, sin embargo, el gradiente de temperatura varía de una capa a otra en función de la conductividad térmica y el espesor del material.

Si tomamos como ejemplo un sistema físico formado por tres capas, figura 4, podemos relacionar las ecuaciones de cada una de las capas a través de la velocidad de transferencia de calor por conducción, según se muestra a continuación:

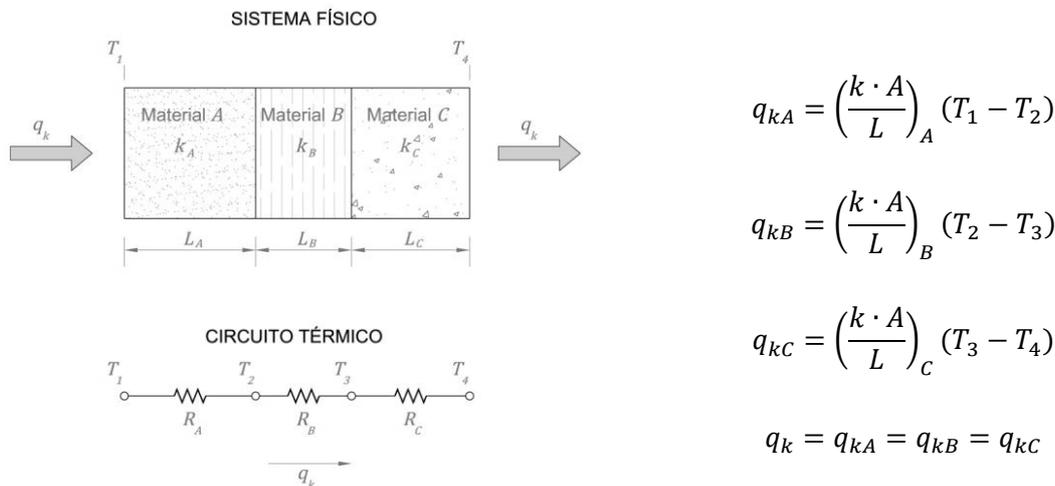


Figura 4. Conducción a través de un sistema de tres capas en serie. (Kreith and Bohn, 2002)

si eliminamos las temperaturas intermedias T_2 y T_3 podemos expresar q_k como:

$$q_k = \frac{T_1 - T_4}{(L/k \cdot A)_A + (L/k \cdot A)_B + (L/k \cdot A)_C} = \frac{T_1 - T_{N+1}}{\sum_{n=1}^{n=N} (L/k \cdot A)_n}$$

donde T_{N+1} es la temperatura superficial de la última capa considerando que la pared está formada por N capas. Si aplicamos la definición de la resistencia térmica, la ecuación queda:

$$q_k = \frac{\Delta T}{\sum_{n=1}^{n=N} R_{k,n}}$$

donde ΔT es la diferencia máxima de temperaturas entre el punto uno y cuatro, para el ejemplo analizado. A partir de esta ecuación comprobamos como el gradiente térmico influye directamente en la velocidad de transferencia de calor, pues para una misma pared, cuanto mayor sea este valor, mayor será la velocidad.

También es posible que dentro de un sistema exista una capa en la que se presenten dos materiales diferentes situados en paralelo, de modo que la conducción se produce en paralelo en esta capa. En el ejemplo de la figura 5, tenemos un sistema formado por tres capas, donde la capa central está constituida por dos materiales diferentes situados en paralelo, el circuito térmico que se modeliza para este sistema está formado por dos resistencias térmicas colocadas en serie y dos en paralelo. Para el caso de dos resistencias colocadas en paralelo, el flujo de calor pasa a través de dos trayectorias distintas, con el mismo potencial para ambas, siendo la velocidad final del flujo de calor igual a la suma de las velocidades para cada uno de los materiales. La velocidad final de transferencia de calor por conducción para la capa formada por los materiales B y C es:

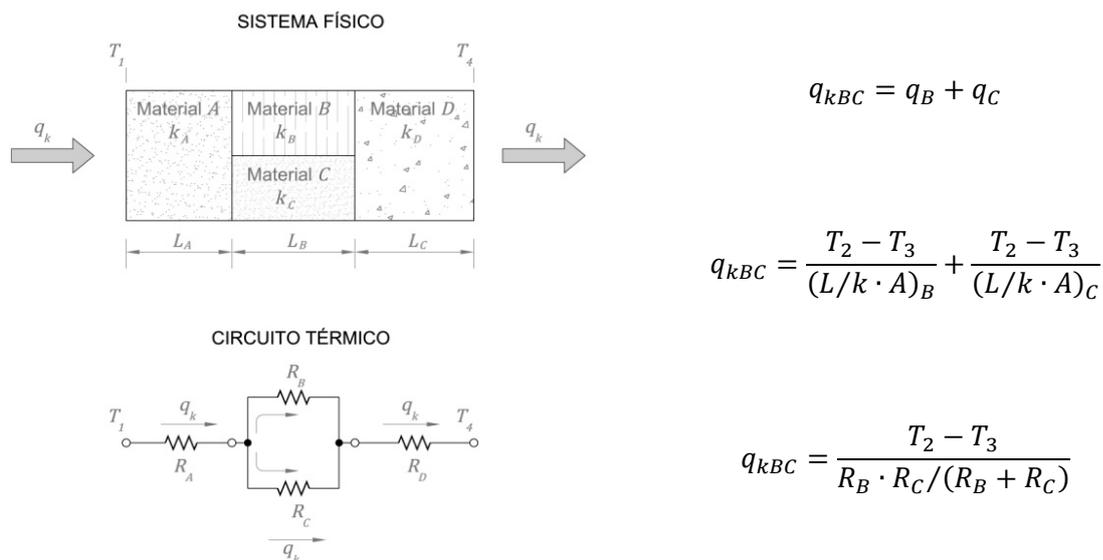


Figura 5. Conducción en serie y en paralelo.

Así que la resistencia para la capa dos, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$R_{BC} = \frac{R_B \cdot R_C}{R_B + R_C}$$

La ecuación final que da el valor de la resistencia total para la pared compuesta del ejemplo, donde el flujo de calor tiene trayectorias en serie y en paralelo, es la siguiente:

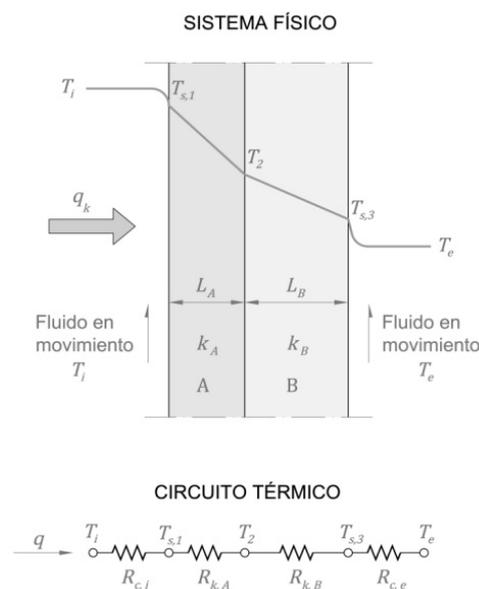
$$R_T = R_A + \frac{R_B \cdot R_C}{R_B + R_C} + R_D$$

2.6.3. Conducción y convección en serie

A la hora de analizar una pared, no solo valoramos como se transfiere el calor a través de ella, sino que también consideramos como influye el entorno próximo. Habitualmente, si consideramos la pared de un edificio vamos a tener a ambos lados un fluido, el aire, dónde la transmisión de calor se realiza por convección. La resistencia térmica para el fenómeno de la convección es:

$$R_c = \frac{1}{\bar{h}_c \cdot A}$$

Si tomamos como ejemplo la figura 6, la velocidad de transferencia del fluido se obtiene como sigue:



$$q = \frac{T_{caliente} - T_{frío}}{\sum_{n=1}^n R_i} = \frac{\Delta T}{R_i + R_A + R_B + R_e}$$

donde las resistencias son:

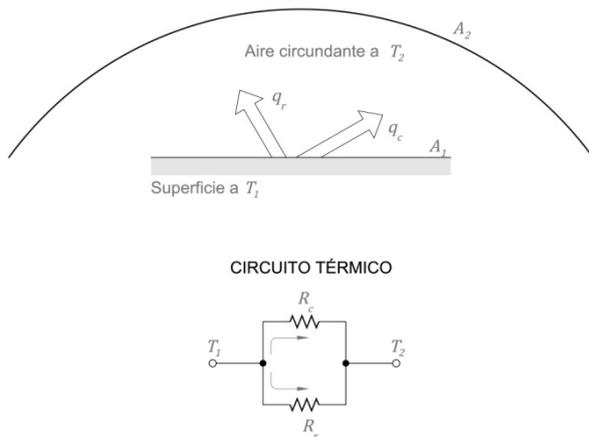
$$R_i = \frac{1}{(\bar{h}_c \cdot A)_i}; \quad R_e = \frac{1}{(\bar{h}_c \cdot A)_e}$$

$$R_A = \frac{L_A}{(k \cdot A)}; \quad R_B = \frac{L_B}{(k \cdot A)}$$

Figura 6. Diagrama y circuito térmico de una pared compuesta con convección sobre las superficies exteriores.

2.6.4. Convección y radiación en paralelo

Una superficie puede estar afectada al mismo tiempo por fenómenos de convección y radiación. La figura 7 servirá como ejemplo para calcular la velocidad de transferencia de calor debida a la combinación de estos dos mecanismos de transferencia de calor. La velocidad total de transferencia calor es igual a la suma de la velocidad por convección y radiación, dando lugar a la siguiente expresión:



$$q = q_c + q_r$$

$$q = \bar{h}_c \cdot A \cdot (T_1 - T_2) + \bar{h}_r \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q = (\bar{h}_c + \bar{h}_r) \cdot A \cdot (T_1 - T_2)$$

Figura 7. Circuito térmico con convección y radiación actuando en paralelo. (Kreith and Bohn, 2002)

Si expresamos la velocidad en función de las resistencias situadas en paralelo, la ecuación resultante es:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R_c} + \frac{T_1 - T_2}{R_r}$$

2.6.5. Análisis numérico de la conducción: método volumen de control

Los problemas de transferencia de calor por conducción se pueden resolver a partir de los métodos de solución analítica siempre que tengamos problemas relativamente sencillos, pues para la obtención de un resultado es necesario resolver un sistema de ecuaciones diferenciales. En los casos prácticos, los problemas suelen ser más complejos debido a las condiciones de contorno, la geometría o las propiedades variables de los materiales, de modo que la solución se obtiene a partir de métodos de análisis numérico, donde las ecuaciones diferenciales son sustituidas por un sistema de ecuaciones algebraicas, dando lugar a una simplificación del problema.

Los métodos numéricos proporcionan soluciones para puntos discretos dentro de los límites del problema y ofrecen una aproximación a la solución del problema. Se ha de tener

en cuenta, que al tratarse de una aproximación existen errores que se deben de reducir al mínimo.

Para discretizar las ecuaciones diferenciales de la conducción de calor, existen diferentes métodos como los de diferencias finitas, de elementos finitos y de volumen de control; cada uno de ellos tiene una serie de ventajas y desventajas.

Para el presente trabajo se ha seleccionado el método de volumen de control, por lo que a continuación vamos a desarrollar su procedimiento de aplicación para el caso de la conducción de calor en estado transitorio unidimensional.

Método de volumen de control

El método de volumen de control consiste en analizar el balance de energía dentro de un volumen pequeño finito que se encuentra dentro de los límites del dominio definido en el problema.

Para aplicar este método en un volumen de control, sólo es necesario añadir unas condiciones de contorno y resolver el sistema de ecuaciones de diferencias resultante, teniendo en cuenta que la energía se conserva sin importar el tamaño del volumen de control.

Una vez definidos los límites del dominio del problema, tenemos que dividir el dominio en $N-1$ segmentos de control con $\Delta x = L/N-1$ de ancho, como se muestra en la figura 8, para posibilitar la identificación de los límites de cada segmento con:

$$x_i = (i - 1)\Delta x ; \quad i = 1, 2, \dots, N$$

Las posiciones x_i se denominan nodos, y a los valores 1 y N , nodos de frontera. Entonces es posible identificar la temperatura en cada nodo como $T(x_i)$ o abreviada, T_i .

A continuación definimos un periodo de tiempo discreto Δt , análogo al intervalo espacial discreto Δx ya definido:

$$t_m = m \Delta t \quad m = 0, 1, \dots$$

La temperatura nodal depende de dos índices, i y m , que corresponden a las dependencias del espacio y el tiempo respectivamente:

$$T_{i,m} \equiv T(x_i, t_m)$$

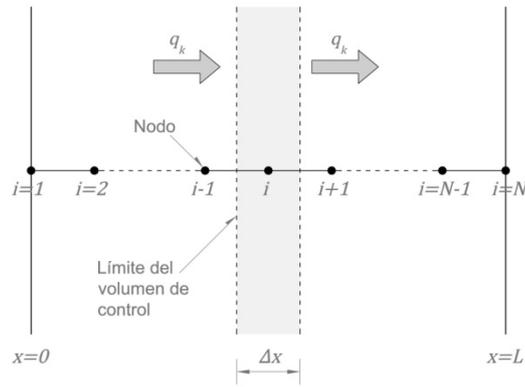


Figura 8. Volumen de control para conducción unidimensional.

Como $\Delta y = \Delta z = 1$, el término de acumulación de energía se escribe:

$$\text{Velocidad de acumulación de energía en el interior del volumen} = \rho \cdot c_p \cdot \Delta x \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta t}$$

Este término representa la energía acumulada del instante t_m al instante t_{m+1} en una placa de espesor Δx dividido entre el intervalo de tiempo $\Delta t = t_{m+1} - t_m$. La temperatura varía linealmente entre los nodos espaciales y entre los periodos del tiempo, de modo que para el caso de conducción unidimensional transitoria obtenemos:

$$-k \frac{T_{i,m} - T_{i-1,m}}{\Delta x} = -k \frac{T_{i+1,m} - T_{i,m}}{\Delta x} + \rho \cdot c_p \cdot \Delta x \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta t}$$

Si despejamos en la ecuación la temperatura evaluada en el instante $t_{m+1} = t_m + \Delta t$, obtenemos la siguiente ecuación:

$$T_{i,m+1} = T_{i,m} + \frac{\Delta t}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x} \left[k \frac{T_{i+1,m} - T_{i,m}}{\Delta x} - k \frac{T_{i,m} - T_{i-1,m}}{\Delta x} \right]$$

Esta ecuación se llama *ecuación de diferencias explícitas* porque la distribución de la temperatura en el nuevo instante t_{m+1} puede determinarse si se conoce la distribución de temperaturas completa en el instante t_m .

Para completar el planteamiento del problema, tenemos que incorporar las condiciones de contorno, como pueden ser una temperatura superficial especificada, el flujo térmico o la convección superficial.

2.7. Radiación solar

La radiación solar es la energía aportada por el sol en forma de ondas electromagnéticas que inciden sobre la superficie terrestre. La cantidad de radiación solar que llega hasta la superficie de la Tierra varía en función de una serie de condicionantes como son la localización geográfica, los ciclos estacionales y diarios, el efecto de la atmósfera, la presencia o no de nubosidad, etc.

El Sol es una estrella enana poco evolucionada con una edad aproximada de 5000 millones de años, que se sitúa a una distancia media de la Tierra de unos $1,5 \times 10^8$ km, y con una temperatura superficial efectiva de 5777 K.

2.7.1. Movimientos Tierra-Sol

Los movimientos que tiene la Tierra son la rotación, traslación, precesión y nutación, de éstos cuatro vamos a analizar la rotación y la traslación por influir en la radiación solar que recibe la Tierra.

El movimiento de traslación es aquel en el que la Tierra se desplaza alrededor del Sol describiendo una órbita elíptica con el Sol situado en uno de sus focos. La descripción matemática del desplazamiento de los planetas en su órbita alrededor del Sol se formula en las Leyes de Kepler (1609) enunciadas por Johannes Kepler (1571-1630). Debido a la excentricidad del Sol tenemos que la distancia entre la Tierra y el Sol varía a lo largo del año, dando lugar a que exista un punto de máxima proximidad al Sol denominado perihelio (Solsticio de Invierno) y otro punto de máxima lejanía llamado afelio (Solsticio de verano), según figura 9. La Tierra tarda 365 días y seis horas en dar una vuelta completa alrededor del sol.

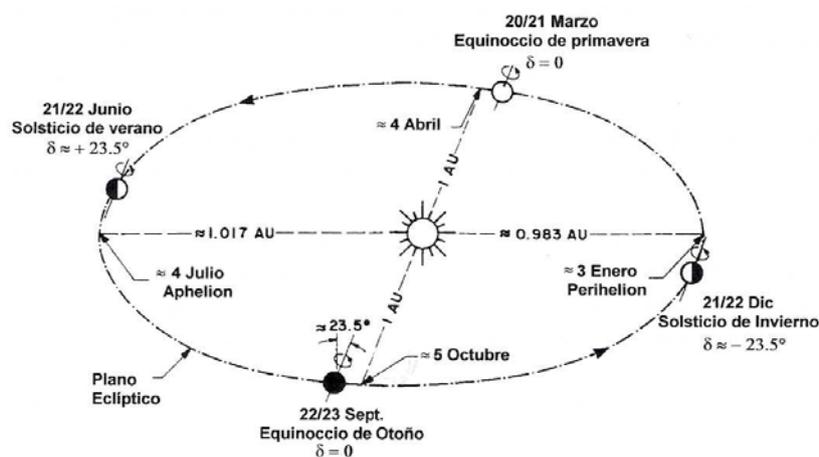


Figura 9. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol (Iqbal, 1983.)

El movimiento de rotación es aquel que realiza la Tierra sobre sí misma entorno a un eje imaginario que pasa por el Polo Norte y el Polo Sur. El tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta completa sobre sí misma es de 24 horas si tomamos como referencia al Sol, es decir, un día solar.

El eje de rotación terrestre no es perpendicular al plano eclíptico, sino que se encuentra inclinado un ángulo de $23^{\circ} 45'$ con respecto a la normal al plano de la eclíptica. Debido a esta inclinación del eje de la Tierra, la cantidad de radiación recibida en un punto de la superficie terrestre varía diariamente a lo largo del año dando lugar a los cambios estacionales. El ángulo formado entre el eje de rotación y el eje perpendicular a la eclíptica permanece constante a lo largo del tiempo, sin embargo, el ángulo formado entre el plano que contiene la órbita terrestre y el plano ecuatorial, denominado ángulo de declinación, varía a lo largo del año desde $+ 23^{\circ} 45'$ en el solsticio de verano hasta $-23^{\circ} 45'$ en el solsticio de invierno, tomando el valor de cero en los equinoccios de primavera y otoño. El ángulo de declinación para un día concreto se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$\alpha = 23,45 \cdot \text{sen} \left[\frac{284 + n}{365,25} \right]$$

donde n es el día del año de 1 a 365 para el que queremos conocer la declinación terrestre.

2.7.2. Posición del Sol en la bóveda celeste

Conocer cuál es la posición del Sol en la bóveda celeste nos permite calcular cuál es el ángulo de incidencia que forman los rayos solares con la superficie horizontal y cuál es la irradiación recibida en función de este ángulo. La posición del Sol varía según la hora, el día y la ubicación del observador sobre la superficie terrestre.

Para hallar la trayectoria solar, y por tanto, dónde se localiza el Sol en un instante dado, tenemos que definir primeramente la posición que ocupa el observador en la Tierra. Esta posición se calcula a partir del sistema de coordenadas geográficas, que es un sistema de referencia que emplea dos coordenadas angulares, la latitud y la longitud. La latitud se define como el ángulo que existe entre un punto situado en la superficie terrestre y la línea del ecuador, considerando como cero los puntos situados en la línea del ecuador y 90°N para el polo Norte y 90°S para el polo Sur. La longitud es la distancia angular que existe entre un punto y el meridiano que se tome como referencia. En la actualidad se toma el meridiano de Greenwich con valor cero grados como meridiano base a partir del cual se fijan las franjas horarias.

Una vez situado el observador, tenemos que determinar las coordenadas celestes, que en función del sistema de referencia seleccionado, nos proporcionará una serie de valores que situarán al Sol en la esfera celeste. El sistema de coordenadas seleccionado es el denominado coordenadas horizontales, que tienen como plano de referencia el horizonte del observador y como origen al propio observador (topocéntrico). Las coordenadas se definen a partir de dos distancia angulares como son el azimut y la altura o distancia cenital, según se refleja en la Figura 10.

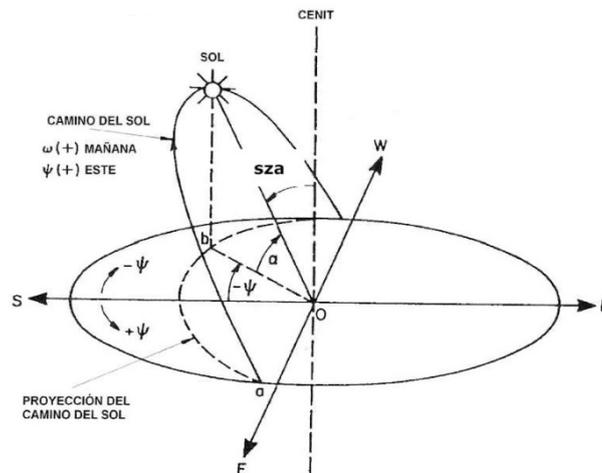


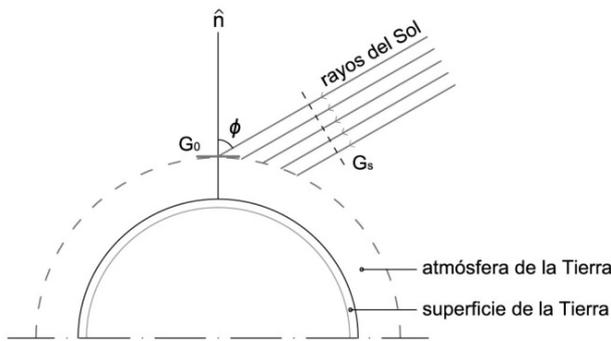
Figura 10. Sistema de coordenadas horizontales para determinar la posición del Sol en la bóveda celeste

- El azimut es el ángulo (Ψ) que forma el punto cardinal sur (hemisferio Norte) y la proyección vertical del Sol sobre el plano horizontal (b) que contiene el horizonte del observador para una latitud ya definida. El ángulo azimutal varía entre 0 y $\pm 180^\circ$ con valores positivos hacia el Este y negativos hacia el Oeste.
- La altura solar es el ángulo que forman los rayos solares con el plano horizontal que contiene al observador (α), y varía entre 0 y 90° coincidiendo el valor máximo con el cenit del observador. El ángulo formado por la dirección de los rayos solares y el cenit se nombra como ángulo cenital (sza).

2.7.3. La constante solar

La constante solar extraterrestre G_s es la energía solar que incide sobre una superficie situada en el borde exterior de la atmósfera y perpendicular a la dirección de los rayos del sol cuando la Tierra se encuentra a su distancia media. El valor de de la irradiancia solar total es de 1367 W/m^2 según el World Radiation Center (WRC). Si consideramos una superficie horizontal situada tangencialmente en el borde exterior de la atmósfera, el valor de la radiación G_0 incidente variará según el ángulo ϕ formado entre la dirección de los

rayos solares y la normal al plano horizontal considerado. Los valores de G_0 se obtienen a partir de la siguiente expresión:



$$G_0 = G_s \cdot \cos \phi \quad (W/m^2)$$

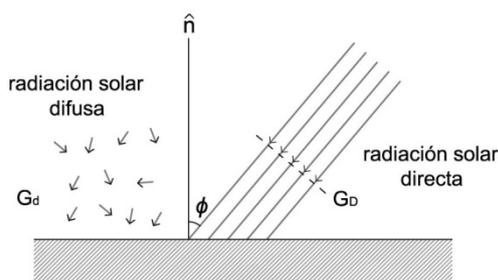
Figura 11.

2.7.4. Radiación solar sobre la superficie terrestre

La irradiación solar que recibe la superficie de la Tierra tiene un valor diferente a la constante solar extraterrestre, pues los rayos solares tienen que atravesar la atmósfera para poder llegar hasta la Tierra. Durante la travesía a través de la atmósfera, la radiación solar se ve afectada por fenómenos de absorción y reflexión, consecuencia de la presencia de las moléculas de aire, partículas en suspensión, agua en forma de nubes, y otros elementos que forman parte de la atmósfera. Esto produce que la radiación final que incide sobre el terreno este formada por dos componentes, la radiación directa y la radiación difusa:

- La parte de la radiación solar que llega a la superficie terrestre sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se llama radiación solar directa G_D .
- La radiación difusa es aquella que proviene desde todas las direcciones de la bóveda celeste de un modo uniforme. Esta formada por la radiación que proviene de las reflexiones producidas en la atmósfera junto con aquella que sufre reflexiones múltiples cielo-tierra.

La radiación solar incidente se obtiene a partir de la siguiente expresión:



$$G_{solar} = G_D \cdot \cos \phi + G_d \quad (W/m^2)$$

Figura 12. Radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra.

donde ϕ es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa con respecto a la normal al terreno, G_D es la radiación solar directa y G_d es la radiación difusa.

2.7.5. Transferencia de calor por radiación solar

La velocidad neta de transferencia de calor por radiación de una superficie expuesta a las radiaciones solar y atmosférica se determina en base a un balance de energía absorbida y emitida según se desarrolla a continuación:

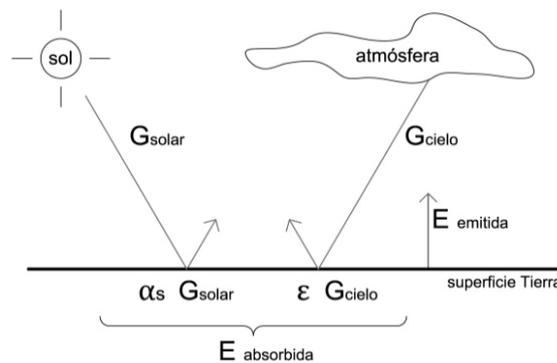


Figura 13. Energía solar absorbida por el terreno.

$$q_{neta,rad} = \sum E_{absorbida} - \sum E_{emitida}$$

$$q_{neta,rad} = E_{solar\ absorbida} + E_{cielo\ absorbida} - E_{emitida}$$

$$q_{neta,rad} = \alpha_s \cdot G_{solar} + \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{cielo}^4 - \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4$$

$$q_{neta,rad} = \alpha_s \cdot G_{solar} + \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{cielo}^4 - T_s^4)$$

donde, $q_{neta, rad}$ es la velocidad neta de transferencia de calor por radiación, α_s es la absorción de la superficie en función del material, G_{solar} es la irradiación solar incidente, σ es la constante de Stefan-Boltzman, T_{cielo} es la temperatura de la atmósfera en Kelvin, T_s es la temperatura de la superficie en Kelvin y ϵ es la emisividad a la temperatura ambiente.

Un valor positivo de la transferencia de calor por radiación indica una ganancia de calor de la superficie por radiación y uno negativo indica pérdida.

2.7.6. Medición de la radiación solar

Para medir cuál es la radiación solar a nivel de suelo existen diferentes instrumentos que dan valores para las diferentes componentes de la radiación solar recibida a lo largo del día, así tenemos:

- Heliógrafo, permite conocer cuál es el número de horas solares para un día seleccionado.
- Piranómetro, mide la radiación global.
- Piranómetro de difusa, mide la radiación difusa.
- Pirheliómetro, indica los valores de radiación directa.

Alejandro Soler March y Francisco Guardia Vial. El proyecto final construido del mercado, es una modificación fechada en 1914 del proyecto original que ganó el concurso.

Las obras de derribo se iniciaron en el año 1910 y se fueron dilatando en el tiempo debido a las dificultades existentes, finalmente el Mercado Central fue inaugurado en 1928.

El Mercado Central se caracteriza por el uso del lenguaje del modernismo junto con elementos historicistas y novecentistas, mientras que en los dos pabellones que flanquean el acceso principal están inspirados en el gótico centroeuropeo.

3.2. Características formales y constructivas

El pabellón usado para el desarrollo de este estudio, tiene una planta con forma rectangular y su número de alturas es de dos más planta baja. La cubrición se realiza con una cubierta a cuatro aguas que es intersectada centralmente por una segunda cubierta bajo la cual se sitúa el espacio analizado según se muestra en la figura 15. En la intersección de las proyecciones horizontales de las cumbreras de ambas cubiertas se ha situado un tragaluz, que exteriormente se manifiesta en una pequeña torre de vidrio y acero que remata verticalmente el conjunto edificatorio.

El cerramiento exterior del edificio se ha realizado con un muro de fábrica de ladrillo visto con aparejo flamenco y un espesor de un pie. Este muro cumple con las funciones estructural y de protección del espacio interior frente al exterior, también habría que añadir la función estética en relación al empleo del ladrillo para dar forma a las cornisas y diferentes relieves que aparecen en fachada, según se puede ver en el alzado este de la figura 15. También se ha empleado la piedra que aparece en planta baja como zócalo y refuerzo en las esquinas, además de definir el acceso principal.

Es necesario realizar una observación con respecto al espesor del muro, y es que en la fachada Este, existen varias franjas verticales que se corresponde con la posición de las ventanas, dónde el espesor del muro es de medio pie, por lo que se tendrá en cuenta esta circunstancia que influirá en los datos obtenidos.

La composición del muro que hemos analizado, tanto para el estado actual, se recoge gráficamente en la figura 15, dónde también se ha representado el alzado interior Este con la situación de las sondas empleadas para medir la temperatura superficial del cerramiento.

También se ha reflejado en la sección horizontal de la fachada Este la variación del espesor del cerramiento de un pie a medio pie.

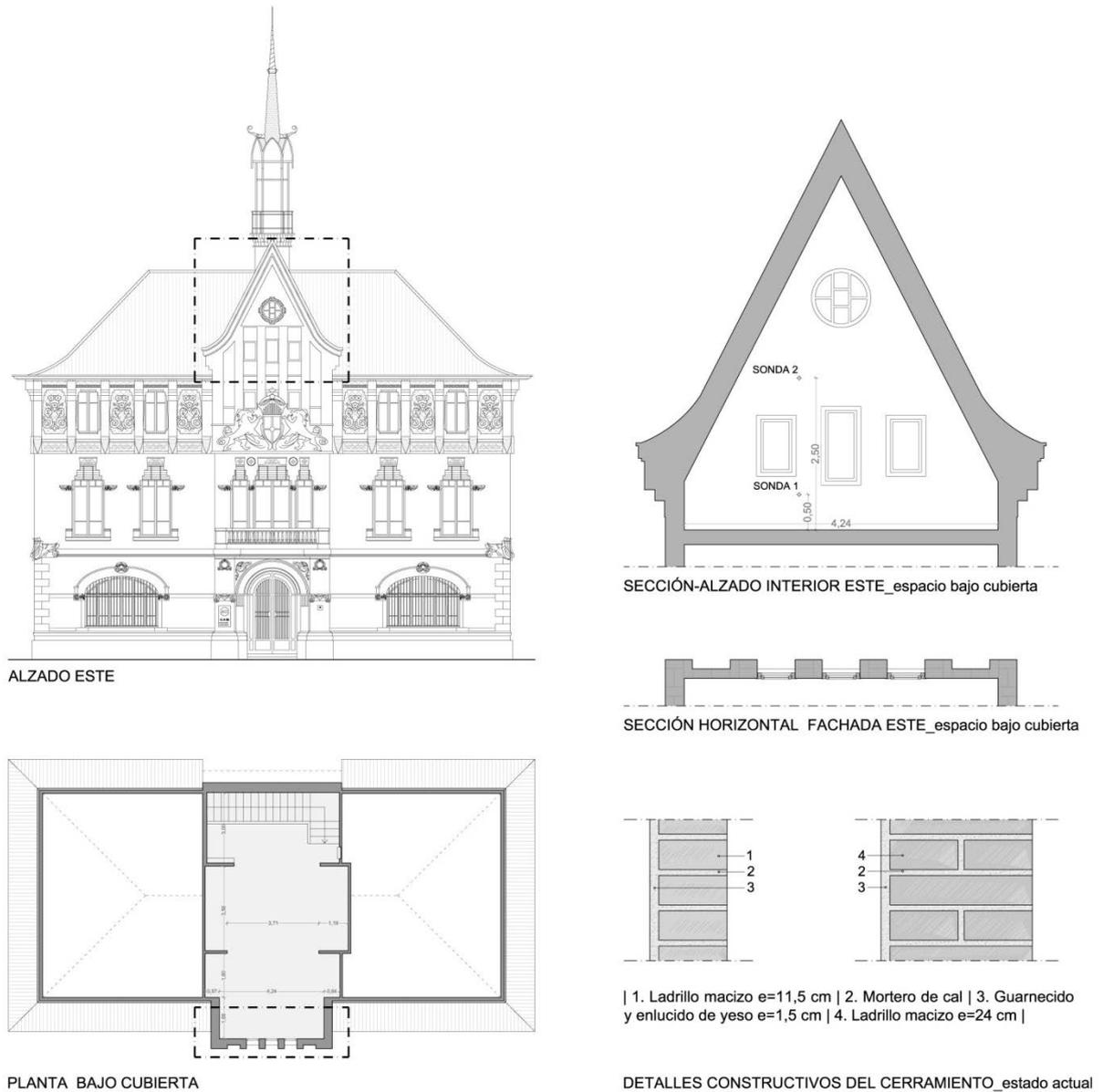


Figura 15. Información gráfica del edificio analizado donde se ha situado la localización de las sondas y el detalle constructivo del cerramiento evaluado.

La propuesta de mejora térmica del cerramiento se representa en la figura 16, donde se refleja la posición de cada una de las capas. El trasdosado interior del cerramiento se ha realizado con un sistema autoportante de placas de cartón yeso fijadas mecánicamente a una serie de perfiles en U de chapa de acero galvanizada separados 60 cm. y relleno entre los perfiles de lana de roca de espesor 45 mm.

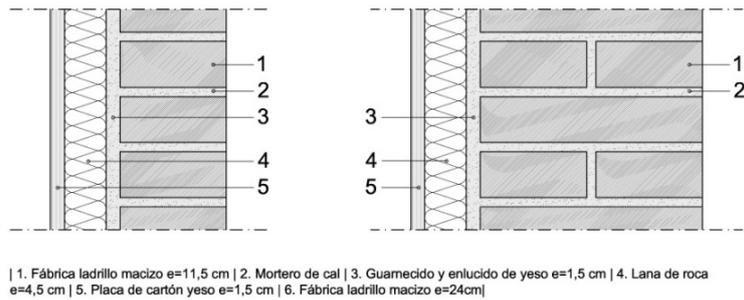


Figura 16. Composición del cerramiento en estado reformado

3.3. Estudio de sombras

Para el estudio de sombras se ha realizado una maqueta virtual del edificio y su entorno más próximo. Se ha utilizado el programa SketchUp para crear la maqueta, según se muestra en la figura 17, y analizar si se proyectan sombras sobre la superficie de fachada analizada. Este estudio nos permite comprobar si el edificio recibe radiación solar directa, porque en el caso de que haya sombras, la radiación incidente se obtendrá a partir de la diferencia entre la radiación global y la radiación directa, es decir, será la radiación difusa.

Para comprobar la existencia de sombras se ha tenido en cuenta aquellas que son generadas por el propio edificio, debidas a la presencia de la cornisa y las variaciones en profundidad de la fachada. También se ha considerado las sombras producidas por los edificios de su entorno, árboles u otros elementos.

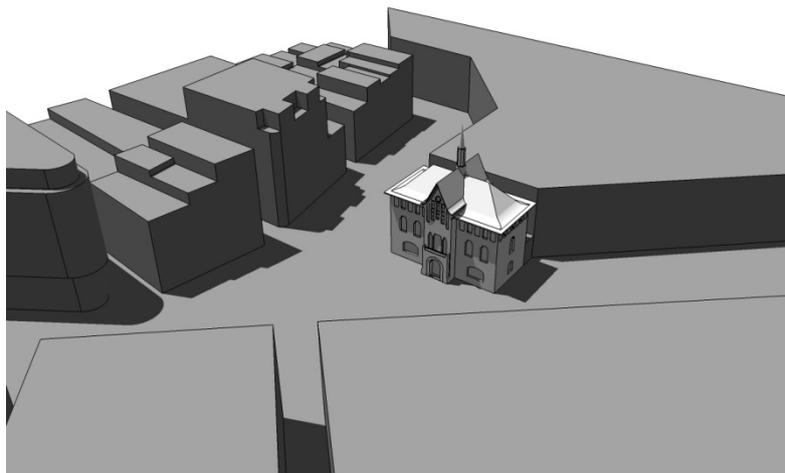


Figura 17. Maqueta virtual del edificio y del entorno.

Una vez que se ha levantado virtualmente en tres dimensiones el edificio y su entorno, se han introducido los datos de latitud y la situación de la dirección Norte, para a continuación seleccionar el mes y el día, que para nuestro caso es el uno de junio, por estar situado el sol a una menor altura. Finalmente, se comprueba como varían las sombras a lo largo del día, dando como resultado, que no hay sombras arrojadas sobre la fachada Este desde el entorno. Sin embargo, se obtuvo que a partir de las 13:00 horas, que los relieves de la fachada y la cornisa proyectaban sombras sobre la posición en la que se situaban las sombras, según se muestra en la figura 18.

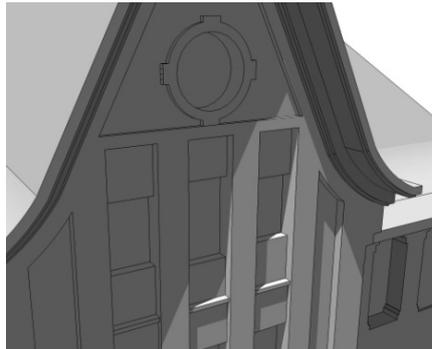


Figura 18. Proyección de las sombras sobre la fachada Este a partir de las 13:00 horas.

4. MODELO Y SIMULACIÓN DE LA FACHADA

4.1. Modelo físico y matemático

La modelización del comportamiento térmico de la fachada consiste en definir un sistema de ecuaciones algebraicas que permitan conocer la temperatura en unos puntos concretos (nodos) en función del tiempo.

Para el desarrollo del modelo hemos tenido en cuenta las siguientes hipótesis de partida:

- Transferencia unidimensional
- Régimen transitorio
- Variables termofísicas constantes (C_p , $k = \text{cte}$).
- No existe fuente interna que genere calor.
- Conservación de la energía dentro del sistema.

Para definir el modelo, empleamos el método de las diferencias finitas para un sistema de transferencia de calor transitorio unidimensional, ya visto en el capítulo 2. Los pasos a seguir para aplicar este método y obtener un sistema de ecuaciones, son los siguientes:

- Definir los límites del dominio, el volumen de control y la posición de los nodos x_i .
- Fijar la variable temporal, para lo cuál definimos un periodo de tiempo Δt .
- Establecer las condiciones de contorno, y formular las ecuaciones.

4.1.1. Límites del dominio y nodos

Se ha seleccionado para el análisis térmico el cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo. Primero definimos cuál es el volumen de control, que en este caso se corresponde con un muro de fábrica de ladrillo de medio pie de espesor. A continuación dividimos el espesor del cerramiento en tres partes, obteniendo cuatro puntos de control, o nodos. Esto permite tener dos nodos en el interior del cerramiento y un nodo en cada superficie del cerramiento, siendo la distancia entre nodos:

$$\Delta x = \frac{L}{N - 1} = \frac{0,255}{5 - 1} = 0,0637 \text{ m}$$

Finalmente, limitamos nuestro ámbito de actuación, para lo cual, fijamos dos nodos en el ambiente exterior y interior para establecer las condiciones de temperatura de éstos, según se muestra en la figura 19.

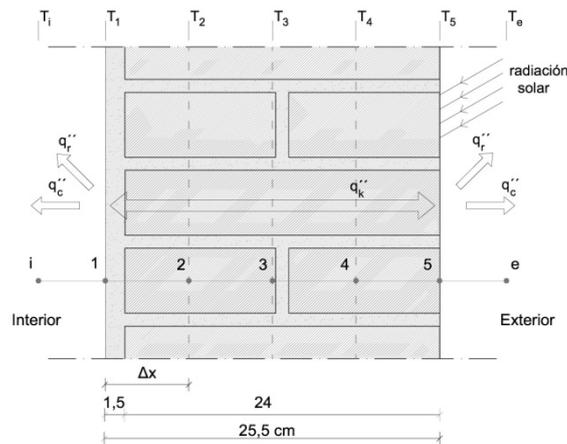


Figura 19. Posición de los nodos en el cerramiento de un pie de fábrica.

4.1.2. Variable temporal

El intervalo de tiempo seleccionado es de 10 minutos, por ser éste el periodo que transcurre entre una medición y la siguiente de los datos recogidos "in situ" y en la estación meteorológica.

A la hora de fijar este intervalo temporal hay que tener en cuenta, que si es superior a un determinado límite, se producirán oscilaciones crecientes en la solución. De modo que para reducir los errores se ha de cumplir que:

$$F_0 < \frac{1}{2}; \quad F_0 \equiv \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}$$

siendo: F_0 : número de Fourier
 α : difusividad térmica
 Δt : intervalo temporal
 Δx : distancia entre nodos

Para nuestro caso, tenemos:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{0,92}{1900 \cdot 1000} = 4,84 \cdot 10^{-7} m^2/s; \quad \Delta t = 600s$$

$$F_0 \equiv \frac{4,84 \cdot 10^{-7} \cdot 600}{0,0637^2} = 0,071 < \frac{1}{2}$$

Por lo tanto se cumple con la restricción para reducir el error de la solución.

4.1.3. Condiciones de contorno y ecuaciones del sistema

A la hora de definir cada una de las ecuaciones, tenemos que analizar el balance energético de cada nodo, y cumplir el principio de conservación de la energía. De modo general, decimos que la energía que entra tiene que ser igual a la que sale. También tenemos que tener en cuenta a la hora de hacer el balance energético, la capacidad de almacenamiento de energía por parte del cerramiento y si existe la posibilidad de que éste genere energía internamente. La expresión que define este balance energético es la siguiente:

$$E_{ent} + E_{gen} - E_{sal} = E_{alm}$$

donde, los términos de la expresión significan energía entrante, energía generada, energía saliente y energía almacenada respectivamente.

Tomando como punto de partida la ecuación obtenida en el apartado 2.6.5. (análisis numérico de la conducción), vamos a definir las diferentes condiciones de contorno para cada nodo y obtener cuál es la temperatura para el instante $t_{m+1} = t_m + \Delta t$, para lo que tenemos que conocer los valores de las temperaturas para el instante previo t_m . En la anterior figura 19, se muestra la posición de los nodos y los modos de transferencia de calor que afectan a éstos.

En la definición del balance energético para cada nodo, se ha considerado que el nodo se encuentra a una temperatura mayor con respecto a su entorno, produciéndose una pérdida de energía calórica. Éste sentido de la dirección del calor se ha tomado con signo negativo. A continuación, vamos a definir la ecuación del equilibrio térmico para cada uno de los nodos:

a) Ecuación nodo 1

El nodo uno se sitúa en la superficie interior del cerramiento, y las condiciones de contorno que tenemos que añadir son el flujo de calor por convección y radiación.

La temperatura para el nodo uno en el instante $t+\Delta t$ se obtiene:

$$\frac{m_1 \cdot \Delta T_1}{\Delta t} = -q_{r1} - q_{c1} - q_{k2-1}$$
$$T_{1,t+\Delta t} - T_{1,t} = \frac{\Delta t}{m_1} \left[-\varepsilon\sigma(T_{1,t}^4 - T_{i,t}^4) - h_{ci}(T_{1,t} - T_{i,t}) - k \frac{T_{1,t} - T_{2,t}}{\Delta x} \right]$$
$$T_{1,t+\Delta t} = T_{1,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_{1-2}} \left[-\varepsilon\sigma(T_{1,t}^4 - T_{i,t}^4) - h_{ci}(T_{1,t} - T_{i,t}) - k \frac{T_{1,t} - T_{2,t}}{\Delta x} \right]$$

b) *Ecuación nodo 2*

El nodo dos se encuentra situado en el interior del cerramiento, y únicamente tenemos que considerar la transferencia de calor por conducción y la velocidad de almacenamiento de calor para el espesor de muro que va del nodo uno al tres. La temperatura en el nodo 2 para el instante $t+\Delta t$ se obtiene:

$$\frac{m_2 \cdot \Delta T_2}{\Delta t} = -q_{k2-1} - q_{k2-3}$$
$$T_{2,t+\Delta t} - T_{2,t} = \frac{\Delta t}{m_2} \left[-k \frac{T_{2,t} - T_{1,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{2,t} - T_{3,t}}{\Delta x} \right]$$
$$T_{2,t+\Delta t} = T_{2,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_2} \left[-k \frac{T_{2,t} - T_{1,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{2,t} - T_{3,t}}{\Delta x} \right]$$

c) *Ecuación nodo 3*

Al igual que para el nodo dos, sólo tenemos que considerar la transferencia por conducción, por lo que la ecuación queda como sigue:

$$\frac{m_3 \cdot \Delta T_3}{\Delta t} = -q_{k3-2} - q_{k3-4}$$
$$T_{3,t+\Delta t} - T_{3,t} = \frac{\Delta t}{m_3} \left[-k \frac{T_{3,t} - T_{2,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{3,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$
$$T_{3,t+\Delta t} = T_{3,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_3} \left[-k \frac{T_{3,t} - T_{2,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{3,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

d) *Ecuación nodo 4*

El nodo cuatro se ve afectado por fenómenos de conducción, por lo que la ecuación queda como sigue:

$$\frac{m_4 \cdot \Delta T_4}{\Delta t} = -q_{k4-3} - q_{k4-5}$$
$$T_{4,t+\Delta t} - T_{4,t} = \frac{\Delta t}{m_4} \left[-k \frac{T_{4,t} - T_{3,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{4,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$
$$T_{4,t+\Delta t} = T_{4,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_4} \left[-k \frac{T_{4,t} - T_{3,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{4,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$

e) Ecuación nodo 5

El nodo cinco se corresponde con la superficie exterior del cerramiento, y las condiciones de contorno a añadir son la radiación solar que recibe el cerramiento y que a diferencia del resto de flujos tendrá un sentido positivo, y el flujo de calor por convección y radiación. Así tenemos que la temperatura para el instante $t+\Delta t$ se obtiene como sigue:

$$\frac{m_5 \cdot \Delta T_5}{\Delta t} = I_{solar} - q_{r5} - q_{c5} - q_{k5-4}$$
$$T_{5,t+\Delta t} - T_{5,t} = \alpha_s G_{solar} - \varepsilon \sigma (T_{5,t}^4 - T_{e,t}^4) - h_{ce} (T_{5,t} - T_{e,t}) - k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x}$$
$$T_{5,t+\Delta t} = T_{5,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_5} \left[\alpha_s I_{solar} - \varepsilon \sigma (T_{5,t}^4 - T_{e,t}^4) - h_{ce} (T_{5,t} - T_{e,t}) - k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

Una vez obtenidas las ecuaciones que definen la temperatura de cada uno de los nodos identificamos las variables y los términos independientes, y cuál va a ser la procedencia de sus valores. A continuación se recoge el valor de los términos independientes y que no han sido definidos anteriormente:

- Temperatura ambiente exterior (T_e)	Estación meteorológica
- Temperatura ambiente interior (T_i)	Medición in situ
- Calor específico materiales (c_p)	Tablas CTE
- Densidad materiales (ρ)	Tablas CTE
- Radiación solar (I_{solar})	Estación meteorológica + cálculo
- Emisividad de la superficie exterior (ε)	Tablas
- Absortividad de la superficie exterior (α_s)	Tablas
- Coeficiente de convección exterior (h_{ce})	Estación + cálculo / Valores CTE
- Coeficiente de convección interior (h_{ci})	Medición in situ / Valores CTE

4.2. Toma y tratamiento de datos

En este punto vamos a explicar cuál es el origen de los datos de partida, y si es necesario un tratamiento para adaptarlos a las características del presente trabajo. Los datos dependientes de la variable temporal no pertenecen únicamente al mes de junio, pues es necesario realizar un ajuste previo de la fórmula, por lo que se ha recopilado información

referida a las dos últimas semanas del mes de mayo para determinar la temperatura en todos los nodos para el instante inicial t_0 .

4.2.1. Datos estación meteorológica

La estación meteorológica situada en el aeropuerto de Manises, en Valencia, ha sido utilizada para recabar los siguientes datos:

- Temperatura exterior en grados centígrados.
- Velocidad del viento en Km/h.
- Dirección del viento según la rosa de los vientos.
- Radiación solar en W/m^2 .

Los datos recogidos son aquellos que se encuentran en el intervalo temporal que va desde el día 06/05/2011 a las 11:20 horas, hasta el día 07/07/2011 a las 11:30 horas.

El intervalo de las mediciones se realiza cada 10 minutos y las horas dadas están referidas a la hora local (HL), siendo ésta la de Valencia.

En aquellos intervalos en los que no se haya registrado un dato, éste se calculará aplicando la función pronóstico, que emplea una regresión lineal de ajuste.

4.2.2. Toma de datos "in situ"

En el espacio bajo cubierta habitable empleado para el desarrollo de este trabajo, se han colocado cuatro sondas para medir la temperatura superficial interior de la fachada Este y la temperatura ambiente interior, según se muestra en la figura 21.

Cada una de las sondas proporciona tres medidas de temperatura en grados centígrados a intervalos de 10 minutos. El periodo en el que se ha realizado la medición va desde el día seis de mayo de 2011 a las 11:20 horas, hasta el día siete de julio de 2011 a las 11:30 horas. Las dos sondas que miden la temperatura superficial se sitúan a la distancia con respecto al suelo de 0,50 m y 2,50 m, y las dos sondas situadas en el espacio interior están a una altura de 0,70 m apoyadas sobre una mesa.



Figura 20. Situación de las sondas. En la primera imagen, las sondas toman datos de la superficie interior de la fachada, y en la segunda las sondas miden la temperatura ambiente.

Los datos de temperaturas se recogían una vez a la semana siendo descargados de las memorias de las cajas de registro a un ordenador portátil. El archivo final que obtenemos se encuentra en formato .CSV (delimitado por comas), que puede ser leído con el programa Excel.

Los valores de temperatura se organizan en una tabla donde en las filas se indica la variable temporal, mientras que en las columnas tenemos las seis posiciones (tres por cada sonda) en las que se han tomado temperaturas, según el ejemplo de la tabla 4.

Tabla 4. Ejemplo datos de temperatura en °C obtenidos en la medición in situ.

Mes	Día	Hora	Minuto	Temperatura sonda 1			Temperatura sonda 2		
				T1	T2	T3	T4	T5	T6
6	10	18	00	28,98	29,93	28,29	27,30	27,27	28,73
6	10	18	10	28,93	28,88	28,54	27,40	27,27	28,78
6	10	18	20	28,93	28,83	28,29	27,35	27,17	28,68
6	10	18	30	28,93	28,78	28,34	27,25	27,27	28,68
6	10	18	40	28,83	28,88	28,34	27,30	27,32	28,68
6	10	18	50	28,93	28,93	28,29	27,35	27,32	28,73

Los datos medidos in situ van a ser tratados estadísticamente para eliminar aquellos valores que distorsionen los resultados, de modo que se va a calcular la desviación típica y la mediana de los valores de temperatura para cada una de las sondas, diferenciando entre intervalos temporales. El valor de desviación típica límite empleado es $\sigma=0,4$. Todas aquellas temperaturas que superen este límite en comparación con el valor de la mediana serán desechados.

Una vez realizado el tratamiento estadístico se calculará el valor promedio para cada intervalo temporal, según muestra en el ejemplo de la tabla 5, dónde tenemos tres valores de temperatura superficial para las alturas 0,5m y 2,5m, y para la temperatura ambiente seis valores.

Tabla 5. Ejemplo de obtención de las temperatura promedio.

Mes	Día	Hora	Temperatura sonda 1			Mediana	Temperatura sonda 1'			Promedio temperatura
			T1	T2	T3		T1'	T2'	T3'	
6	10	18:00	28,98	29,93	28,29	28,98	28,98	28,93	-	28,96
6	10	18:10	28,93	28,88	28,54	28,88	28,93	28,88	28,54	28,78
6	10	18:20	28,93	28,83	28,29	28,83	28,93	28,83	-	28,88
6	10	18:30	28,93	28,78	28,34	28,78	28,93	28,78	-	28,86
6	10	18:40	28,83	28,88	28,34	28,83	28,83	28,88	-	28,86
6	10	18:50	28,93	28,93	28,29	28,93	28,98	28,93	-	28,96

A continuación se recogen las temperaturas empleadas en el presente trabajo y cuál va a ser su función:

- Temperatura promedio superficial H=0,5 m (ajuste y comparación con el modelo).
- Temperatura promedio superficial H=2,5 m (ajuste y comparación con el modelo).
- Temperatura promedio ambiente (simulación).

4.2.3. Datos radiación solar programa PVGIS

Los valores de radiación solar obtenidos a partir de las mediciones realizadas por la estación meteorológica están referidas a una superficie horizontal y son valores de radiación global.

Para estimar la radiación real que incide sobre la fachada, es preciso tener en cuenta que ésta forma un ángulo de 90° con respecto al plano horizontal y que está orientada hacia el Este, con lo cual, vamos a emplear la base de datos de PVGIS. Este programa nos permite obtener la irradiancia global estimada cada 15 minutos de un día típico del mes elegido, considerando la orientación y ángulo de inclinación de la fachada.

En nuestro caso, se han obtenido datos de irradiación global directa con cielo despejado, difusa y reflejada, en los meses de mayo, junio y julio, para las situaciones de un elemento colocado en posición horizontal y otro en posición vertical. Además es necesario introducir los siguientes datos:

- Localización edificio: Valencia (39°28'16''N, 0°22'39''O).
- Orientación fachada: 85° (Este)

A la hora de usar toda esta información, es necesario tener en cuenta una serie de observaciones, como que el intervalo que transcurre entre una medición y la siguiente es de 1/4 de hora en el sistema centesimal, y que el tiempo se mide con respecto al Meridiano

de Greenwich, según se muestra en el tabla 6 como ejemplo de los datos recogidos del PVGIS.

Tabla 6. Irradiancia para la orientación Este y un ángulo de 90° sobre la horizontal.

Hora	Irradiación mes de junio				
	Global cielo claro	Global	Directa	Difusa	Reflejada
4.88	58	46	28	16	2
5.12	125	99	58	38	3
5.38	204	160	96	59	5
5.62	282	219	135	77	8
5.88	354	275	172	93	10
6.12	420	326	206	108	12
6.38	478	371	236	120	15
6.62	529	410	284	131	18

El primero de los pasos que tenemos que realizar para poder utilizar la información es cambiar el sistema de medición temporal, es decir, tenemos que cambiar las horas adaptándolas al proyecto según se recoge en el ejemplo de la tabla 7, para lo que realizaremos los siguientes pasos:

- a) Convertir los minutos centesimales en sexagesimales.
- b) Corregir las horas para tener el Horario Local (HL), pues en PVGIS está medido con respecto al Tiempo Universal (TU), de modo que:

Horario de verano HL=TU + 2 horas

Horario de invierno HL=TU + 1 horas

Tabla 7. Ejemplo de conversión de horas de Tiempo Universal a Hora Local.

Horas								
TU	4.88	5.12	5.38	5.62	5.88	6.12	6.38	6.62
HL	6:52	7:07	7:22	7:37	7:52	8:07	8:22	8:37

Una vez corregido el sistema horario, comprobamos que las mediciones se realizan cada 15 minutos, y que su inicio horario no coincide con el cambio de una hora a la siguiente, es decir, que en lugar de empezar a las 7:00 horas se comienza a las 7:07 horas. Para el presente trabajo se ha seleccionado un intervalo de 10 minutos que comienza a contar a las horas enteras.

Si seleccionamos la medición realizada durante una hora, comprobamos que el número de valores disponibles para el intervalo de 15 minutos es de cuatro, mientras que para el intervalo de 10 minutos son necesarios seis valores, es decir, falta información. Para

corregir esta situación, lo primero que vamos a hacer es identificar dos columnas horarias una para cada intervalo, y a continuación calculamos con la función pronóstico (en una tabla de Excel), los nuevos valores de irradiación, según se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Ejemplo de cálculo de la Irradiación a intervalos de 10 minutos.

Hora intervalo 15 min	Irradiación PVGIS (W/m ²)			Hora intervalo 10 min	Irradiación modificada (W/m ²)		
	Global cielo claro	Difusa	Reflejada		Global cielo claro	Difusa	Reflejada
				6:50	41	13	1
6:52	58	16	2				
				7:00	91	27	2,5
7:07	125	38	3				
				7:10	142	40	3,8
				7:20	190	55	6,5
7:22	204	59	5				
				7:30	241	67	6,5
7:37	282	77	8				
				7:40	291	79	8
				7:50	339	90	9,5
7:52	354	93	10				
				8:00	383	99	11

Estos últimos valores hallados serán los empleados para el cálculo de la irradiancia solar estimada en el apartado 4.3.

4.2.4. Características de los materiales

Las características de los diferentes materiales se han obtenido a partir del Catálogo de Elementos Constructivos del CTE. Los datos recogidos son la densidad (ρ), el coeficiente de transmisión térmica (k) y el calor específico (c_p), que se recogen en la tabla 9.

Tabla 9. Características de los materiales.

Características materiales			
	ρ	k	C_p
	kg / m ³	W / m·k	J/ kg·K
Ladrillo macizo	2300	0,85	1000
Mortero de cal	1900	1,3	900
Placa yeso	800	0,25	1000
Enlucido yeso	1000	0,57	1000
Lana mineral	70	0,034	840
Un pie de fábrica de ladrillo	2170	1,20	1000

4.3. Cálculo radiación solar incidente

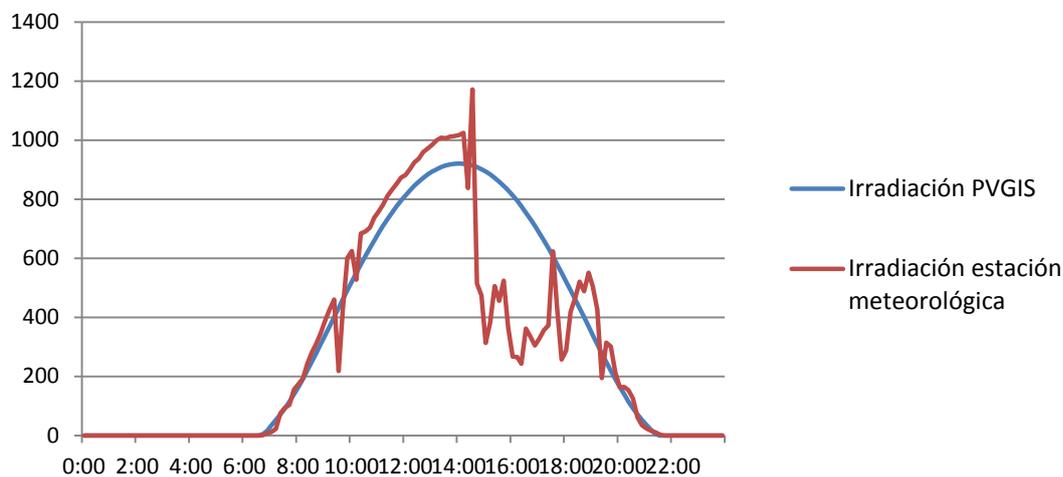
Para estimar la radiación solar que recibe la fachada, tenemos que aplicar un coeficiente corrector a los datos obtenidos de la estación meteorológica. Este coeficiente permite tener en cuenta el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie de cálculo, en función de la inclinación de ésta con respecto al plano horizontal.

El coeficiente corrector (γ_I) se obtiene a partir de la relación entre la irradiación horizontal medida en la estación meteorológica ($I_{0,estación}$) y la irradiación horizontal dada en PVGIS ($I_{0,PVGIS}$), de modo que la expresión resultante es:

$$\gamma_I = \frac{I_{0,estación}}{I_{0,PVGIS}}$$

En la gráfica 1 se puede ver las variaciones de irradiación real a lo largo de un día del mes de junio que existen para una superficie horizontal, en comparación con la irradiación ideal medida para un día típico del mes de junio. Esta variabilidad entre una curva y otra es la relación que hallamos con el coeficiente de corrección γ_I .

Gráfica 1. Comparación entre la irradiancia sobre una superficie horizontal para un día ideal y el día uno del mes de junio. En abscisas el tiempo en horas y en ordenadas la irradiación en W/m^2 .

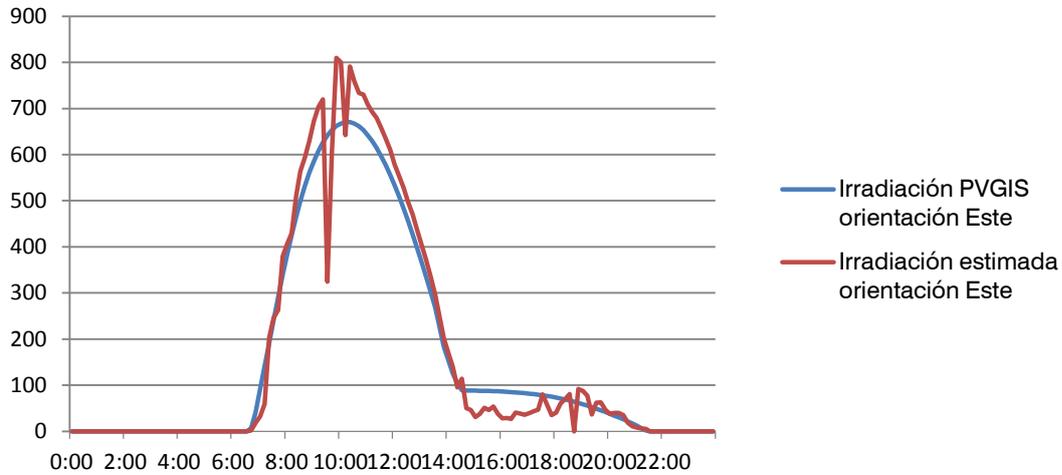


El cálculo de la irradiación estimada para la fachada ($I_{90,E,est}$) orientada al Este es igual al producto entre el coeficiente (γ_I) y la irradiación obtenida en PVGIS ($I_{90,E,PVGIS}$) para un elemento que forma un ángulo recto con la superficie horizontal y está orientado al Este. La irradiancia estimada se obtiene como sigue:

$$I_{90,E,est} = \gamma_I \cdot I_{90,E,PVGIS}$$

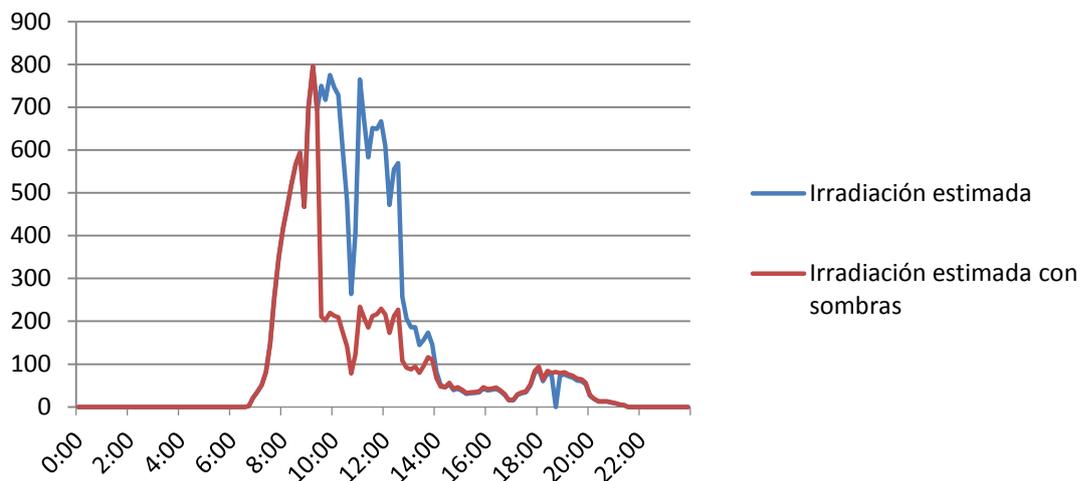
Como se puede ver en la gráfica 2, la irradiación idealizada presenta una forma de parábola continua, mientras que en la representación de la irradiación estimada podemos ver como existen saltos entre los valores a lo largo del tiempo reflejando la variabilidad que existe en la irradiación real. Estas desviación de la irradiación estimada con respecto a la irradiación del PVGIS son las que introduce el coeficiente (γ_I).

Gráfica 2. Comparación entre la irradiancia sobre la fachada orientada al Este para un día ideal y el día uno del mes de junio. En abscisas el tiempo en horas y en ordenadas la irradiancia en W/m^2 .



Por último, es necesario tener en cuenta las sombras que afectan al área analizada, porque si un punto no recibe radiación solar directa por estar en sombra, el valor de la irradiancia es igual al de la radiación indirecta. En la gráfica 3, se representa el descenso de los valores de irradiancia en un punto afectado por las sombras, que pare este caso, las sombras aparecen a las 9:30. Se ha producido una brusca caída si comparamos los valores de irradiancia estimada con los de irradiancia estimada con sombras.

Gráfica 3. Comparación de la irradiancia estimada diferenciando entre la existencia o no de sombras en la fachada en el día tres de junio. En abscisas el tiempo en horas y en ordenadas la irradiancia en W/m^2 .



4.4. Cálculo del coeficiente de convección

Los coeficientes de convección que vamos a emplear son de dos tipos en función de si el valor que adoptan es variable o constante en el tiempo.

Los valores constantes se obtienen a partir de la tabla E.1 del CTE HE, donde para cerramientos verticales con flujo de calor horizontal y en contacto con el aire exterior, tenemos que la resistencia térmica superficial es:

- Interior: $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Exterior: $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

siendo el coeficiente de convección combinado (convección + radiación) el inverso de la resistencia térmica superficial según la siguiente expresión:

$$h_{cr} = \frac{1}{R_s}$$

El cálculo del coeficiente de convección variable en el tiempo se explica en los dos puntos siguientes, diferenciando entre interior y exterior.

4.4.1. Coeficiente de convección interior h_{ci}

En la selección del método de cálculo del coeficiente de convección interior se ha tenido en cuenta cuáles son los datos disponibles, que para este caso son las temperaturas de la superficie interior del cerramiento y del ambiente interior. También se ha considerado que el tipo de convección es natural o libre.

Para el cálculo del coeficiente de convección natural se han utilizado las fórmulas simplificadas basadas en el método de cálculo de Nüsselt ((American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Refrigerating and Air-Conditions Engineers 1983) p 2.12), por ser la superficie de cálculo plana y el fluido aire.

Así, para placas verticales con flujo de calor horizontal tenemos:

- Régimen laminar: $10^4 < (Gr \cdot Pr) < 10^9$

$$h_c = 1,22 \cdot (\Delta T / L)^{1/4} \cdot 1,16 = 1,42 \cdot (\Delta T / L)^{1/4} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

- Régimen turbulento: $(Gr \cdot Pr) > 10^9$

$$h_c = 1,13 \cdot (\Delta T)^{1/3} \cdot 1,16 = 1,31 \cdot (\Delta T)^{1/3} \text{ (W/m}^2\text{K)}$$

siendo L la dimensión vertical en metros.

El límite entre el flujo laminar y turbulento se obtiene a partir del producto adimensional de los números Grashof y Prandtl que para el aire es $(Gr \cdot Pr) = 1,6 \times 10^6 L^3 (\Delta T)$.

4.4.2. Coeficiente de convección exterior h_{ce}

El coeficiente de convección exterior se calcula a partir de la relación que existe entre el coeficiente de transporte de calor h y la velocidad del viento, y viene dado por la siguiente expresión:

$$h_{ce} = 5,7 + 3,8v$$

donde v es la velocidad del viento expresada en m/s.

A la hora de aplicar esta fórmula, siempre que se busque un valor concreto, es necesario tener en cuenta cuál es el ángulo de incidencia del viento sobre la superficie considerada.

4.5. Cálculo conductancia y masa térmica del cerramiento

La conductancia y la masa térmica del cerramiento influyen de modo directo en la velocidad de transferencia de calor por conducción, y dependen de las propiedades de los materiales.

Para el cálculo de la conductancia tenemos que definir cuáles son las resistencias térmicas y como están conectadas, en serie o en paralelo, según se muestra en la figura 22. Una vez definido el esquema del circuito térmico, tenemos que calcular el valor de cada una de las resistencias a partir de la expresión general:

$$R_k = \frac{L}{A \cdot k}$$

Donde para nuestro caso, la superficie A es igual a un metro cuadrado (por estar calculando la resistencia unitaria), L es igual al valor de Δx siempre que el material permanezca constante en todo el espesor, y k es la conductividad térmica del material.

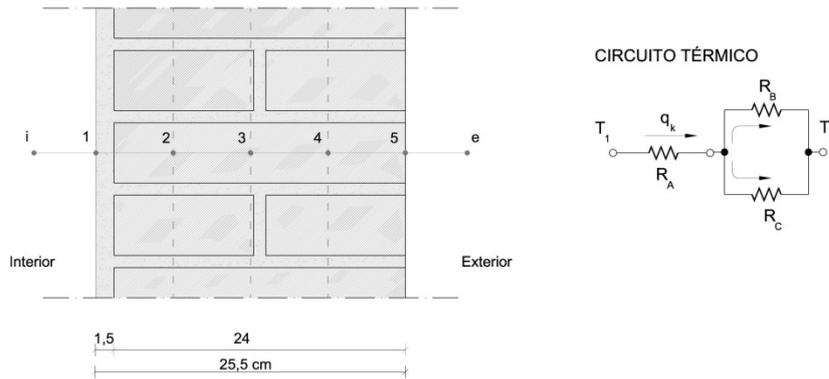


Figura 21. Circuito térmico asociado a un muro de fábrica de ladrillo.

En la figura 22, las resistencias reflejadas en el circuito térmico se corresponden como sigue, R_A resistencia de la capa de guarnecido y enlucido de yeso, R_B resistencia del ladrillo macizo y R_C resistencia de la junta de mortero de cal. Los valores de las resistencias se obtienen a partir de las siguientes expresiones:

$$R_A = \frac{e_{yeso}}{k_{yeso}} ; R_B = \frac{e_{ladrillo}}{k_{ladrillo}} ; R_C = \frac{e_{mortero}}{k_{mortero}}$$

Las resistencias colocadas en paralelo R_B y R_C se pueden reducir a una única resistencia R_{BC} , que será la resistencia de la fábrica de ladrillo. Como los valores de la constante de conductividad térmica para una fábrica de ladrillo están tabulados en el CTE, no se procederá al cálculo de las resistencias de cada uno de los materiales por separado, sino que se empleará el coeficiente dado en la normativa, y adoptará el valor recogido en la tabla 9.

Una vez obtenido el coeficiente de conductividad de la fábrica de ladrillo, procedemos a calcular el valor de la conductancia térmica entre nodos, teniendo en cuenta que la conductancia es igual a la inversa de la resistencia térmica:

- Conductancia nodo 1-2

$$R_{1-2} = R_A + R_{BC}$$

$$R_{1-2} = \frac{e_A}{k_A} + \frac{e_{BC}}{k_{BC}} = \frac{0,015}{0,6} + \frac{0,06375 - 0,015}{1,20} = 0,055 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$K_{1-2} = \frac{1}{R_{1-2}} = 18,17 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

- Conductancia nodo 2-3 y 3-4

$$R_{2-3} = R_{3-4} = R_{4-5} = R_{BC}$$

$$R_{2-3} = R_{3-4} = R_{4-5} = \frac{e_{BC}}{k_{BC}} = \frac{0,06375}{0,93} = 0,046 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$K_{2-3} = K_{3-4} = K_{4-5} = \frac{1}{R_{2-3}} = 21,67 \text{ W}/^\circ\text{C}$$

Por último, tenemos que calcular la capacidad térmica de cada intervalo entre nodos, para lo cual emplearemos la fórmula:

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{e_i}$$

- Masa térmica nodo 1-2

$$C_{1-2} = (\rho_y \cdot c_{p_y} \cdot e_y) + (\rho_f \cdot c_{p_f} \cdot e_f) = (1000 \cdot 1200 \cdot 0,015) + (2170 \cdot 1000 \cdot 0,04875)$$

$$C_{1-2} = 123787 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

- Masa térmica nodo 2-3, 3-4 y 4-5

$$C_{2-3} = C_{3-4} = C_{4-5} = \rho_f \cdot c_{p_f} \cdot e_f = 2170 \cdot 1000 \cdot 0,06375$$

$$C_{2-3} = C_{3-4} = C_{4-5} = 138337 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

El valor de masa térmica que vamos a introducir en el modelo, depende del nodo en el que estamos calculando la temperatura, por lo que a continuación se recoge cuales son las relaciones entre la masa térmica y el nodo considerado:

- Nodo 1 $m_1 = C_{1-2}/2$
- Nodo 2 $m_2 = C_{1-2}/2 + C_{2-3}/2$
- Nodo 3 $m_3 = C_{2-3}/2 + C_{3-4}/2$
- Nodo 4 $m_4 = C_{3-4}/2 + C_{4-5}/2$
- Nodo 5 $m_5 = C_{4-5}/2$

4.6. Validación y ajuste del modelo

Una vez que hemos recopilado y calculado los datos necesarios de entrada, procedemos a introducir las ecuaciones en una tabla Excel para resolver el sistema mediante el proceso denominado "paso a paso", que para este caso en concreto, consiste en conocer todos los valores de temperatura en cada uno de los nodos en el instante previo t_0 , para poder hallar el nuevo valor de temperatura para el instante $t_0 + \Delta t$. Este proceso de cálculo se repite hasta completar todo el periodo de tiempo seleccionado para el análisis, que va desde el 1 de junio a las 00:00 horas hasta el 30 de junio a las 23:50 horas.

Los valores de temperatura en el estado inicial se obtienen a partir de la simulación de las dos semanas del mes de mayo previas a junio, con el objetivo de que se establezcan los valores de temperatura estimada y sean fiables. La relación que existe entre los diferentes parámetros que intervienen en el modelo de cálculo de las temperaturas se reflejan en el diagrama de la figura 22, donde aquellos que estén sombreados con una trama gris o un rayado inclinado 45° dependen de la variable temporal.

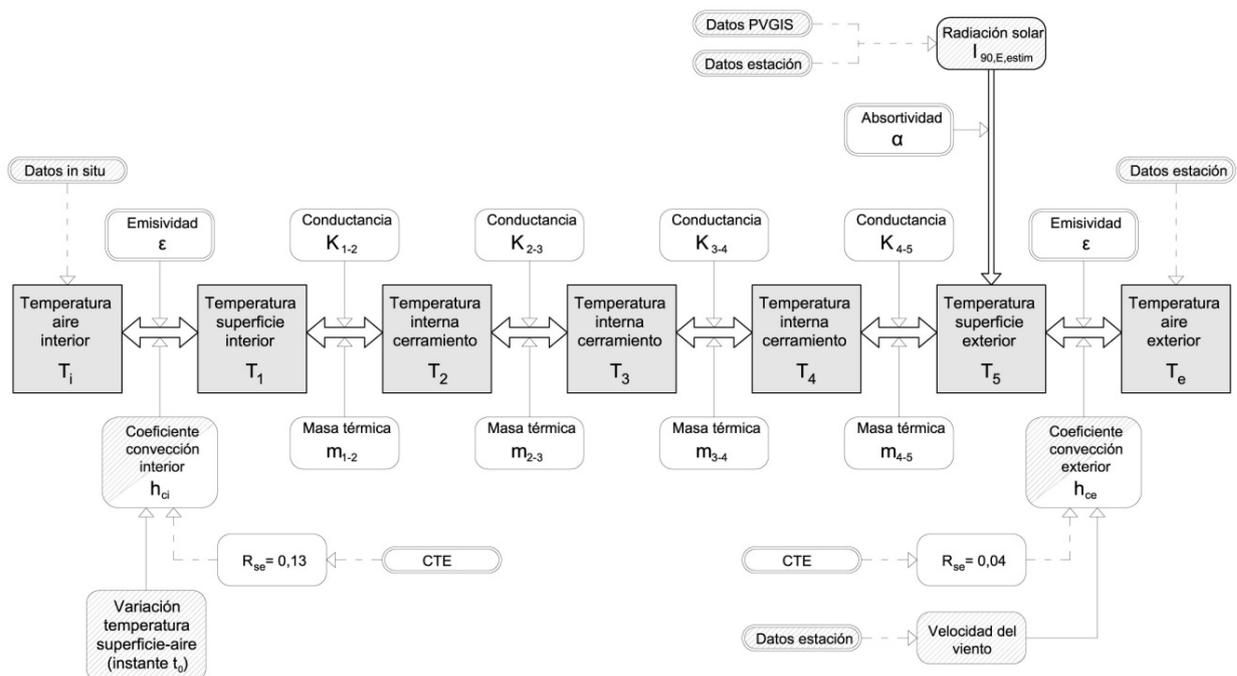


Figura 22. Diagrama que relaciona las temperaturas con los parámetros que afectan a su cálculo según el modelo propuesto.

Para el caso del coeficiente de convección se ha rayado la mitad del recuadro, porque puede ser variable o constante en el tiempo.

El sistema de ecuaciones empleado que define el modelo para calcular las temperaturas en cada uno de los nodos es el siguiente:

$$T_{1,t+\Delta t} = T_{1,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_{1-2}} \left[-\varepsilon \sigma (T_{1,t}^4 - T_{i,t}^4) - h_{ci} (T_{1,t} - T_{i,t}) - k \frac{T_{1,t} - T_{2,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{2,t+\Delta t} = T_{2,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_2} \left[-k \frac{T_{2,t} - T_{1,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{2,t} - T_{3,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{3,t+\Delta t} = T_{3,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_3} \left[-k \frac{T_{3,t} - T_{2,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{3,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{4,t+\Delta t} = T_{4,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_4} \left[-k \frac{T_{4,t} - T_{3,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{4,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{5,t+\Delta t} = T_{5,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_5} \left[\alpha_s I_{solar} - \varepsilon \sigma (T_{5,t}^4 - T_{e,t}^4) - h_{ce} (T_{5,t} - T_{e,t}) - k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

Los datos empleados para realizar la primera simulación de ajuste son los recogidos en la tabla 10.

Tabla 10. Datos introducidos para resolver las ecuaciones.

SIMULACIÓN DE AJUSTE: Fábrica de ladrillo de un pie de espesor					
Masa térmica (J/m ² °C)	$m_1 = 40650$	$m_2 = 84000$	$m_3 = 86700$	$m_4 = 86700$	$m_5 = 43350$
Conductancia (W/m ² K)	$K_{1-2} = 15,82$	$K_{2-3} = 18,82$	$K_{3-4} = 18,82$	$K_{4-5} = 18,82$	
Emisividad	$\varepsilon = 0,93$ (fábrica de ladrillo y enlucido de yeso)				
Absortividad	$\alpha_s = 0,63$ (fábrica de ladrillo)				
Constante Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$				
Variación tiempo (s)	$\Delta t = 600$				
Distancia entre nodos (m)	$\Delta x = 0,06375$				
Temperatura interior (°C)	Variable según medición in situ				
Temperatura exterior (°C)	Variable según datos estación meteorológica				
Temperatura estado inicial (°C)	$T_{1,0} = 28,02$	$T_{2,0} = 26,80$	$T_{3,0} = 24,78$	$T_{4,0} = 22,54$	$T_{5,0} = 21,88$
Estado inicial	1 de junio de 2011 a las 00:00 horas				

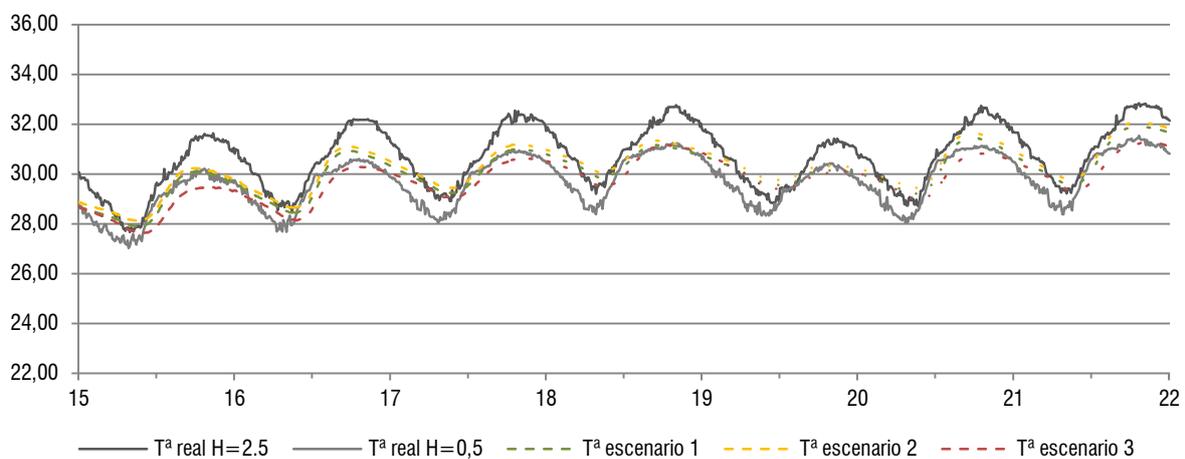
En esta etapa inicial de ajuste se han planteado tres escenarios, tabla 11., para determinar cuál debe de ser el coeficiente de convección que vamos a emplear.

Tabla 11. Escenarios propuestos para valorar que coeficiente de convección emplear en la simulación.

Escenario 1		
Coeficiente convección	Interior: variable función temperatura	Exterior: variable función velocidad viento
Escenario 2		
Coeficiente convección	Interior: $h_{ci} = 0,13$	Exterior: variable función velocidad viento
Escenario 3		
Coeficiente convección-radiación	Interior: $h_{cri} = 0,13$	Interior: $h_{cre} = 0,04$

A continuación simulamos los tres escenarios propuestos, obteniendo un conjunto de valores de temperatura superficial estimada para cada uno, que serán comparados con los datos de temperatura obtenidos en la medición in situ. La validación del modelo planteado se realiza a partir de la representación gráfica de los datos de temperatura a lo largo del tiempo, para analizar cómo se ajusta cada uno de los escenarios a la temperatura superficial medida in situ para las alturas de 0,5 m y 2,5 m.

Gráfica 4. Resultados obtenidos en la primera simulación para validar el modelo propuesto y seleccionar el escenario.



Comparando los resultados de la gráfica 4, para los días que van del 15 al 22 de junio, se obtiene que existe un pequeño desajuste temporal entre los máximos y mínimos reales con los simulados. También tenemos que la amplitud de la onda simulada es menor que la real, es decir, existe una mayor oscilación entre las temperaturas máximas y mínimas. Con objeto de reajustar las curvaturas, se ha modificado la densidad y la capacidad térmica de

la fábrica de ladrillo, siendo los nuevos valores empleados en las simulaciones los reflejados en la tabla 12.

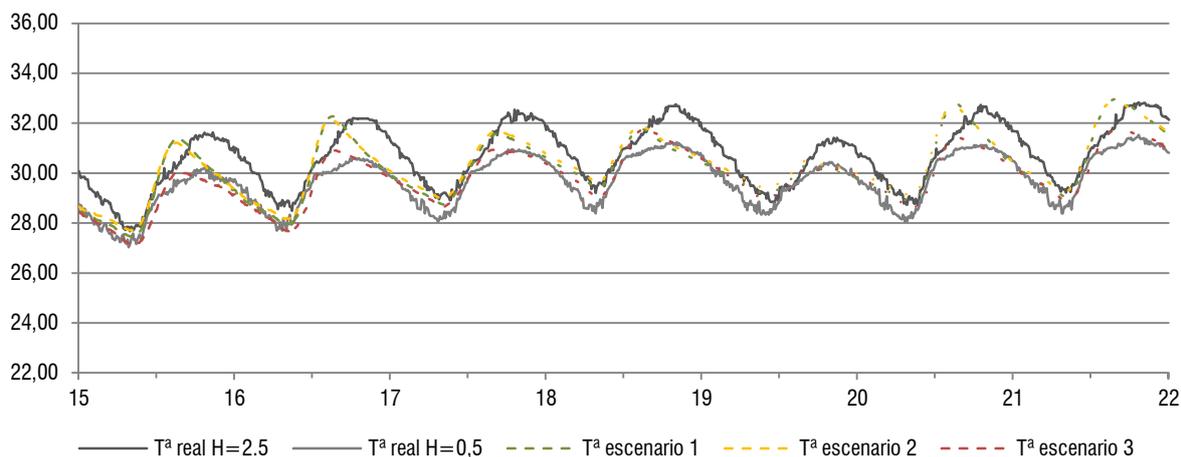
Las diferencias que existen entre los valores de las temperaturas reales y las simuladas vienen originadas por la situación de las sondas en el cerramiento. La posición de las sondas al interior se corresponde al exterior con una zona de la fachada donde existen machones, y que por tanto la superficie en contacto del cerramiento con el exterior es mayor dando lugar a unas oscilaciones de temperatura mayores.

Tabla 12. Valores modificados de los materiales del cerramiento.

	Fábrica de ladrillo	
	Densidad	Calor específico
Valor anterior	2170 kg/m ³	1000 J/kg.K
Valor actual	1700 kg/m ³	800 J/kg.K

En la gráfica 5 se representan los nuevos valores de temperatura superficial tras aplicar los cambios a la densidad y el calor específico. Podemos observar como el escenario tres define la curva que tiene el mejor ajuste, pues sus valores se encuentran situados entre las curvas de temperaturas reales para la altura 0,5 m y 2,5 m.

Gráfica 5. Comparación entre las temperaturas superficiales real y estimada para los tres escenarios definidos tras el reajuste de la densidad y el calor específico. Abscisas, coordenada temporal en días. Ordenadas, temperatura en grados centígrados.



Para las simulaciones que se van a realizar con el modelo planteado, vamos a emplear los coeficientes de convección-radiación interior y exterior constantes (escenario tres) que se definen en la tabla 11. Al emplear estos coeficientes tenemos que tener en cuenta que ya no es necesario considerar en el balance energético el flujo de calor por radiación que emite el cerramiento.

4.7. Simulaciones

Después de validar el modelo, de los ajustes y la selección de los coeficientes de convección que vamos a emplear, tenemos que definir las simulaciones a realizar.

Partiendo de las condiciones iniciales de la fachada del edificio sin reforma vamos a realizar una primera simulación donde se considerará que el espacio no está habitado y que por lo tanto no está acondicionado, tal y como ha ocurrido durante la medición in situ. En una segunda simulación, se planteará que el edificio está ocupado y que es necesario aclimatar el interior. Se ha considerado una temperatura de uso para el espacio interior de 23 °C.

Uno de los objetivos de este trabajo es valorar las diferencias que existe en el comportamiento térmico de la fachada entre el estado reformado y sin reformar. Por lo tanto, la tercera simulación se realizará para el cerramiento en estado reformado, donde se proyecta la colocación de aislante de lana de roca en la cara interior del muro de fábrica de ladrillo. A modo de comparación, se ha propuesto simular una cuarta situación, que sería aquella en la que el aislante se coloca en la cara exterior de muro de fábrica de ladrillo.

La decisión de situar el aislamiento en la cara interior del cerramiento como solución constructiva del proyecto reformado, no se debe tanto a su mejor o peor respuesta térmica como a que el edificio tiene un carácter histórico-artístico, y es importante conservar el exterior de la fachada en su estado actual.

Para los casos de la fachada aislada térmicamente se considera la temperatura interior constante. Las diferentes simulaciones a realizar se recogen en la siguiente tabla 13.

Tabla 13. Simulaciones de cerramiento propuestas.

SIMULACIONES		
Cerramiento	Espacio no aclimatado T ^e interior= variable	Espacio aclimatado T ^e interior =23°C
Un pie fábrica de ladrillo	Simulación 0 (ajuste)	Simulación 1
aislante interior + un pie fábrica de ladrillo	-	Simulación 2
aislante exterior + un pie fábrica de ladrillo	-	Simulación 3

A continuación se recogen las características de las simulaciones para cada uno de los cerramientos definidos, excepto la simulación cero cuyas características ya se han ido definiendo a lo largo de la descripción del modelo propuesto:

4.7.1. Simulación 1

En la simulación uno se calcula los valores de temperatura para los nodos definidos en el cerramiento de un pie de fábrica de ladrillo, que son un total de cinco según se muestra en la anterior figura 22. El sistema de ecuaciones que define el modelo es el descrito en el apartado 4.6, y los valores de los términos independientes usados son los indicados en la tabla 14. También se especifican los valores de las temperaturas iniciales para el instante $t=0$ que se corresponde con el día 31 de mayo a las 23:00 horas.

$$T_{1,t+\Delta t} = T_{1,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_{1-2}} \left[-h_{cri}(T_{1,t} - T_{i,t}) - k \frac{T_{1,t} - T_{2,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{2,t+\Delta t} = T_{2,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_2} \left[-k \frac{T_{2,t} - T_{1,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{2,t} - T_{3,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{3,t+\Delta t} = T_{3,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_3} \left[-k \frac{T_{3,t} - T_{2,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{3,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{4,t+\Delta t} = T_{4,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_4} \left[-k \frac{T_{4,t} - T_{3,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{4,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{5,t+\Delta t} = T_{5,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_5} \left[\alpha_s I_{solar} - h_{cre}(T_{5,t} - T_{e,t}) - k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

Tabla 14. Valores usados para resolver el sistema de ecuaciones de la fábrica de ladrillo de medio pie.

Simulación 1: Fábrica de ladrillo de un pie de espesor					
Masa térmica (J/m ² °C)	$m_1 = 46988$	$m_2 = 98625$	$m_3 = 103275$	$m_4 = 103275$	$m_5 = 51638$
Conductancia (W/m ² K)	$K_{1-2} = 15,24$	$K_{2-3} = 18,82$	$K_{3-4} = 18,82$	$K_{3-4} = 18,82$	
Emisividad	Incluida en el coeficiente de convección-radiación				
Absortividad	$\alpha_s = 0,63$ (fábrica de ladrillo)				
Constante Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$				
Variación tiempo (s)	$\Delta t = 600$				
Distancia entre nodos (m)	$\Delta x = 0,06375$				
Coeficiente de convección-radiación	Interior: $h_{cri} = 0,13$			Exterior: $h_{cre} = 0,04$	
Temperatura interior (°C)	Constante: $T^a = 23$				
Temperatura exterior (°C)	Variable según datos estación meteorológica				
Temperatura estado inicial (°C)	$T_{1,0} = 23,22$	$T_{2,0} = 23,55$	$T_{3,0} = 23,24$	$T_{4,0} = 22,61$	$T_{5,0} = 21,43$
Estado inicial	1 de junio de 2011 a las 00:00 horas				

4.7.2. Simulación 2

En la simulación dos se va a calcular las temperaturas de los nodos indicados, para la fachada formada constructivamente por un pie de fábrica de ladrillo más un trasdosado interior de placa de cartón-yeso fijada sobre una perfilería de acero galvanizado y aislamiento de lana de roca entre los montantes, según se muestra en la figura 23. El sistema de ecuaciones propuesto difiere del anterior en la necesidad de añadir dos nuevos nodos en los que calcular la temperatura. Estas dos nuevas ecuaciones se obtienen a partir del equilibrio térmico interno del cerramiento, por lo tanto únicamente se tendrá en cuenta la transferencia de calor por conducción, y las ecuaciones referidas a las condiciones de contorno no variarán.

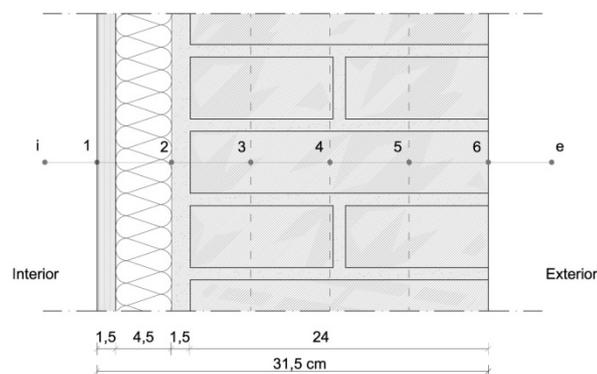


Figura 23. Sección constructiva de la fábrica ladrillo de un pie espesor más aislante interior, y situación de los nodos.

El sistema de ecuaciones a resolver para el caso en el que tenemos seis nodos en los que calcular la temperatura, es el siguiente:

$$T_{1,t+\Delta t} = T_{1,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_{1-2}} \left[-h_{cri}(T_{1,t} - T_{i,t}) - k \frac{T_{1,t} - T_{2,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{2,t+\Delta t} = T_{2,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_2} \left[-k \frac{T_{2,t} - T_{1,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{2,t} - T_{3,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{3,t+\Delta t} = T_{3,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_3} \left[-k \frac{T_{3,t} - T_{2,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{3,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{4,t+\Delta t} = T_{4,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_4} \left[-k \frac{T_{4,t} - T_{3,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{4,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{5,t+\Delta t} = T_{5,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_5} \left[-k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x} - k \frac{T_{5,t} - T_{4,t}}{\Delta x} \right]$$

$$T_{6,t+\Delta t} = T_{6,t} + \frac{\Delta t}{(\rho c_p \Delta x)_6} \left[\alpha_s I_{solar} - h_{cre}(T_{5,t} - T_{e,t}) - k \frac{T_{6,t} - T_{5,t}}{\Delta x} \right]$$

El valor de los términos independientes del sistema de ecuaciones se recoge en la siguiente tabla 15.

Tabla 15. Valores empleados para resolver el sistema de ecuaciones de la fábrica de ladrillo de un pie.

Simulación 2: Aislamiento interior + un pie de fábrica de ladrillo						
Masa térmica (J/m ² °C)	$m_1 = 7323$	$m_2 = 54311$	$m_3 = 98625$	$m_4 = 103275$	$m_5 = 103275$	$m_6 = 51638$
Conductancia (W/m ² K)	$K_{1-2} = 0,72$	$K_{2-3} = 15,24$	$K_{3-4} = 18,82$	$K_{4-5} = 18,82$	$K_{5-6} = 18,82$	
Emisividad	Incluida en el coeficiente de convección-radiación					
Absortividad	$\alpha_s = 0,63$ (fábrica de ladrillo)					
Constante Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$					
Variación tiempo (s)	$\Delta t = 600$					
Distancia entre nodos (m)	Placa cartón-yeso + aislamiento: $\Delta x_1 = 0,06$; Fábrica ladrillo: $\Delta x_2 = 0,06375$					
Coeficiente de convección-radiación	Interior: $h_{cri} = 0,13$			Exterior: $h_{cre} = 0,04$		
Temperatura interior (°C)	Constante: $T^a = 23$					
Temperatura exterior (°C)	Variable según datos estación meteorológica					
Temperatura estado inicial (°C)	$T_{1,0} = 23,22$	$T_{2,0} = 23,55$	$T_{3,0} = 23,49$	$T_{4,0} = 23,24$	$T_{5,0} = 22,61$	$T_{6,0} = 21,43$
Estado inicial	1 de junio de 2011 a las 00:00 horas					

4.7.3. Simulación 3

En la simulación tres se va a calcular las temperaturas del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo más un trasdosado exterior de aislamiento, siendo ésta la solución adoptada en el proyecto para reformar el edificio.

La sección constructiva adoptada se muestra en la figura 24, donde se refleja las diferentes capas que componen el cerramiento (descrito en en el capítulo 3), el espesor de las mismas y la posición de los nodos en los que se va a calcular la temperatura.

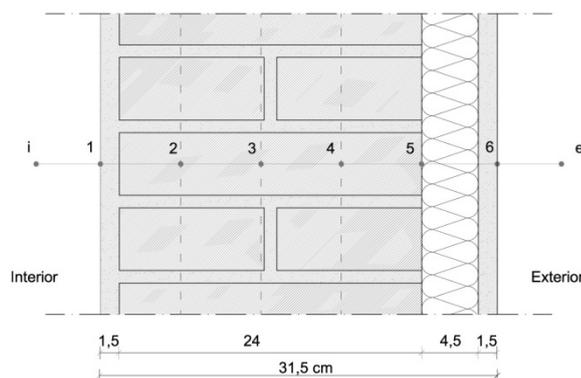


Figura 24. Sección constructiva de la fábrica ladrillo de medio pie espesor con aislamiento exterior, y situación de los nodos.

El sistema de ecuaciones a resolver para este caso está formado por seis ecuaciones, y la formulación general se corresponderá con el empleado en la simulación dos. Los valores que los términos independientes han de adoptar para este caso se recogen en la tabla 16. Para esta simulación sólo se considerará el caso en el que la temperatura interior permanece constante.

Tabla 16. Valores empleados para resolver el sistema de ecuaciones del cerramiento con aislante interior.

Simulación 3: Aislamiento exterior + un pie de fábrica de ladrillo						
Masa térmica (J/m ² °C)	$m_1 = 46988$	$m_2 = 98625$	$m_3 = 103275$	$m_4 = 103275$	$m_5 = 75638$	$m_6 = 24000$
Conductancia (W/m ² K)	$K_{1-2} = 15,24$	$K_{2-3} = 18,82$	$K_{3-4} = 18,82$	$K_{4-5} = 18,82$	$K_{5-6} = 0,72$	
Emisividad	Incluida en el coeficiente de convección-radiación					
Absortividad	$\alpha_s = 0,63$ (fábrica de ladrillo)					
Constante Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$					
Variación tiempo (s)	$\Delta t = 600$					
Distancia entre nodos (m)	Revoco mortero + aislamiento: $\Delta x_1 = 0,06$; Fábrica ladrillo: $\Delta x_2 = 0,06375$					
Coeficiente de convección	Interior: $h_{ci} = 0,13$			Exterior: $h_{cre} = 0,04$		
Temperatura interior (°C)	Constante: $T^a = 23$					
Temperatura exterior (°C)	Variable según datos estación meteorológica					
Temperaturas estado inicial (°C), $t=0$	$T_{1,0} = 23,17$	$T_{2,0} = 23,19$	$T_{3,0} = 23,20$	$T_{4,0} = 23,20$	$T_{5,0} = 22,97$	$T_{6,0} = 20,47$
	1 de junio de 2011 a las 00:00 horas					

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. Datos de la medición in situ

La medición de temperaturas en el espacio bajo cubierta se realizó registrando datos de la temperatura superficial de la fachada Este, en dos puntos situados a 0,5 m y 2,5 m de altura respecto al suelo interior, y de la temperatura del aire interior. Estos datos van a permitir verificar y cuantificar la variabilidad de la temperatura dentro de un espacio interior que no esté acondicionado ni en uso, con respecto a la temperatura exterior.

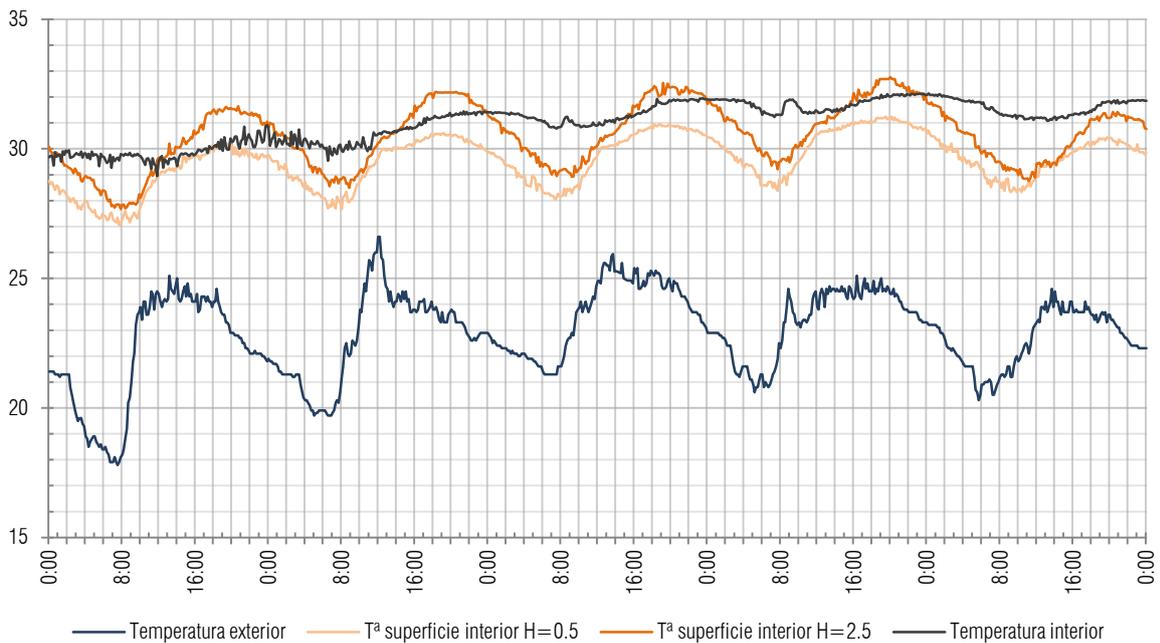
En el anexo I se representan gráficamente el conjunto de valores obtenidos durante la medición para el mes de junio. Asimismo se ha incluido en la representación los valores de temperatura exterior obtenidos de la estación meteorológica para el citado mes, con el objeto de poder comparar las fluctuaciones de temperatura entre el interior y el exterior.

A partir de la gráfica 4, dónde se han seleccionado cuatro días del mes de junio, vamos a analizar los datos representados:

- Las temperaturas exteriores presentan una mayor variación entre los máximos y los mínimos, llegando hasta los 8°C de diferencia. También se observa como al amanecer, entorno a las 7:00 horas, tenemos la temperatura mínima, y la máxima se produce en las horas centrales del día, entre las 12:00 y las 14:00 horas.
- La representación gráfica de las temperaturas superficiales muestra que los valores definen una curva sinusoidal, similar a una onda. La diferencia entre el máximo y el mínimo es aproximadamente la mitad que para el caso de las temperaturas exteriores, entorno a los 4°C.
- Las temperaturas superficiales que se producen a la altura de 0,5 m son siempre inferiores a las que tenemos a la altura de 2,5 m para el mismo instante de tiempo. El momento en el que existe una mayor proximidad entre ambas curvas, llegando casi a igualarse, se produce cuando las temperaturas comienzan a ascender justo después de estar situadas en los valores mínimos. La mayor separación entre las curvas tiene lugar cuando se alcanza la temperatura máxima superficial interior.
- La temperatura superficial de la fachada nunca es uniforme espacial ni temporalmente.

- La línea de temperatura interior presenta las menores oscilaciones entre los valores máximos y los mínimos, la variación es de 1 a 2°C. También tiene una forma similar a una curva sinusoidal.
- La temperatura interior siempre es superior a la exterior, siendo la diferencia mínima entre ambas de 5°C. Hay que tener en cuenta que el espacio interior no está acondicionado ni se permite la ventilación.

Gráfica 6. Evolución de las temperaturas medidas in situ y de la estación meteorológica. En abscisas el tiempo en horas (del día 15 al 19 de junio ambos incluidos) y en ordenadas la temperatura en grados centígrados.



- El cerramiento amortigua las oscilaciones de la temperatura exterior.
- La temperatura máxima interior no coincide temporalmente con la máxima exterior.

5.2. Comportamiento térmico cerramientos

En este apartado vamos a representar gráficamente el resultado de las simulaciones realizadas con la finalidad de conocer el comportamiento térmico de cada una de las soluciones constructivas. Para ello, se han seleccionado los días 24, 25, 26 y 27 para representar los valores de temperatura que toma cada uno de los nodos diariamente.

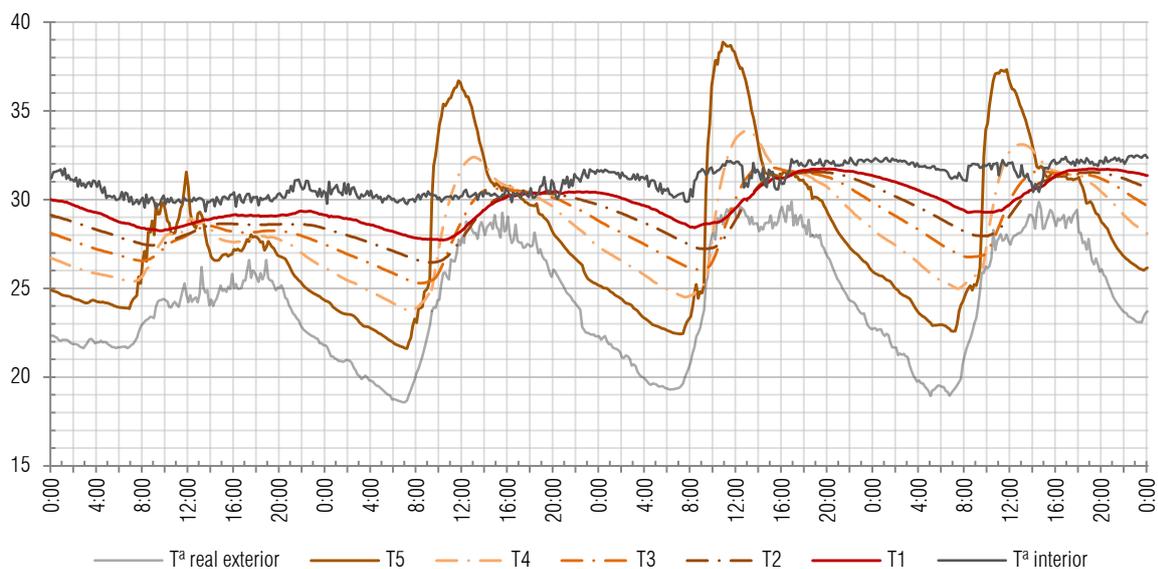
En el anexo III se ha representado gráficamente la evolución de la temperatura superficial interior obtenida en las simulaciones uno, dos y tres, para todo el mes de junio, en comparación con la variación de la temperatura ambiente exterior y una temperatura ambiente interior de 23°C. A partir de estos resultados se han seleccionado los días mencionados anteriormente, para realizar el análisis interno de la evolución de las temperaturas, pues existe una mayor diferencia de temperaturas exteriores entre el día y la noche.

La cuatro simulaciones realizadas (0, 1, 2 y 3) tienen en común que la temperatura superficial exterior es máxima en la franja horaria que va desde las 10 hasta las 12 de la mañana, por estar la fachada orientada hacia el Este.

5.2.1. Simulación 0

Los resultados de temperatura de nodos para el cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y una temperatura interior variable se recogen en la gráfica 7.

Gráfica 7. Comportamiento térmico de la fachada simulación cero. Abscisas: el tiempo en horas. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



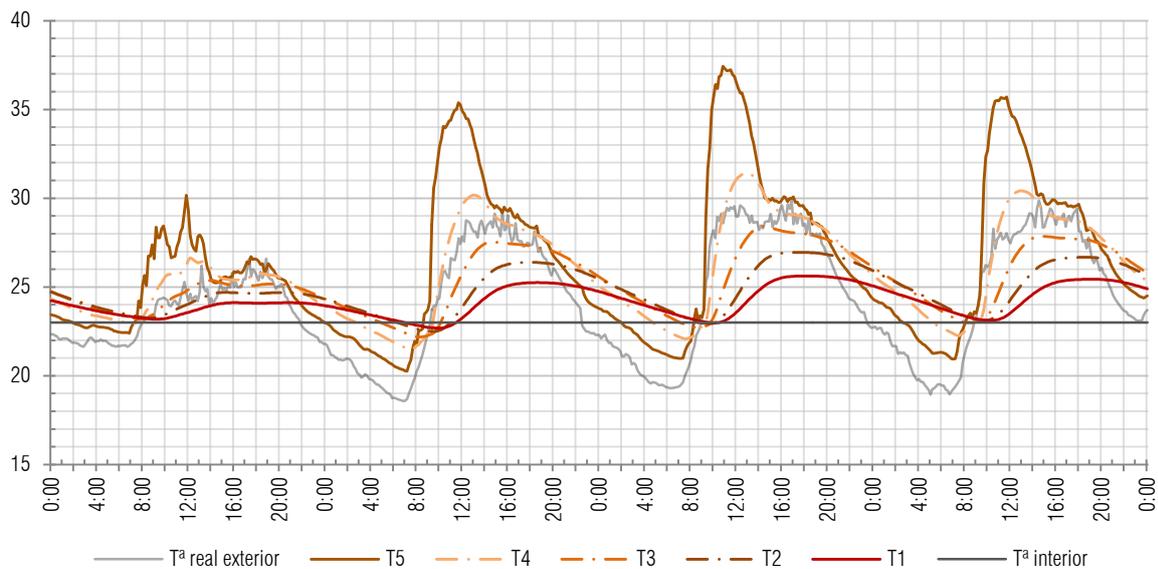
Las principales características del comportamiento térmico para este caso son:

- La temperatura del aire interior siempre es superior a la temperatura del aire exterior.
- La temperatura superficial exterior (T5) siempre es superior a la temperatura del aire exterior. La mayor diferencia entre ambas temperaturas se da entre las 10 y las 12 horas de la mañana, periodo en el cual la radiación solar incide directamente sobre la fachada Este.
- Este gran salto térmico que se produce en la cara exterior del cerramiento se va atenuando según avanzamos hacia el espacio interior dónde no se manifiesta con la misma intensidad.

5.2.2. Simulación 1

Los resultados de temperatura de nodos para el cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y una temperatura interior constante se recogen en la gráfica 8.

Gráfica 8. Comportamiento térmico de la fachada en la simulación uno. Abscisas: el tiempo en horas. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Las principales características del comportamiento térmico para este caso, en comparación con el anterior son:

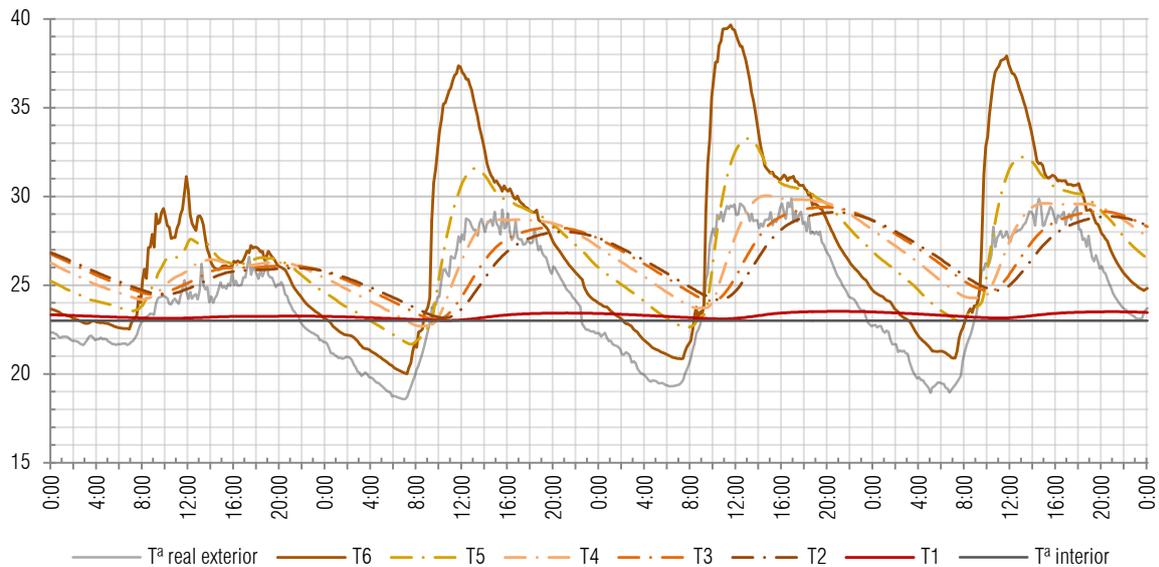
- La temperatura del aire interior es constante, igual a 23°C, y por tanto la temperatura del aire exterior en la franja de horas diurnas es mayor.
- La temperatura superficial exterior (T5) ha reducido entorno a un grado y medio sus valores en las horas diurnas, disminuyendo la distancia que separa la línea de la temperatura superficial exterior con respecto a la temperatura del aire exterior.

- La temperatura superficial presenta para ambos casos una variación superficial máxima de aproximadamente dos grados y medio.

5.2.3. Simulación 2

En la gráfica 9 se recogen los resultados de temperatura en los nodos del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo más aislamiento colocado al interior, y una temperatura interior constante.

Gráfica 9. Comportamiento térmico de la fachada en la simulación dos. Abscisas: el tiempo en horas. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Las principales características del comportamiento térmico para este caso, en comparación con las dos simulaciones anteriores son:

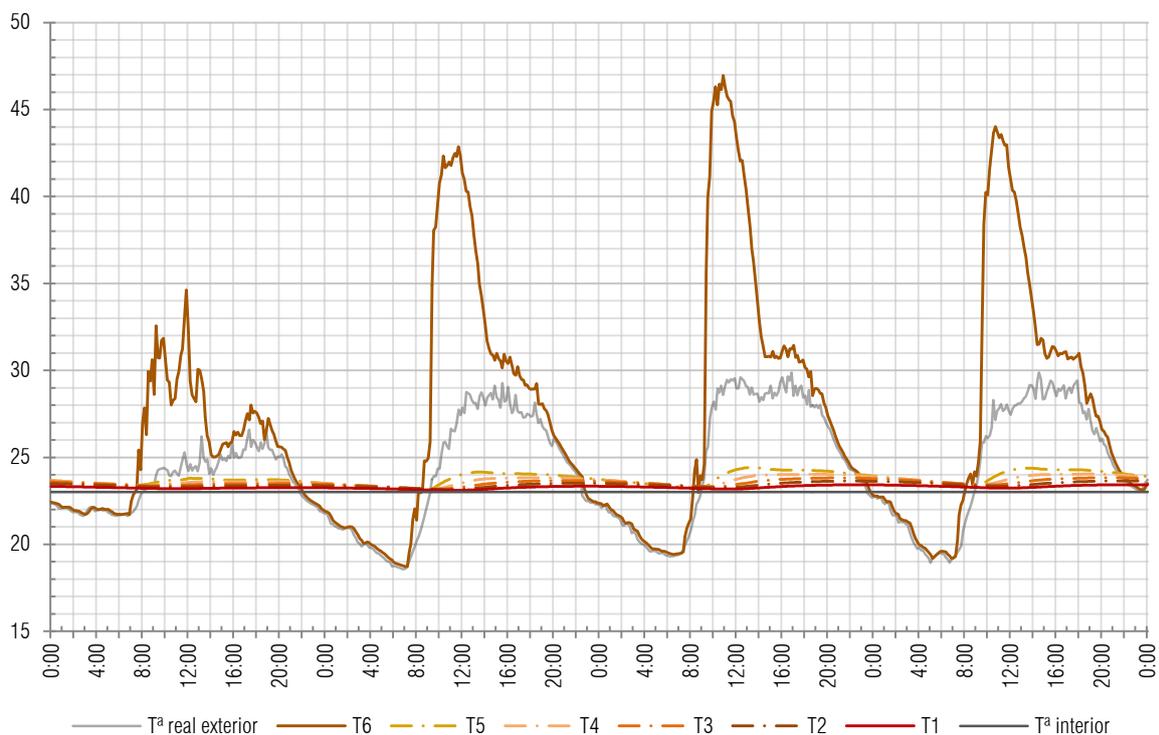
- La temperatura de la superficie exterior (T6), en la franja horaria diurna, en la simulación dos, es mayor con respecto a las simulaciones cero y uno. La diferencia máxima de temperaturas es de aproximadamente dos grados y se produce en las horas de mayor incidencia solar sobre la fachada.
- El resto de los nodos interiores al cerramiento tienen una temperatura superior si se comparan con las simulaciones anteriores.
- La temperatura superficial interior (T1) sufre unas variaciones de temperatura, con respecto al aire interior ($T^a = 23^{\circ}\text{C}$), inferiores a un grado centígrado.
- Se produce un gran salto de temperatura entre los nodos uno y dos (T1-T2), en la franja de horas diurnas, que se corresponde con la posición que ocupa el aislante.

- La temperatura exterior se manifiesta en la superficie interior del cerramiento con un retraso temporal mayor que en los anteriores casos, y se mantiene constante durante seis horas aproximadamente.

5.2.4. Simulación 3

En la gráfica 10 se recogen los resultados de temperatura en los nodos del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo más aislamiento colocado en el exterior, y una temperatura interior constante.

Gráfica 10. Comportamiento térmico de la fachada en la simulación tres. Abscisas: el tiempo en horas. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



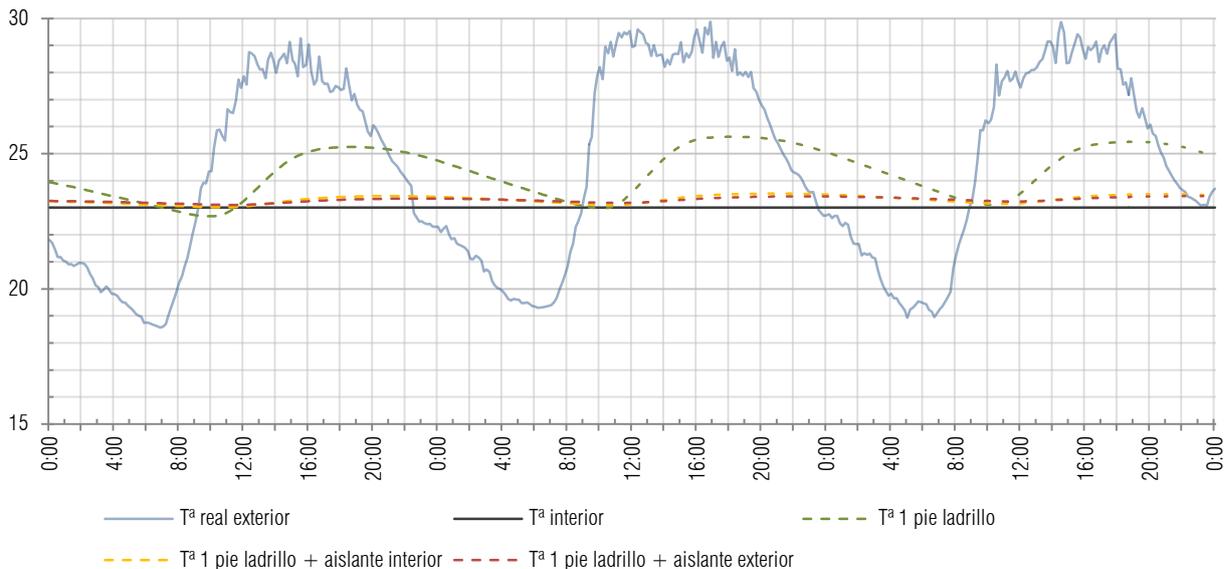
Las principales características del comportamiento térmico para este caso, en comparación con las dos simulaciones anteriores son:

- La temperatura superficial exterior (T6) en las horas diurnas para la simulación tres es mayor que el resto de simulaciones. La temperaturas pueden llegar a máximos de 47°C, muy superior a las anteriores que se encontraban en 37,5 °C y 39,5 °C.
- Para este caso tenemos el mayor salto de temperaturas entre nodos que se produce entre el nodo uno y dos.
- La variación de temperaturas para los nodos situados a partir del aislante (2, 3, 4, 5 y 6) es inferior a 2 °C. El aislante absorbe un salto térmico de aproximadamente 22°C para la situación más desfavorable.

5.3. Comparación entre los diferentes cerramientos

En este punto vamos a representar gráficamente las temperaturas superficiales interiores que han sido simuladas en el caso 1, 2 y 3, para poder comparar el comportamiento térmico de las tres soluciones constructivas planteadas, según se muestra en la figura 11. También se ha incluido la temperatura real exterior y la temperatura interior ($T^a = 23^\circ\text{C}$).

Gráfica 11. Comparación entre las temperaturas superficiales simuladas, y la temperatura real del aire exterior y del aire interior. En abscisas el tiempo en horas (del día 15 al 19 de junio ambos incluidos) y en ordenadas la temperatura en grados centígrados.



A partir de la figura 11 podemos decir que:

- La variación de la temperatura para el cerramiento formado por un pie de ladrillo (S1, en adelante) es mayor que para los cerramientos con el aislante interior (S2) y con el aislante exterior (S3).
- La curva de temperaturas para S1 puede por debajo de la línea de 23°C que define la temperatura del aire interior.
- La diferencia de temperaturas entre la solución constructiva S1 y las soluciones S2 y S3 es algo inferior a 2°C .
- Las curvas descritas por los valores de temperatura para S2 y S3 son prácticamente iguales, y únicamente se puede comentar que existe pequeña mayor fluctuación de la temperatura en S2 con respecto a S3.
- La temperatura máxima para S1 se produce a las 17:00, para S2 a las 20:00 y para S3 a las 22:00 horas. Aunque la diferencia entre S2 y S3 es prácticamente inapreciable debido a la gran estabilidad de la temperatura superficial para ambos casos.

5.4. Perfiles térmicos

El perfil térmico del cerramiento permite conocer cuáles son las temperaturas en todo su espesor, en una hora concreta. Se ha representado gráficamente los perfiles térmicos del cerramiento cada dos horas durante un día completo del mes de junio, para analizar como varía la temperatura en cada uno de los nodos.

Para cada uno de los resultados obtenidos se presenta una gráfica con las variaciones de temperatura junto con un dibujo de la sección constructiva del cerramiento analizado, con el objeto de facilitar la comprensión del gráfico. El punto 0 de la gráfica se corresponde con la cara interior del cerramiento y el resto de los nodos están señalados en el dibujo.

Asimismo se ha incluido dos puntos de control de temperatura, el primero situado entre la capa de yeso y la fábrica de ladrillo, y el segundo entre el aislamiento y la placa de cartón yeso (revoco de mortero en el exterior). La temperatura estos nodos se ha obtenido a partir de la relación que existe entre la resistencia de cada una de las capas y la diferencia de temperaturas.

Lo más destacable de la comparación entre los perfiles térmicos de los cuatro casos recogidos en adelante, es que el aislamiento afecta al comportamiento térmico del muro de la fábrica de ladrillo. Si el aislante se sitúa al interior del muro de fábrica, tenemos que este último aumenta su temperatura media en todo el espesor, mientras que si el aislante está al exterior, la temperatura interna del muro de fábrica tiene unas oscilaciones mínimas y la es temperatura inferior tomando valores próximos a la temperatura del aire interior.

Un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior no controlada.

Gráfica 12 Perfiles térmicos cada dos horas del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior no controlada, para el día 28 de junio. Abscisas: espesor del cerramiento en centímetros. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.

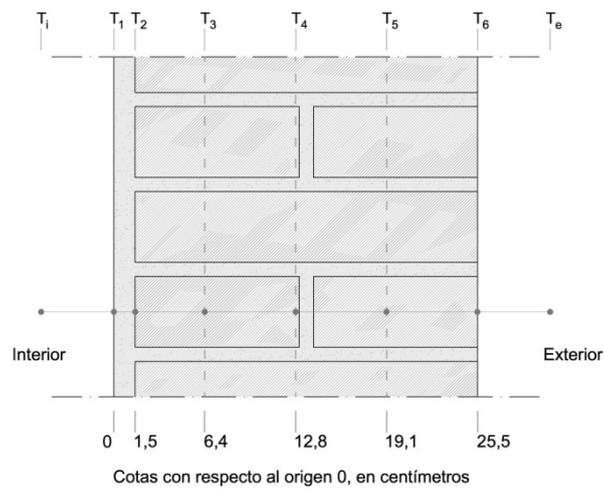
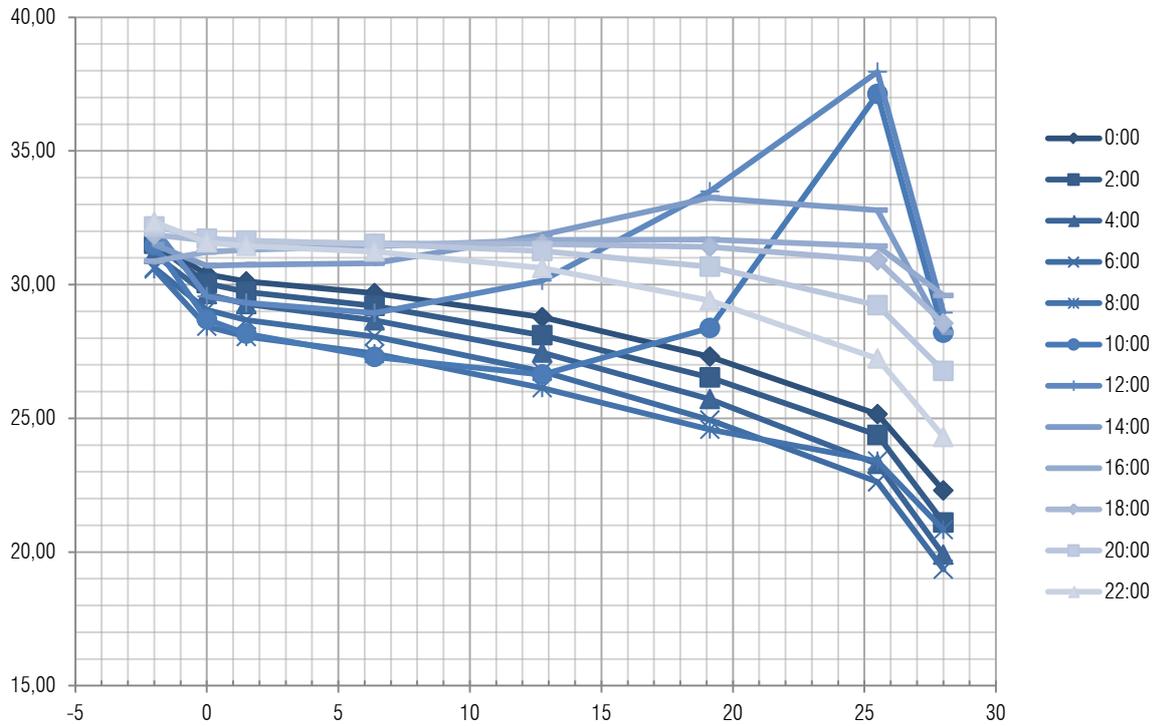


Figura 25. Muro de fábrica de ladrillo de un pie de espesor.

Un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior de 23°C

Gráfica 13. Perfiles térmicos cada dos horas del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior igual a 23°C, para el día 28 de junio. Abscisas: espesor del cerramiento en centímetros. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.

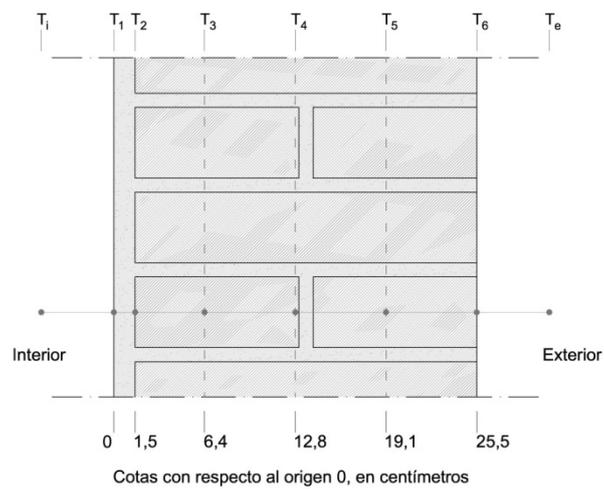
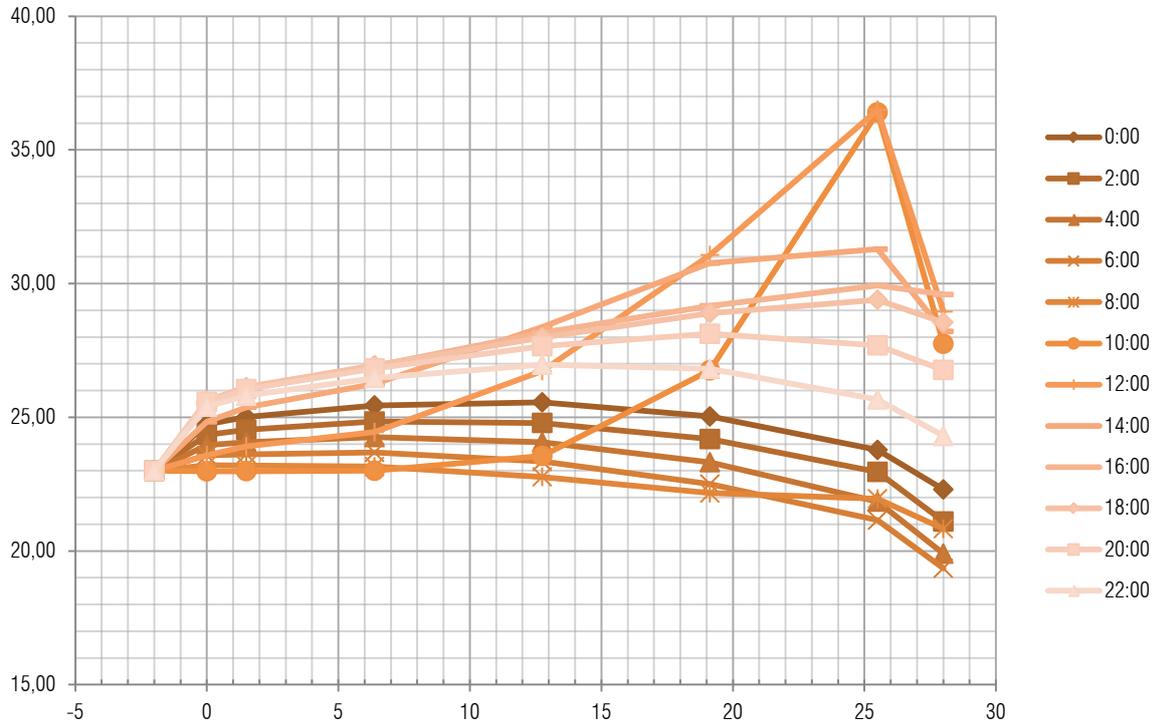


Figura 26. Muro de fábrica de ladrillo de un pie de espesor.

Un pie de fábrica de ladrillo más aislante interior y temperatura interior de 23°C.

Gráfica 14 Perfiles térmicos cada dos horas del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior igual a 23°C, para el día 28 de junio. Abscisas: espesor del cerramiento en centímetros. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.

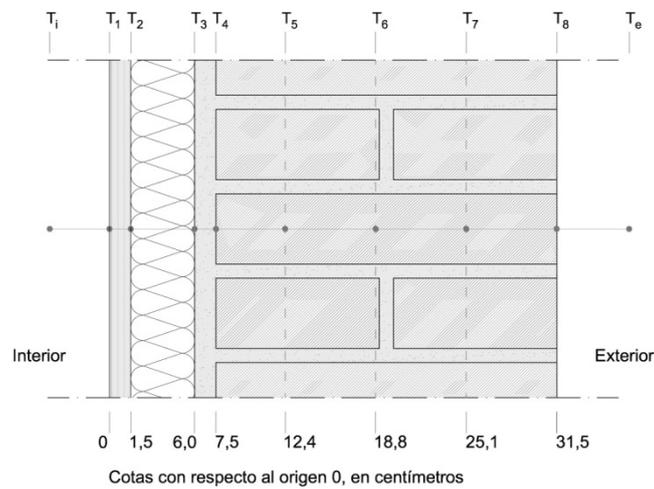
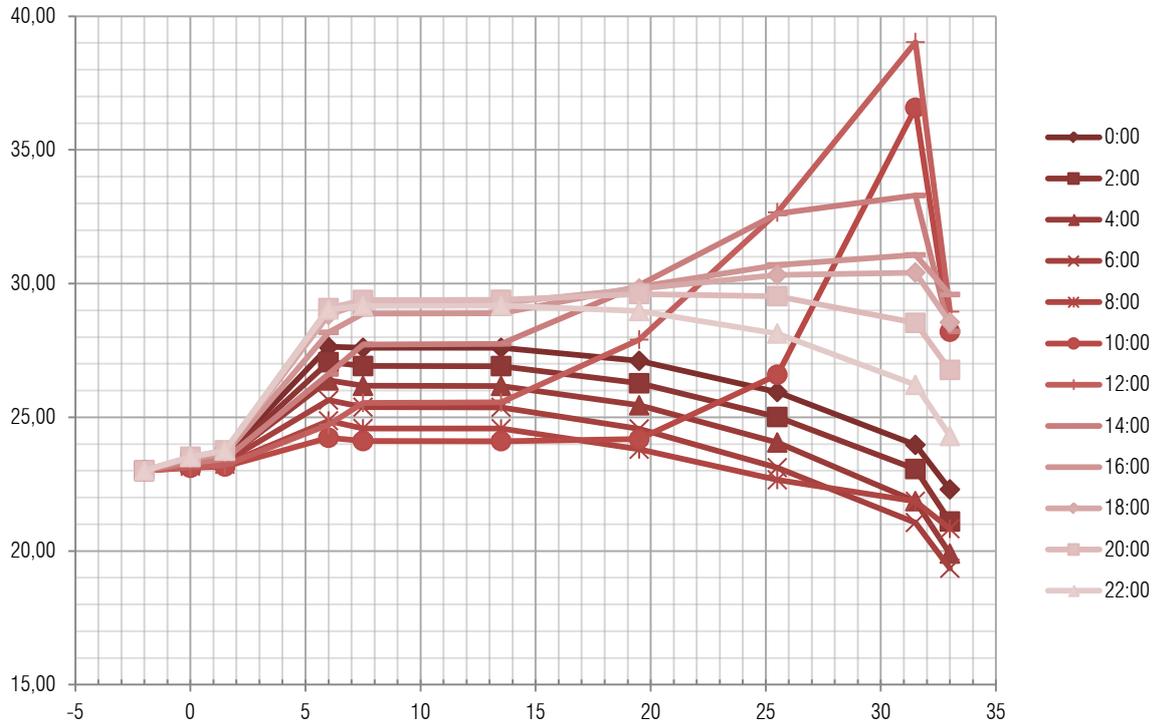


Figura 27. Muro de fábrica de ladrillo y aislamiento interior.

Un pie de fábrica de ladrillo más aislante exterior y temperatura interior de 23°C.

Gráfica 15. Perfiles térmicos cada dos horas del cerramiento formado por un pie de fábrica de ladrillo y temperatura interior igual a 23°C, para el día 28 de junio. Abscisas: espesor del cerramiento en centímetros. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.

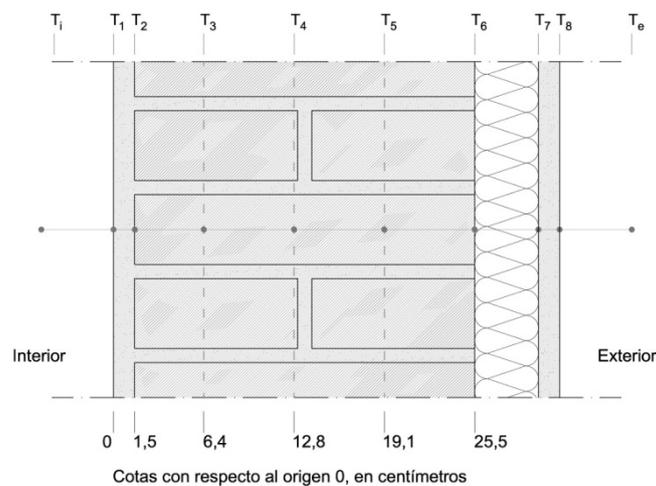
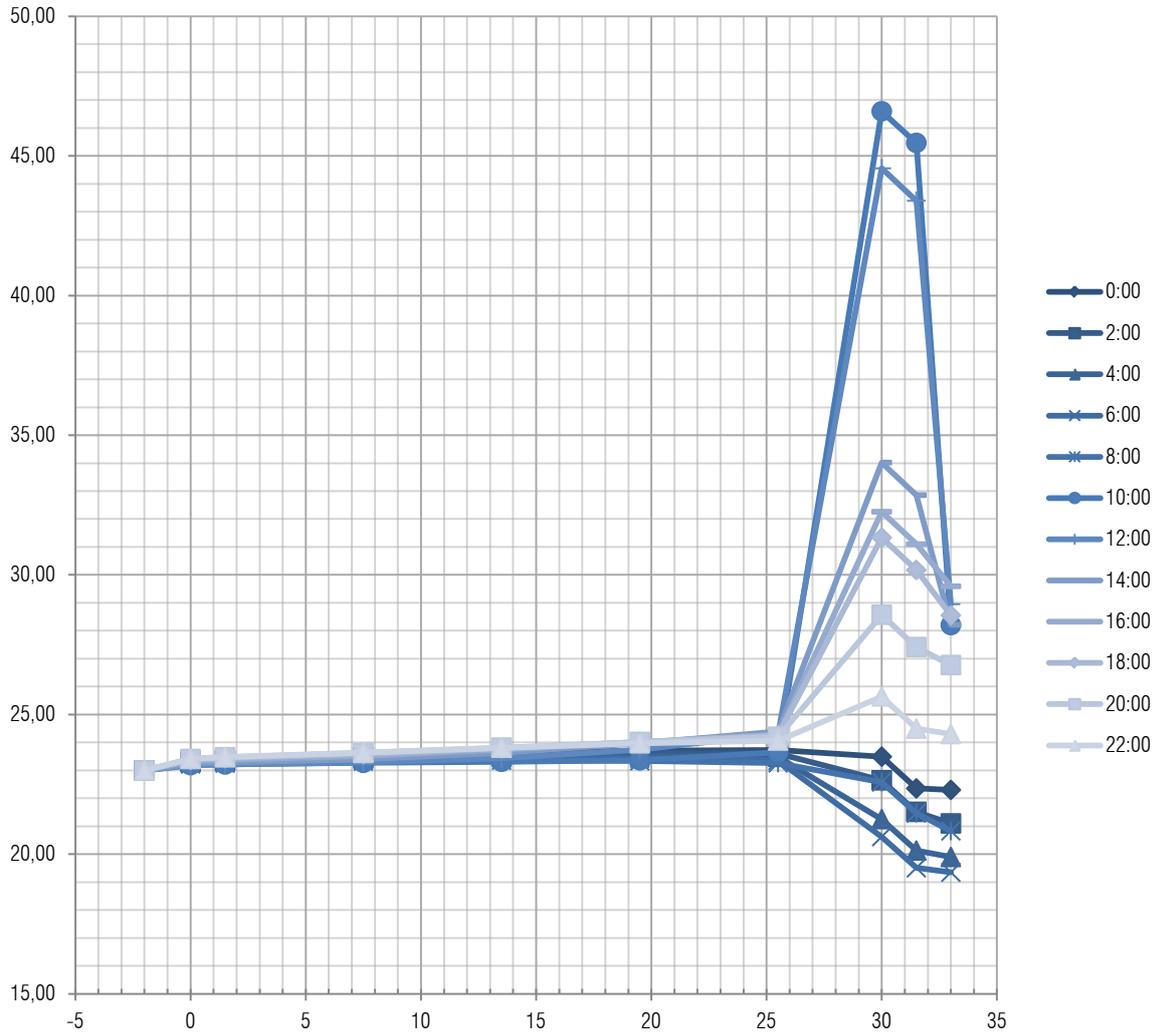


Figura 28. Muro de fábrica de ladrillo y asilamiento exterior

6. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se pueden extraer del presente trabajo van a estar relacionadas con la medición de temperaturas realizada in situ para el mes de junio, el modelo propuesto de transferencia de calor y el comportamiento térmico de las tres soluciones constructivas planteadas en los objetivos.

- a) En relación a los datos obtenidos en la medición de temperaturas interiores, podemos decir que, en el espacio interior dónde no existe ventilación natural, ni ningún otro medio de climatización natural o artificial, y que el espacio no esté en uso, la temperatura del aire interior no presenta grandes variaciones a lo largo del día. Las oscilaciones de temperatura se encuentran entre uno y dos grados centígrados.

También se puede decir que la temperatura del aire exterior siempre ha sido inferior a la del aire interior y que la amplitud de las variaciones de temperatura exteriores no se traslada al interior sino que el cerramiento de un pie de fábrica de ladrillo absorbe las oscilaciones exteriores atenuando la amplitud de la onda descrita por los valores de temperatura representados gráficamente.

En cuanto a las temperaturas superficiales interiores, obtenemos que la temperatura de un punto situado en la parte inferior del cerramiento es inferior a la temperatura de un segundo punto localizado a una mayor altura. Las oscilaciones de la temperatura superficial son mayores que las del aire interior.

- b) El modelo de transferencia de calor permite obtener unos resultados aproximados de temperatura según se ha comprobado al comparar la temperatura superficial estimada, obtenida en la simulación cero, con la temperatura superficial real.

A partir del planteamiento de tres escenarios donde se modificaba el coeficiente de convección, pudiendo ser éste variable en el tiempo o constante tomando los valores dados en el CTE, se obtuvo que escenario uno y dos eran muy similares siendo sus diferencias inferiores a medio grado centígrado, mientras que el escenario tres presenta unas desviaciones en las temperaturas máximas, con respecto a los escenarios uno y dos, de aproximadamente dos grados centígrados.

A pesar de que en determinados días el máximo simulado estaba próximo al real para los escenarios uno y dos, no se puede establecer con que el modelo nos permita calcular la temperatura real máxima en todas las situaciones. En la simulación tres se comprueba que la curva definida tiene un mejor ajuste con los valores medidos a la altura de 0,5 m.

- c) El comportamiento térmico de las tres soluciones constructivas planteadas nos muestra claras diferencias entre tener aislante y no tenerlo. Si no existe aislante, y tenemos unas condiciones de temperatura interior constantes, se producen oscilaciones de temperatura a lo largo del día. Mientras que si tenemos aislante la variación de temperatura se reduce a una expresión mínima, inferior a medio grado centígrado.

Situar el aislamiento en la parte interior del muro de fábrica de ladrillo supone un aumento de la temperatura media interior de éste frente a la solución en la que situamos el aislamiento en la cara exterior o simplemente no hay aislamiento.

Cuando el aislante se localiza al exterior tenemos que el salto de temperatura entre el interior y el exterior lo absorbe el aislante, y la fábrica de ladrillo experimenta pequeñas variaciones internas de temperatura siendo esta similar a la del aire interior.

A raíz de estas conclusiones, se puede plantear como posibles líneas para completar el análisis térmico del cerramiento del edificio propuesto, la toma de datos de temperaturas superficial y del aire interior para el mes de enero, bajo las mismas condiciones de medición, para comparar el comportamiento térmico entre la época de calor y la de frío. También sería interesante poder validar los resultados obtenidos de mejora del comportamiento térmico al añadir el aislamiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR PERIS, J. *Curso de termodinámica*. ed. Alhambra, Madrid, 1984.
ISBN 84-205-1382-2
- APARICIO FERNÁNDEZ, C. y VIVANCOS BONO, J.L. *Revestimientos ventilados en la arquitectura contemporánea. Influencia del diseño constructivo y su entorno en el comportamiento térmico*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2010. (Tesis doctoral).
- CAMPOS BONET, C. *Comportamiento térmico en techos verdes*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2010. (Proyecto Final de Máster).
- CÓSTOLA, D., CLOCKEN, B. y HENSEN, J.L.M. *Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs*. Building and environment, 2009, vol. 44, pp. 2027-2036.
- ÇENGEL, YUNUS A. *Transferencia de calor*. ed. McGraw-Hill, Interamericana.
ISBN 9701044843
- DAVIES, MORRIS GRENFELL. *Building heat transfer*. ed. John Wiley, México, 1999.
ISBN 9780470847312
- DEFRAEYE, T. y CARMELIET, J. *A methodology to assess the influence of local wind conditions and building orientation on the convective heat transfer at building surfaces*. Environmental Modelling & Software, 2010, vol. 25, pp. 1813-1824.
- EDWARDS, B. y HYETT, P. *Guía básica de la sostenibilidad*. ed. Gustavo Gili, Barcelona, 2004. ISBN 84-252-1951-5
- INCROPERA, FRANK P. *Fundamentos de transferencia de calor*. ed. Prentice Hall, México, 1999. ISBN 970-17-0170-4

- KREITH, F. y BOHN, M. *Principios de transferencia de calor*. ed. Thomson, Madrid, 2002. ISBN 84-9732-061-1

- GARCÍA TORMO, N. *Caracterización Térmica de un edificio histórico con museo y claustro*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2011. (Proyecto Final de Carrera).

- MARTÍNEZ BERNAL, M. D. *Estudio del comportamiento térmico de una construcción para ensayos al aire libre*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2011. (Proyecto Final de Carrera).

- MUÑOZ DE MORALES, A. D. *Caracterización térmica de fachadas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. 2010. (Proyecto Final de Máster).

- MINISTERIO DE VIVIENDA. Código Técnico de la Edificación. *Catálogo de elementos constructivos del CTE*. Instituto Eduardo Torroja. Madrid, 2008.

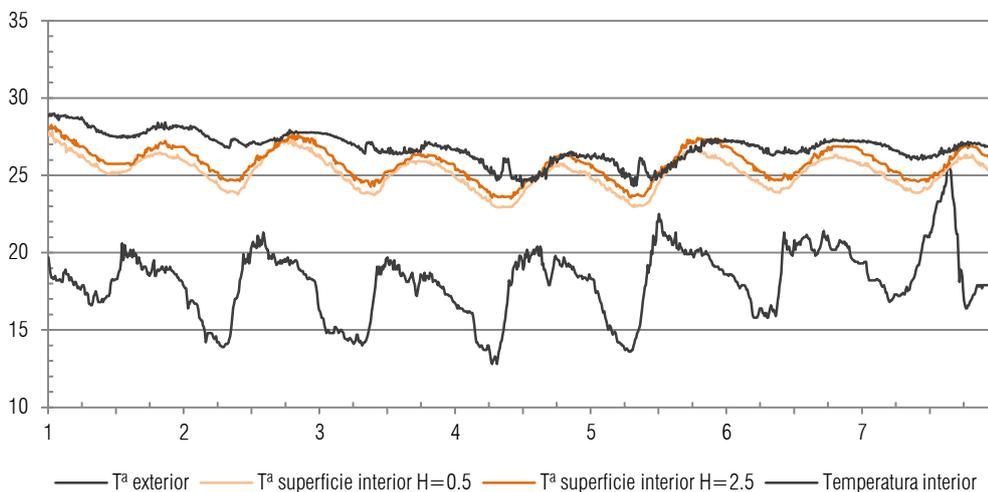
- MINISTERIO DE VIVIENDA. Código Técnico de la Edificación. *Documento Básico HE 1. Limitación de la demanda energética*. Madrid, 2009.

- *Datos de radiación solar*. [en línea]. En: Internet
<<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php?lang=es&map=europe>>
(consulta, 19 de julio de 2011).

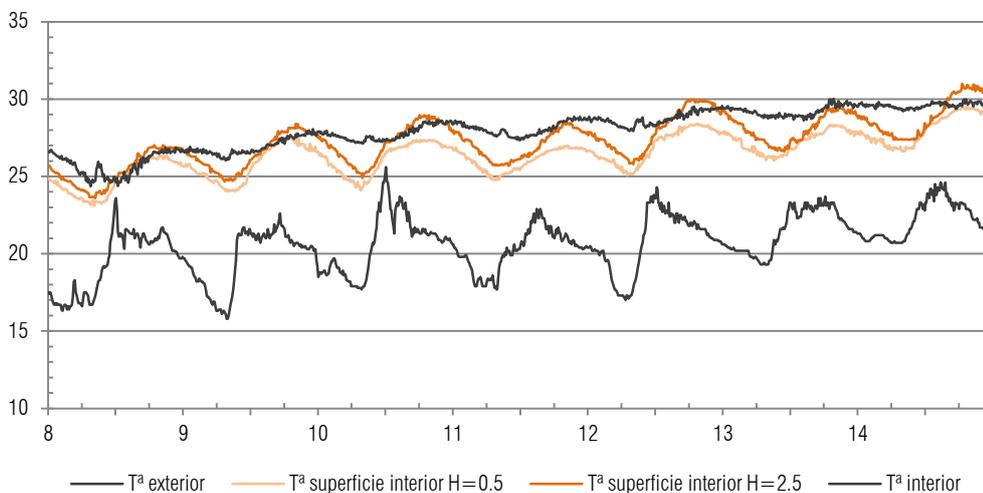
8.1. Anexo I. Gráficas de temperaturas reales.

El anexo I recoge la representación gráfica de los datos de temperaturas que se han obtenido a partir de las mediciones realizadas en el edificio. También se añadido la representación de los datos de temperaturas exteriores registrados en la estación meteorológica.

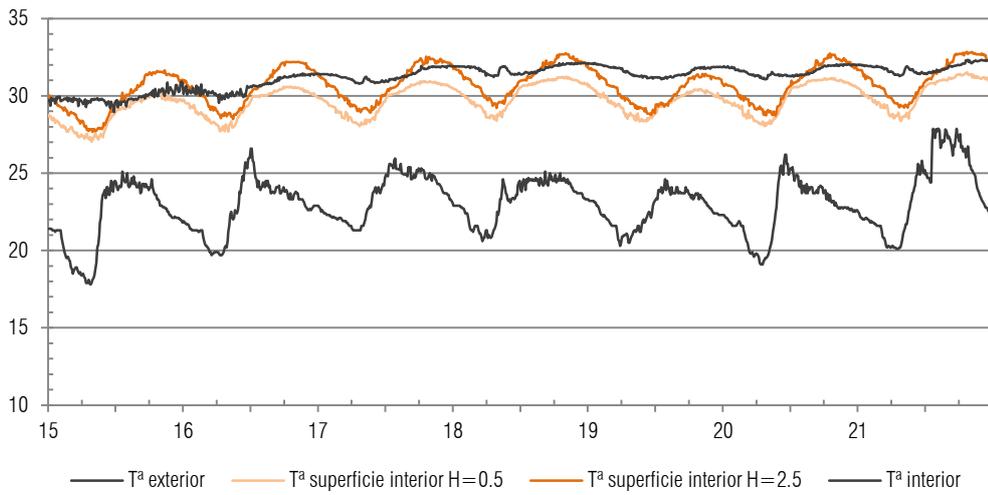
Gráfica 16. Temperaturas reales medidas in situ desde el día 1 al 7 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



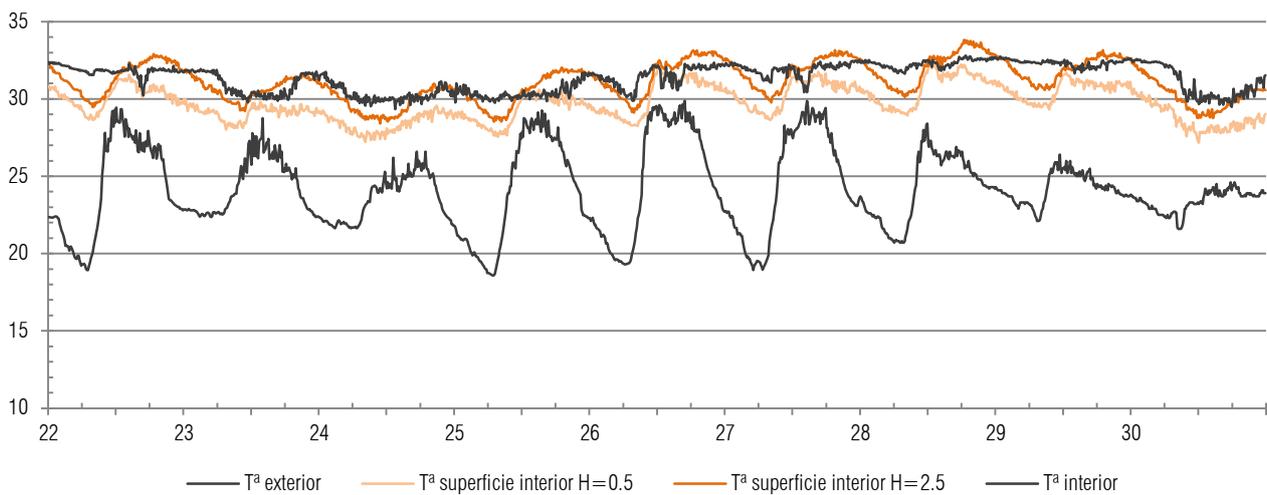
Gráfica 17. Temperaturas reales medidas in situ desde el día 8 al 14 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Gráfica 18. Temperaturas reales medidas in situ desde el día 15 al 21 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



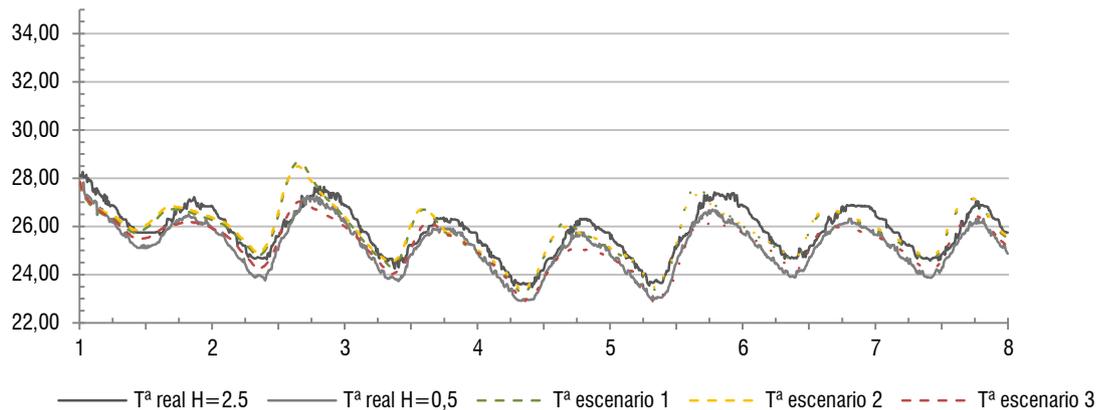
Gráfica 19. Temperaturas reales medidas in situ desde el día 22 al 30 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



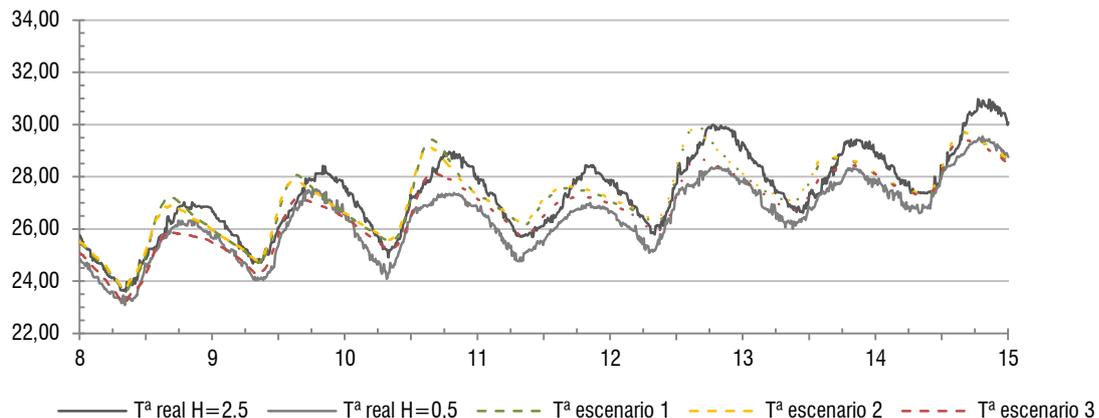
8.2. Anexo II. Gráficas de ajuste mes de junio.

El anexo II recoge la representación gráfica de los datos de temperaturas superficiales interiores medidas in situ en comparación con las simuladas para los tres escenarios planteados, función del coeficiente de convección.

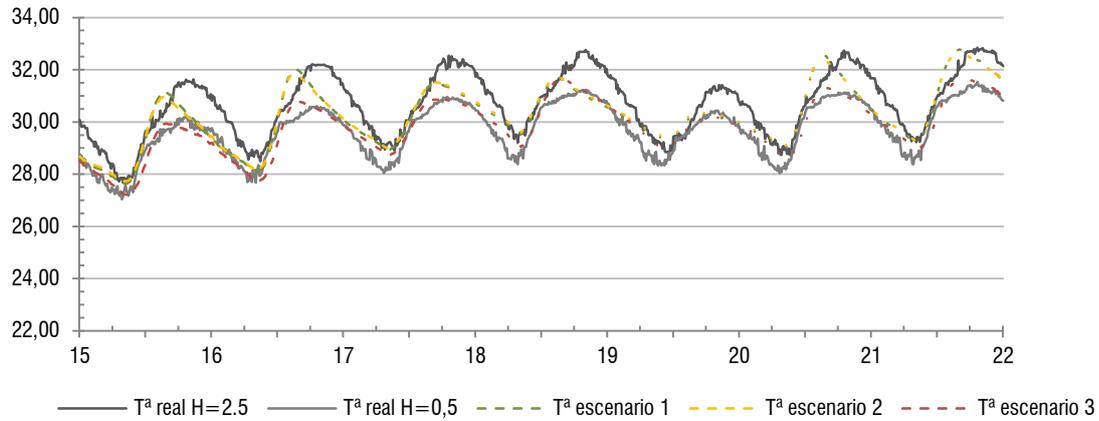
Gráfica 20. Comparación entre temperaturas superficiales reales y simuladas desde el día 1 al 7 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



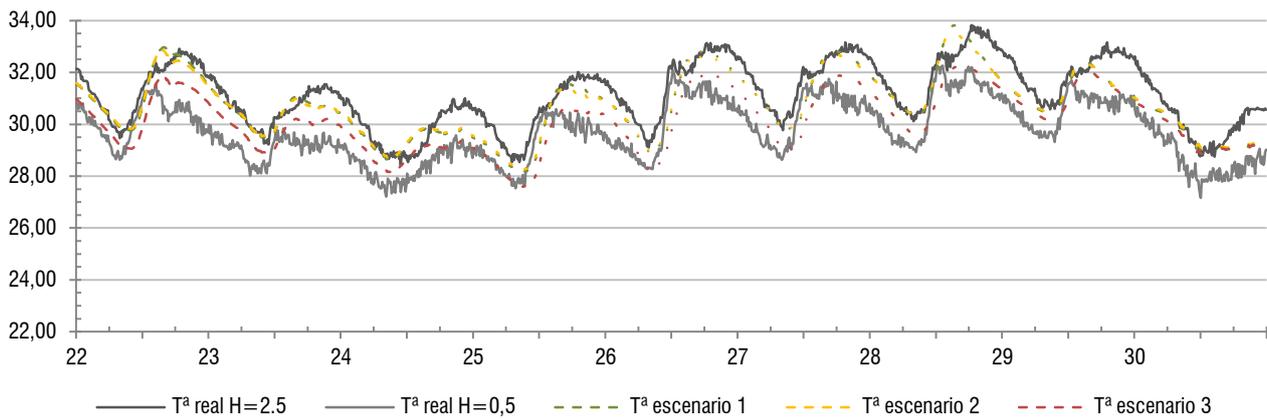
Gráfica 21. Comparación entre temperaturas superficiales reales y simuladas desde el día 8 al 14 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Gráfica 22. Comparación entre temperaturas superficiales reales y simuladas desde el día 15 al 21 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



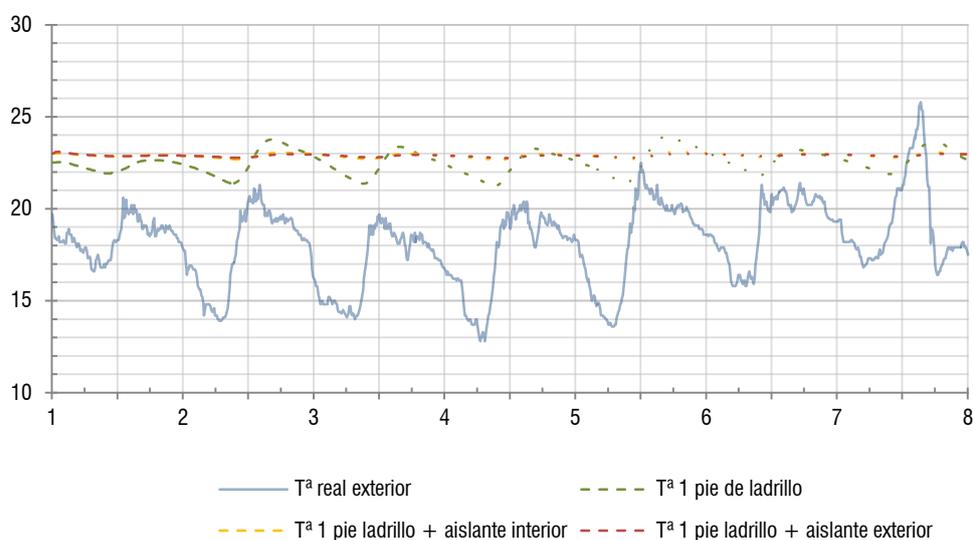
Gráfica 23. Comparación entre temperaturas superficiales reales y simuladas desde el día 22 al 30 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



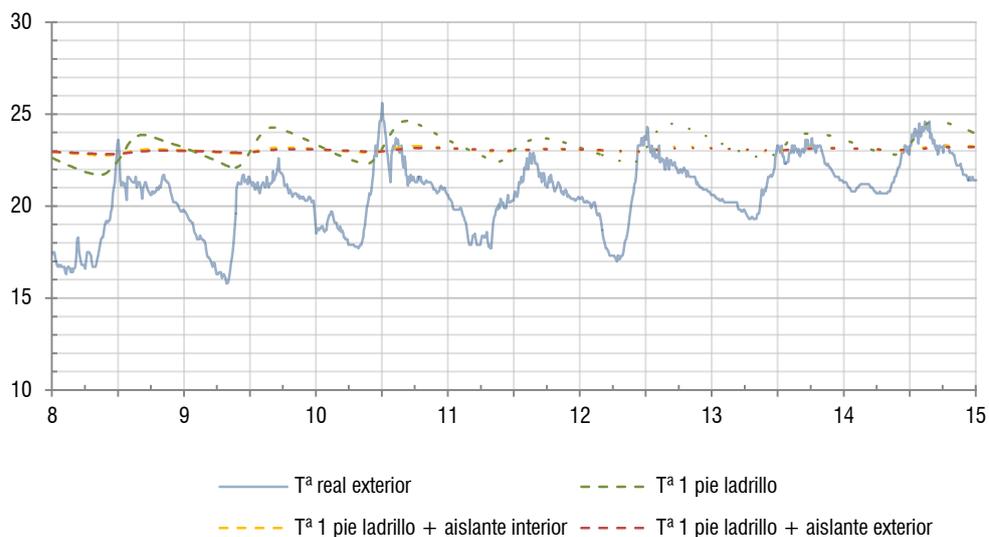
8.3. Anexo III. Gráficas simulación temperatura superficial interior mes de junio

El anexo III recoge la representación gráfica de los datos de temperaturas superficiales interiores simuladas para las tres soluciones constructivas propuestas. También se incluye la temperatura del aire exterior.

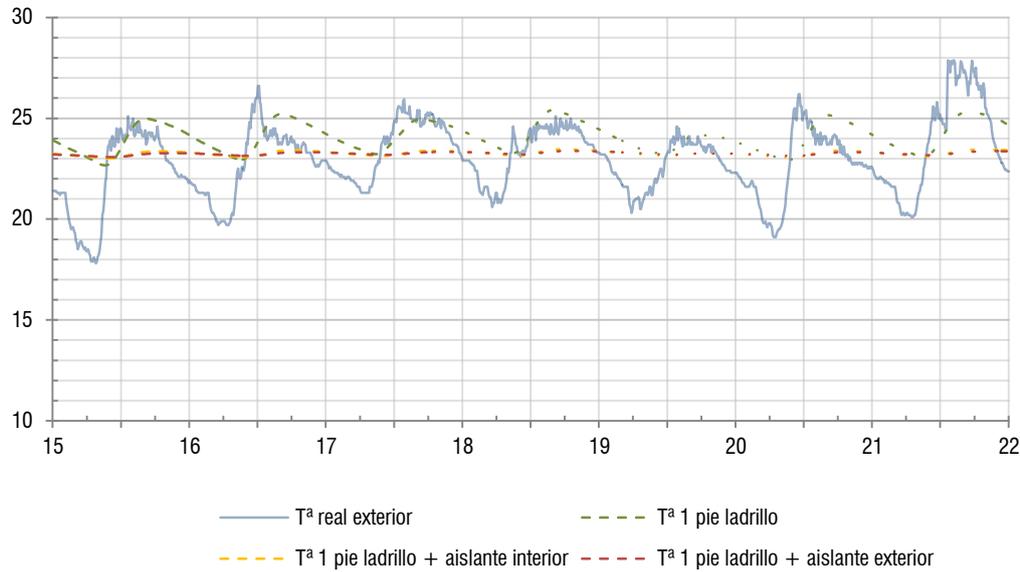
Gráfica 24. Temperaturas superficiales interiores para cada una de las tres soluciones constructivas, desde el día 1 al 7 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Gráfica 25. Temperaturas superficiales interiores para cada una de las tres soluciones constructivas, desde el día 8 al 14 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Gráfica 26. Temperaturas superficiales interiores para cada una de las tres soluciones constructivas. desde el día 15 al 21 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.



Gráfica 27. Temperaturas superficiales interiores para cada una de las tres soluciones constructivas. desde el día 22 al 30 junio, ambos inclusive. Abscisas: tiempo en días. Ordenadas: temperatura en grados centígrados.

