

# TEMA 3

## PRINCIPIOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EDIFICACIÓN

ZALOA AZKORRA LARRINAGA – ÁLVARO CAMPOS CELADOR – AITOR ERKOREKA GONZÁLEZ  
IVÁN FLORES ABASCAL – ESTÍBALIZ INTXAURBE FERNÁNDEZ– JON TERÉS ZUBIAGA



Makina eta Motor  
Termikoak Saila  
Departamento de Máquinas  
y Motores Térmicos



## ÍNDICE DEL TEMA

1. **Objetivos**
2. **Transmisión de Calor. Principios físicos**
  1. Conducción
  2. Convección
  3. Radiación
3. **Mecanismos de Transferencia de calor en la edificación**
  1. Conducción unidireccional-multidireccional
  2. Convección natural - forzada
  3. Radiación interior - exterior
4. **Parámetros característicos**
  1. Conductividad térmica
  2. Resistencia térmica
  3. Transmitancia térmica
  4. Factor solar
5. **Análisis térmico en la edificación**
  1. Régimen estacionario
  2. Régimen dinámico
6. **Bibliografía**



## 1. OBJETIVOS

- Tener una idea general de los principios básicos de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación
- Aplicar los conocimientos generales de transferencia de calor a los casos que se dan en la edificación
- Identificar los parámetros más característicos referidos a la transferencia de calor en la construcción
- Conocer las características básicas del análisis de transferencia de calor en régimen estacionario y en régimen dinámico.



### 2. TRANSMISIÓN DE CALOR. Principios físicos



Fig. 1. [Fuente](#)



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

*Dos cuerpos a diferente temperatura intercambian energía en forma de calor hasta que desaparece esa diferencia de temperaturas.*

Existen 3 mecanismos fundamentales de transmisión de calor:

Conducción      Convección      Radiación

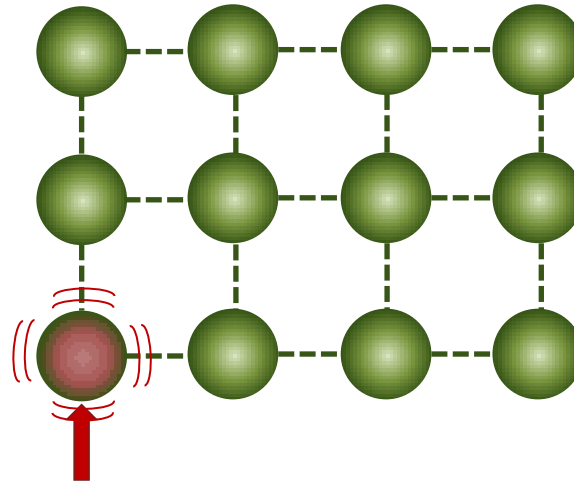


## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.1. Conducción

Es el mecanismo de transmisión de calor asociado al intercambio de energía interna de rotación y vibración de las moléculas mediante colisiones entre si. Se puede dar de tres formas diferentes:

- Vibración individual de cada molécula (sólidos amorfos)
- Vibración del conjunto de la red cristalina (sólidos cristalinos)
- Migración de los electrones libres (sólidos metálicos)





## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.1. Conducción

Es el mecanismo de transferencia entre sólidos en contacto o entre zonas de un sólido que se encuentra a diferentes temperaturas. Aunque en menor cuantía, se produce también en líquidos y gases.

Características:

- Requiere un medio material.
- Directamente proporcional a la conductividad del material ( $\lambda$ ).
- Directamente proporcional a la superficie de intercambio.
- Directamente proporcional al salto térmico.

Ley de Fourier

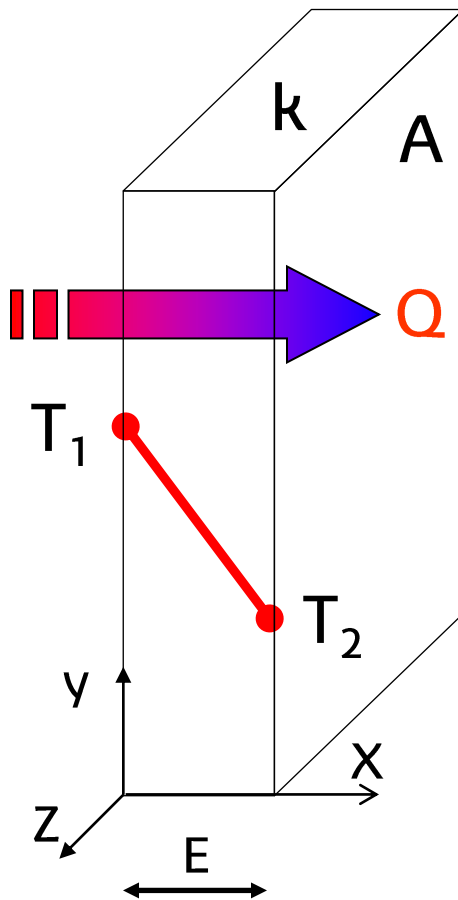
$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \text{grad } \theta$$



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.1. Conducción

Conducción. Pared plana sin fuentes (no activa)



$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{E} \cdot x$$
$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{E}$$



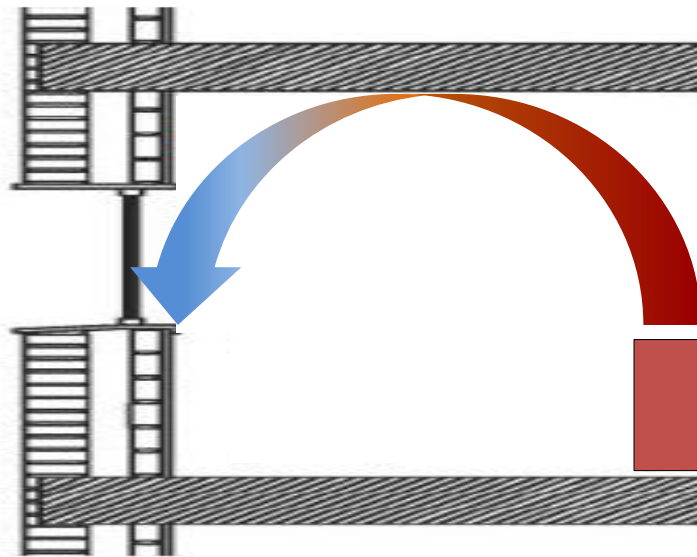


## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.2. Convección

Es el mecanismo de transmisión del calor mediante la acción conjunta de la conducción (en el ámbito molecular) y del movimiento del conjunto de la masa (en el ámbito microscópico). Puede ser de dos tipos:

#### Natural



#### Forzada

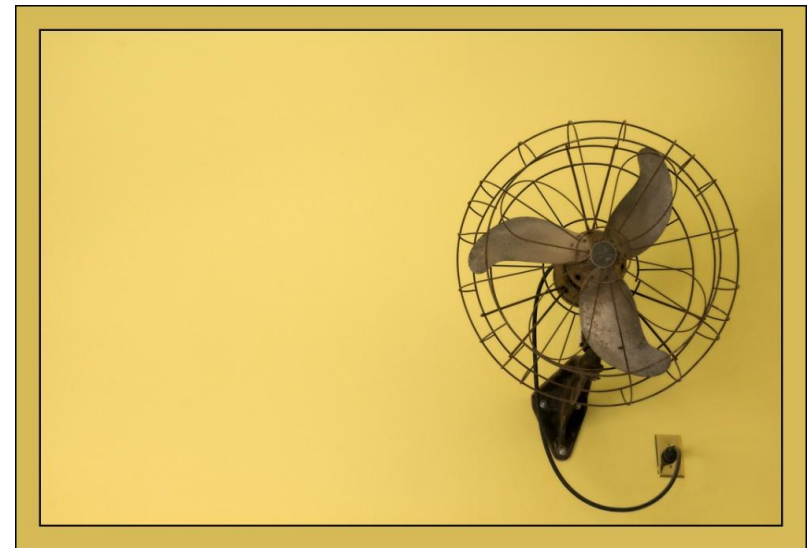


Fig. 2. [\[Fuente\]](#)



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.2. Convección

- Requiere un medio material (sólo líquidos y gases).
- Directamente proporcional al medio ( $h$ ).
- Directamente proporcional al salto térmico.

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_w - T_\infty) = h \cdot A \cdot DT$$

Ley de Newton

El coeficiente de convección  $h$ , depende del fluido, de la velocidad del mismo, de la rugosidad de la superficie, de la posición de la superficie, etc.



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

Proceso de transferencia de calor que se establece entre cuerpos a diferente temperatura mediante la emisión y absorción de fotones.

Todos los cuerpos emiten y absorben radiación a temperaturas superiores al cero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ).

A diferencia de la conducción y la convección, la radiación sí se transmite en el vacío.



Fig. 3. [\[Fuente\]](#)

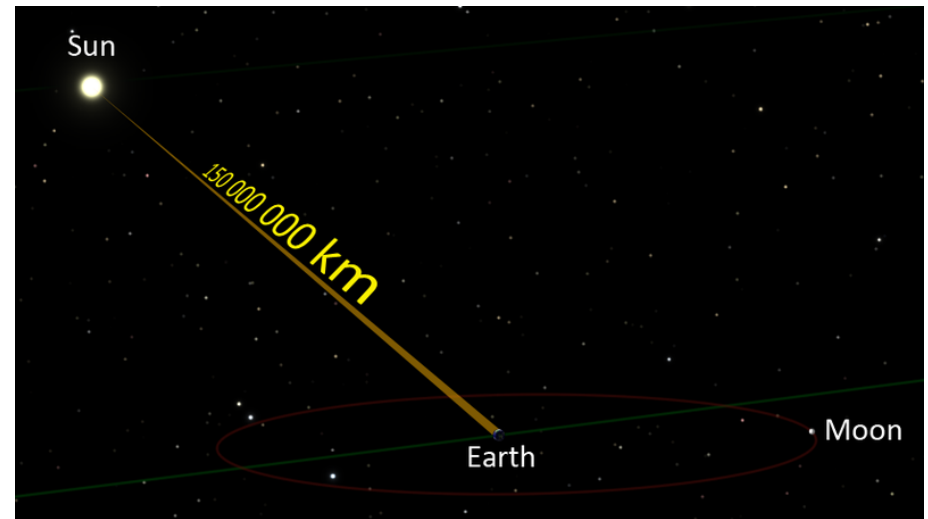


Fig. 4. [\[Fuente\]](#)

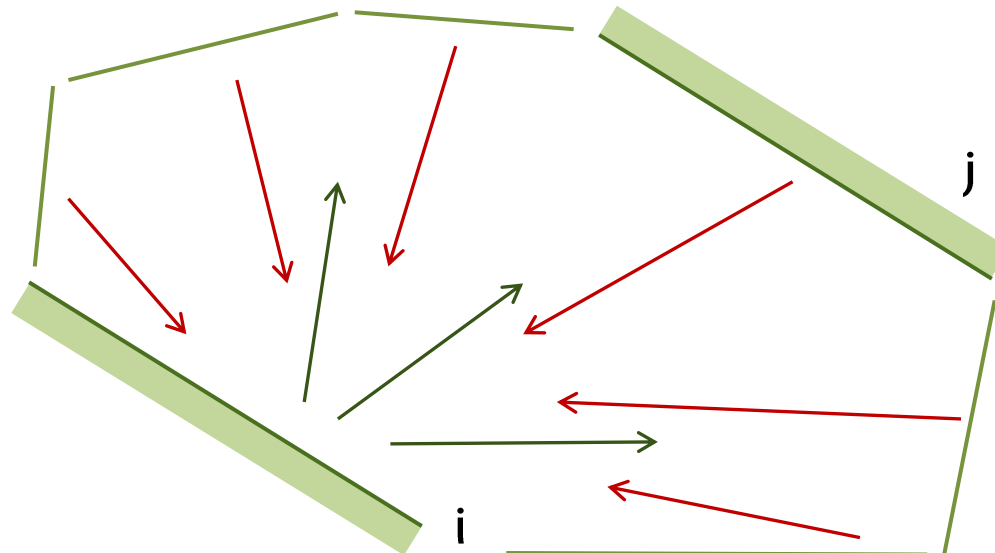


## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### INTERCAMBIO RADIANTE EN UNA SUPERFICIE

Se establece como la diferencia entre la energía emitida por la superficie y la fracción de energía que emiten las demás superficies que es absorbida por dicha superficie.





## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### CUERPO RADIANTE

Se trata de una superficie ideal que absorbe toda la radiación que le llega. Para una misma temperatura es el que mayor energía emite.

La energía que emite un cuerpo negro que se encuentra a una temperatura T viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$E_n(T) = \sigma \cdot T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$



En la transmisión de calor por radiación la temperatura debe ir expresada en K





## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### EMISIVIDAD

Propiedad de los materiales. Representa el cociente entre la energía que emite la superficie del material considerado por estar a una temperatura T y la que emitiría un cuerpo negro que estuviese a la misma temperatura.

Sus valores están comprendidos entre 0 y 1.

#### Valores típicos:

Acabados normales. 0,9

Películas metálicas y pinturas especiales. 0,03 – 0,2

$$\varepsilon = \frac{E(T)}{E_n(T)}$$

**CTE** Capacidad relativa de un material para radiar calor



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### EMISIÓN

La energía (W) que emite un cuerpo que se encuentra a una temperatura T es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, a su emisividad, a la constante de Stefan-Boltzmann y a su superficie.

$$E(T) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

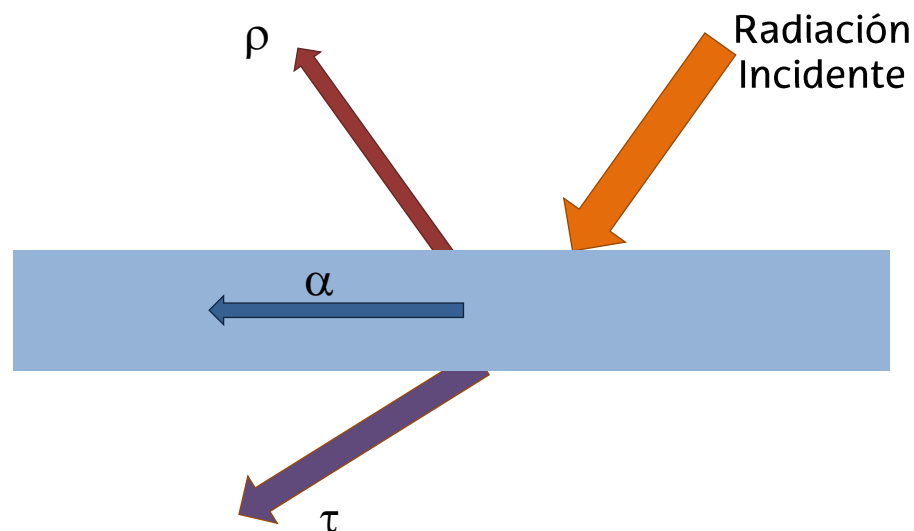
### 2.3. Radiación

#### RECEPCIÓN

De la radiación que llega a una superficie, una parte se refleja, otra se absorbe y otra se transmite.

Se verifica:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



Absortividad + Reflectividad + Transmisividad = 1

Las propiedades son función de la longitud de onda.





## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### TRANSMISIVIDAD

La transmisividad divide a los cuerpos en opacos ( $\tau = 0$ ) y semitransparentes ( $\tau \neq 0$ ).

Los acristalamientos son semitransparentes para la onda corta.

Todos los cuerpos son opacos para la onda larga.

El aire es transparente en las dos bandas.

#### Valores típicos de $\tau$ .

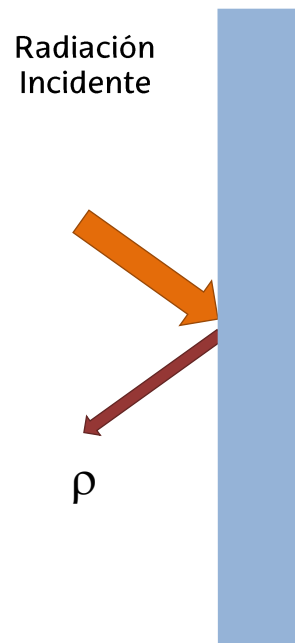
- vidrio simple claro: 0,8
- vidrio simple tintado: 0,6

## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

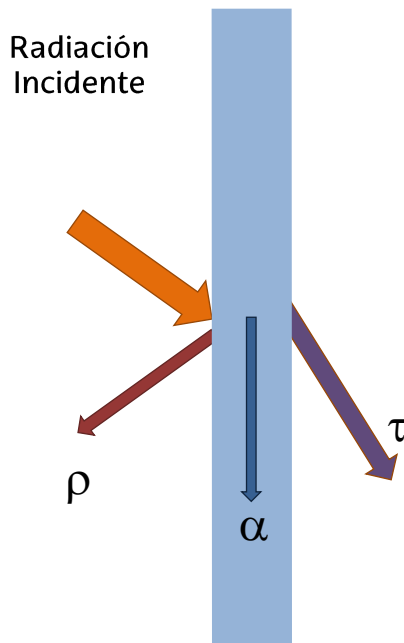
### 2.3. Radiación

#### ABSORCIÓN

En los materiales opacos es una absorción superficial mientras que en los transparentes es una absorción volumétrica.



OPACO



TRANSPARENTE



Fig. 5. [\[Fuente\]](#)



## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### ABSORTIVIDAD

Expresa el porcentaje de radiación solar incidente que es absorbida por una superficie. Sus valores están comprendidos entre 0 y 1. El valor de 1 corresponde al cuerpo negro (superficie ideal).

#### Valores típicos de $\alpha$ :

Para onda larga: 0,9 (excepto películas metálicas 0,05 – 0,2)

Para onda corta (dependen del color).

Color	Claro	Medio	Oscuro
Blanco	0,20	0,30	-
Amarillo	0,30	0,50	0,70
Beige	0,35	0,55	0,75
Marrón	0,50	0,75	0,92
Rojo	0,65	0,80	0,90
Verde	0,40	0,70	0,88
Azul	0,50	0,80	0,95
Gris	0,40	0,65	-
Negro	-	0,96	-

## 2. TRANSMISIÓN DE CALOR

### 2.3. Radiación

#### CARACTERÍSTICAS

- NO requiere un medio material.
- Directamente proporcional a la constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

- Directamente proporcional a la emisividad de la superficie ( $\epsilon$ ).
- Depende de la cuarta potencia de la temperatura ( $T^4$ )
- Importante a altas temperaturas.
- Los cuerpos entorpecen su transmisión.



### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

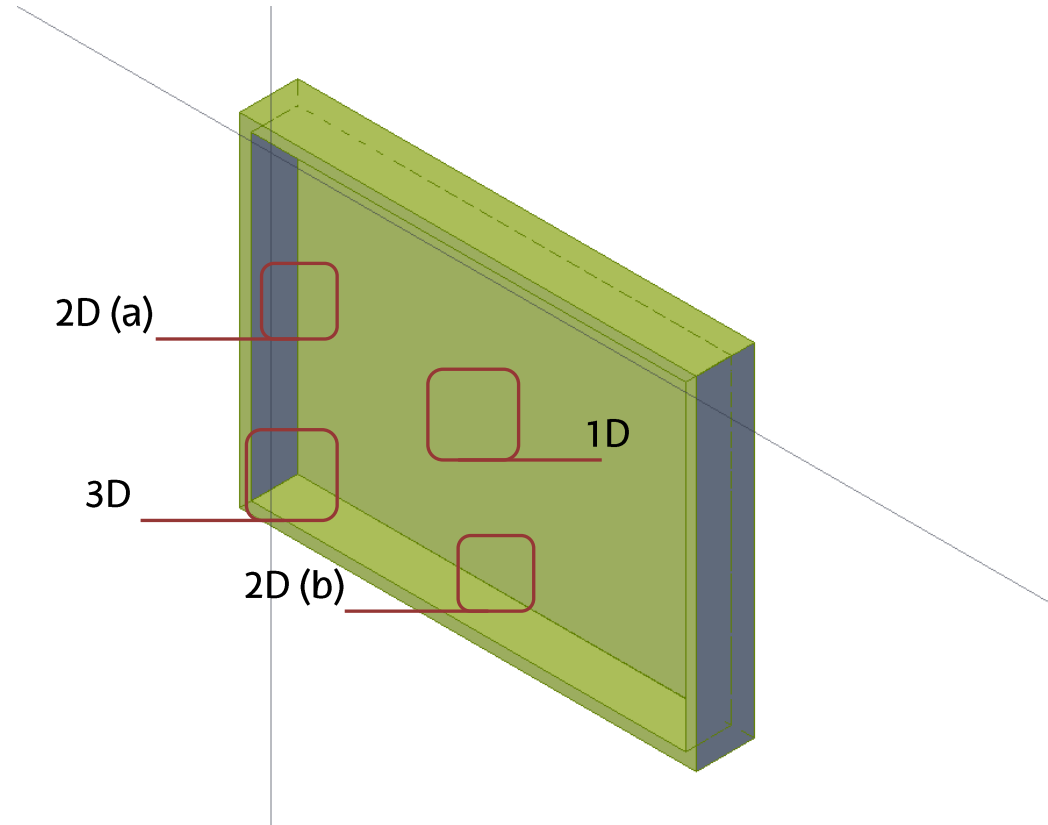


Fig. 6. [Fuente](#)



### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

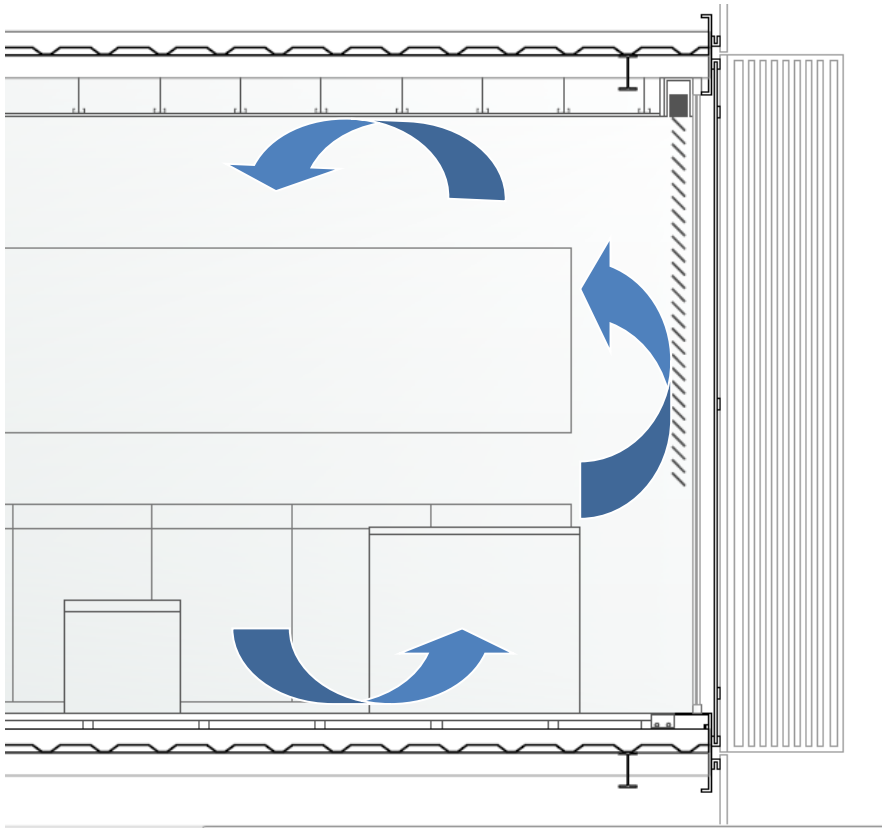
#### 3.1. Conducción unidireccional-multidimensional



### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

#### 3.2. Convección natural - forzada

#### CONVECCIÓN EN EL INTERIOR DEL EDIFICIO



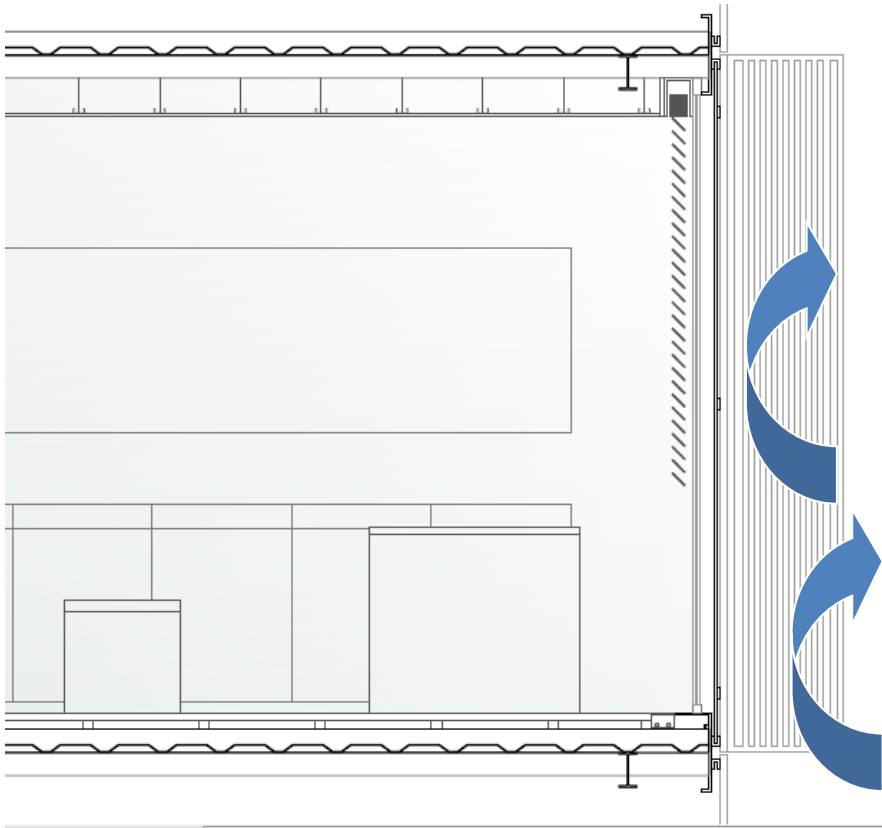
Convección natural

$$Q = h (T_{\text{sup}} - T_{\text{aire}})$$

### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

#### 3.2. Convección natural - forzada

##### CONVECCIÓN EN EL EXTERIOR DEL EDIFICIO



Convección forzada

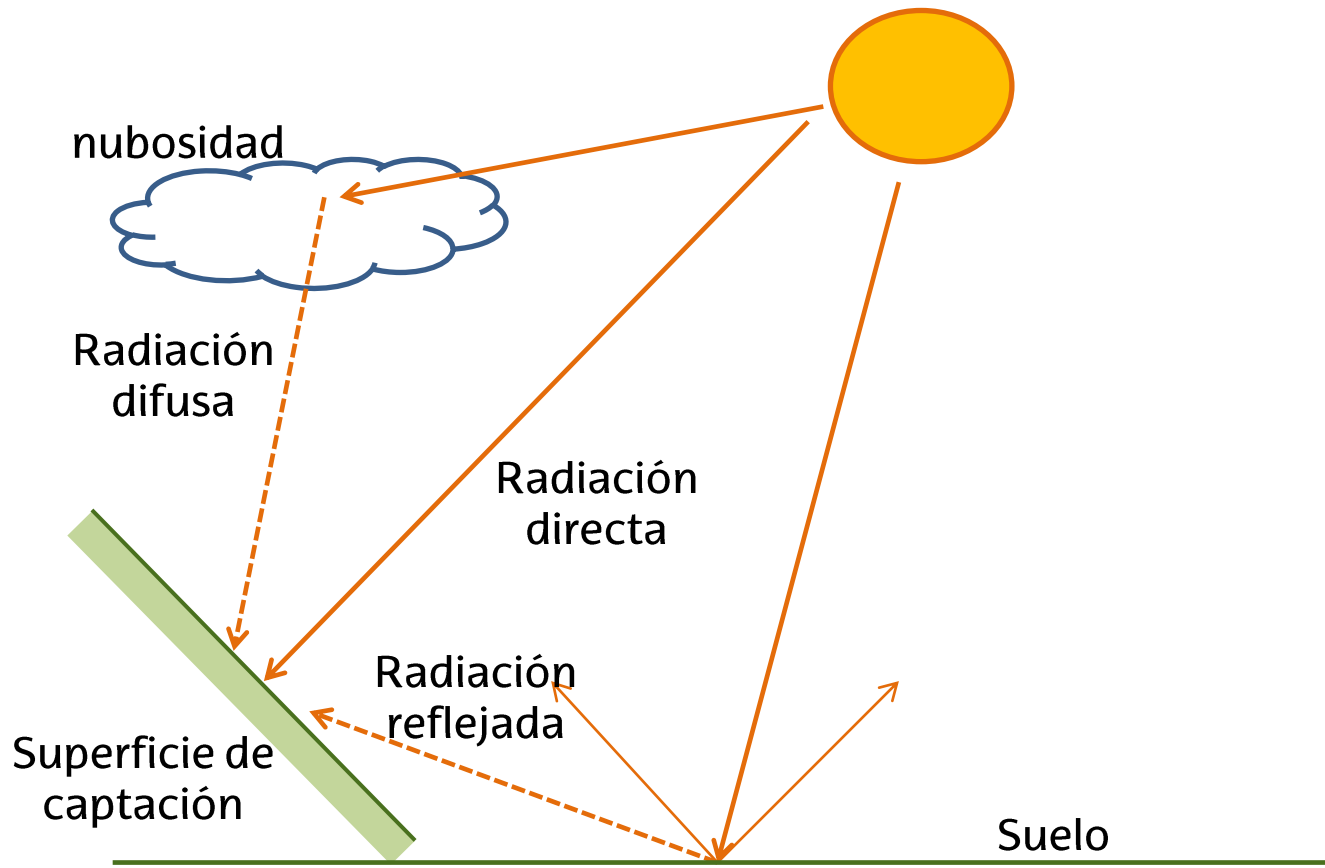
$$Q = h (T_{\text{sup}} - T_{\text{aire}})$$



### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

#### 3.3. Radiación interior - exterior

##### RADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES EXTERIORES

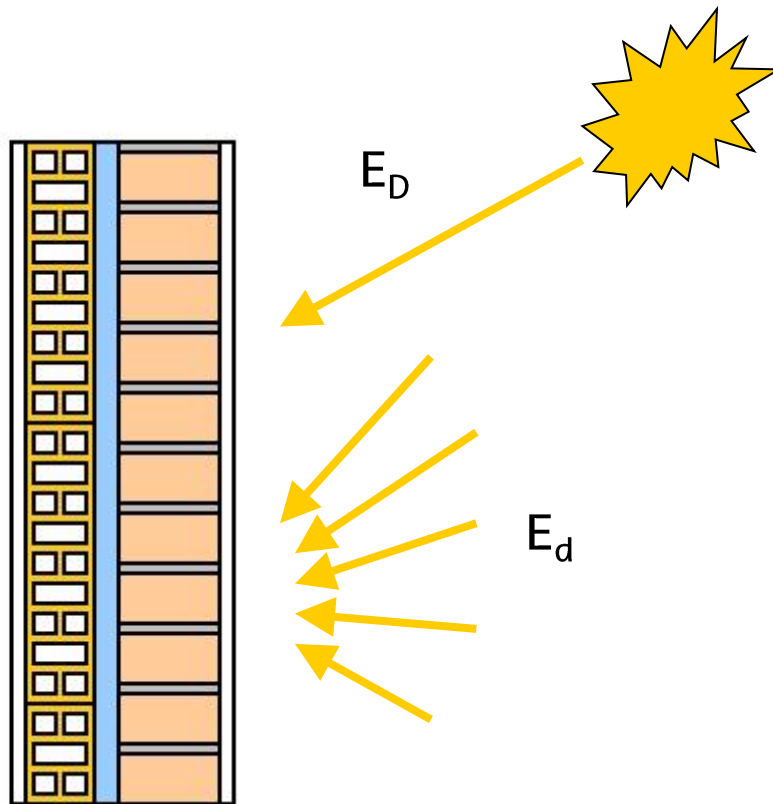


### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

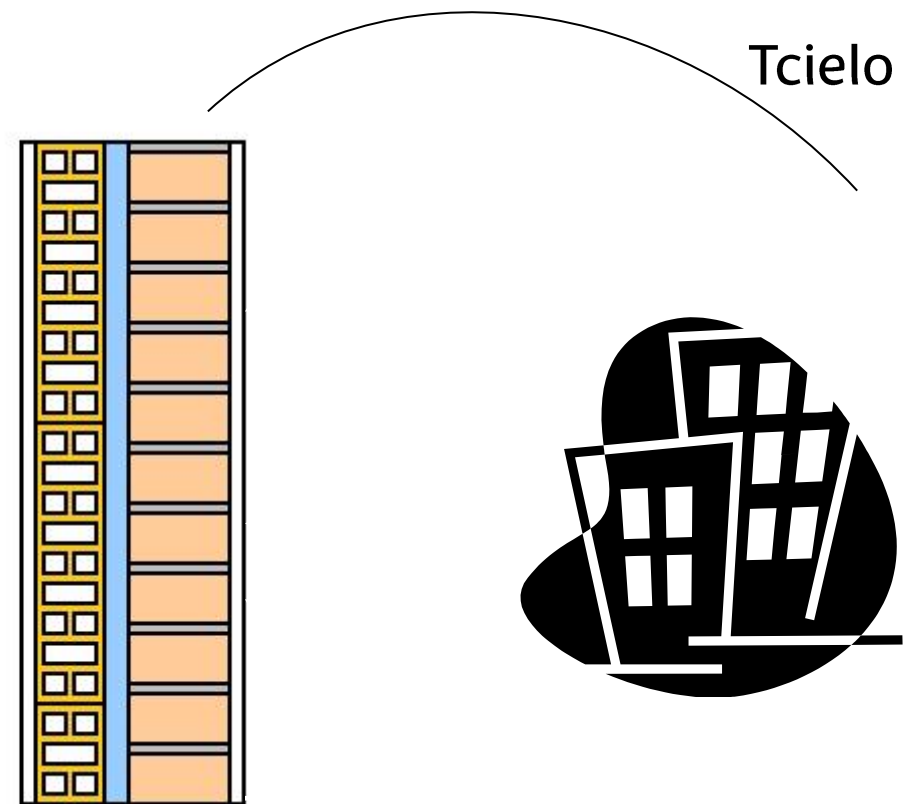
#### 3.3. Radiación interior - exterior

##### RADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES EXTERIORES

###### ONDA CORTA



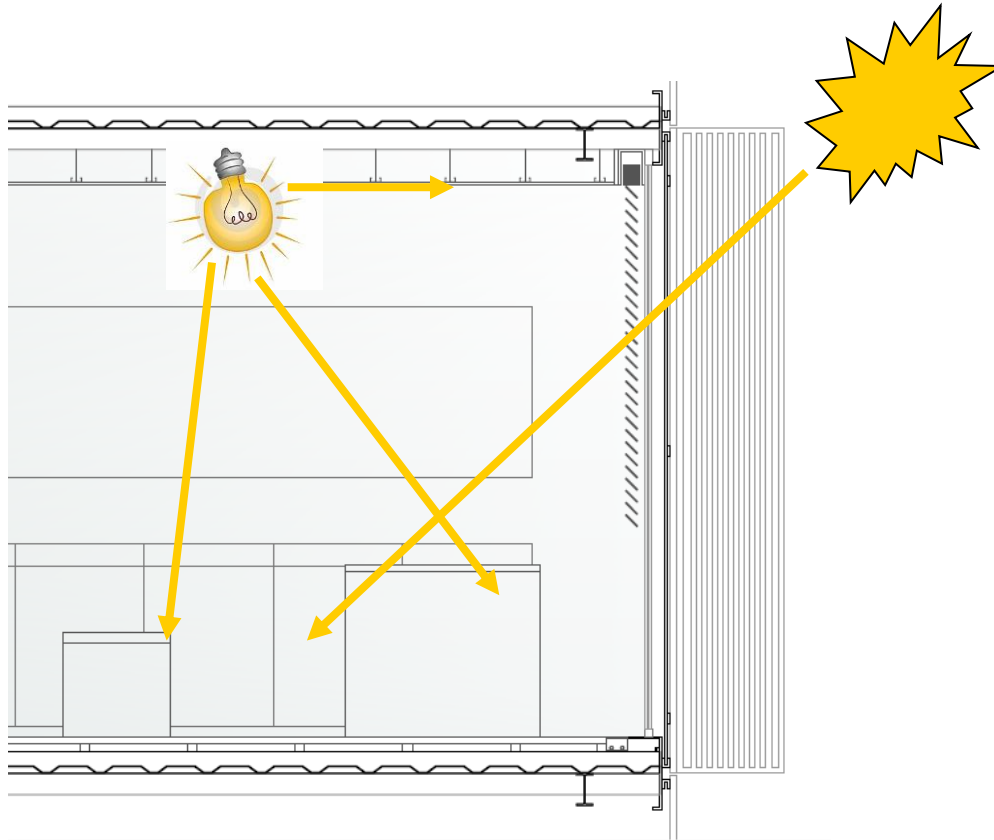
###### ONDA LARGA



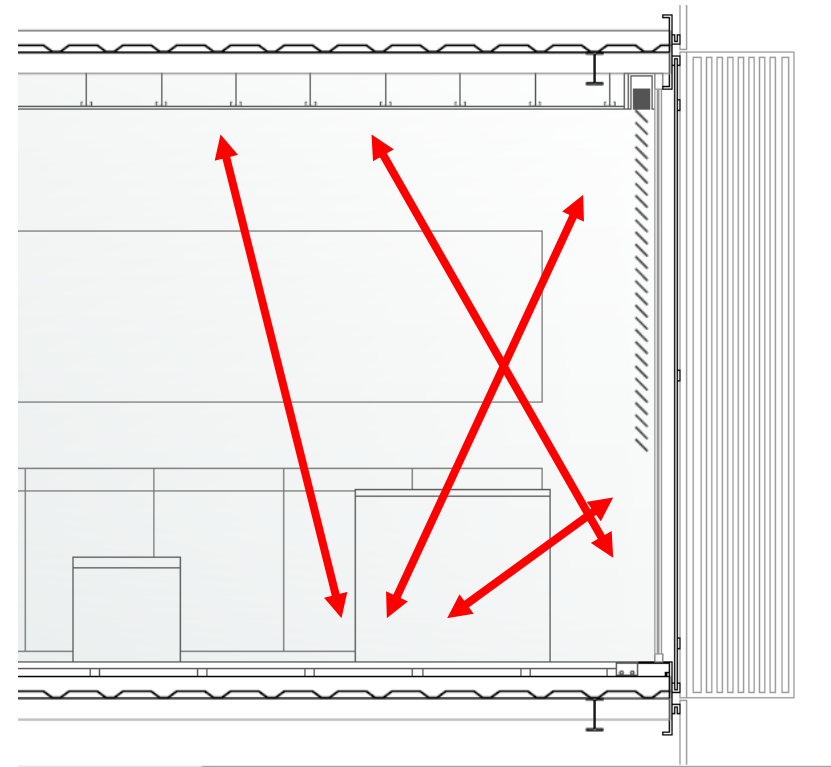
### 3. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL EDIFICIO

#### 3.3. Radiación interior - exterior

##### RADIACIÓN SOBRE SUPERFICIES INTERIORES



ONDA CORTA



ONDA LARGA



### 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS



Fig. 7. [Fuente](#)



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.1. Conductividad térmica

Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducir el calor a través de ellos. Se representa por la letra griega  $\lambda$  y sus unidades en el S.I. son  $W/m \cdot K$ .

Es una propiedad dependiente de la temperatura, aumentando generalmente en los sólidos a medida que aumenta la temperatura. Igualmente depende del contenido de humedad del material.

A nivel de caracterización térmica se suelen dar los valores a  $10\text{ }^{\circ}C$  ó a  $23\text{ }^{\circ}C$ , con un contenido en humedad correspondiente al equilibrio con una ambiente a  $23\text{ }^{\circ}C$  y  $50\% Hr$ , ó a  $105\text{ }^{\circ}C$  y  $0\%$  de  $Hr$ .

Material	$\lambda$ (W/m.K)
Aluminio	237
Acero	52
Hormigón Armado	2,3
Mortero	1,3
Vidrio	0,9
Agua	0,6
Madera	0,14
Poliuretano	0,03
Aire (en reposo)	0,025

Conductividad térmica de algunos de los materiales más habituales en construcción



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.1. Conductividad térmica

#### OBTENCIÓN DE VALORES

Los valores para diferentes materiales de construcción se pueden obtener de diferentes fuentes:

- ENSAYOS (según UNE-EN 12667 ó UNE-EN 12664)
- NORMAS (UNE-EN 1745: 2002)
- BASES DE DATOS (LIDER)
- DOCUMENTOS RECONOCIDOS



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

Propiedad física de los materiales dependiente del espesor. Se suele usar para caracterizar los materiales heterogéneos. Se representa por la letra R y sus unidades en el S.I. son  $m^2 \cdot K/W$ .

Presenta una dependencia con la temperatura inversa a la de la conductividad.

Para materiales homogéneos:

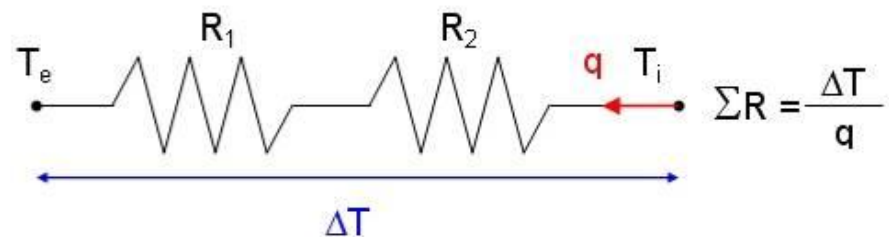
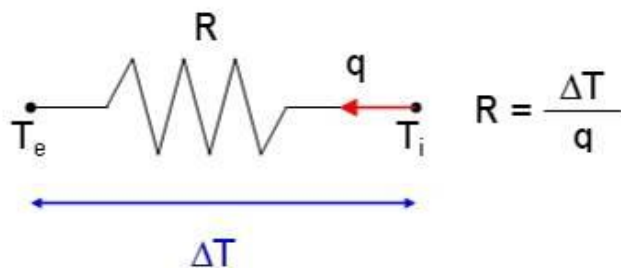
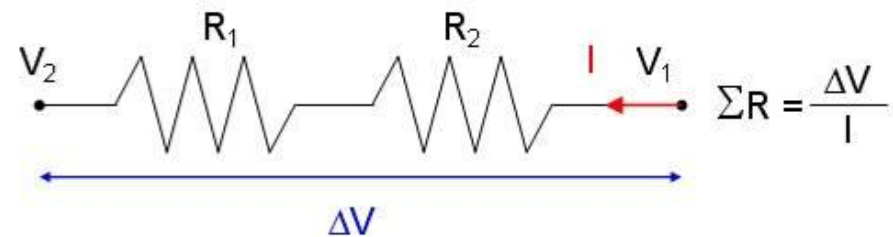
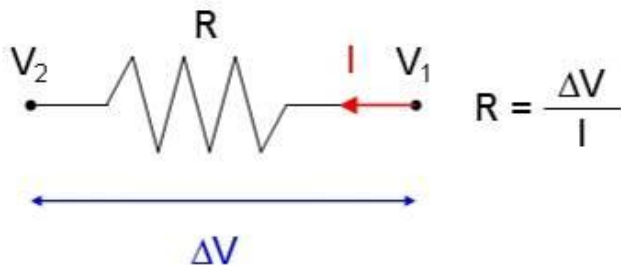
$$R = \frac{e}{k}$$

## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### RESISTENCIA TÉRMICA Y ANALOGÍA ELÉCTRICA

Basándose en la analogía eléctrica, permite caracterizar no solo materiales sino soluciones constructivas







## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### RESISTENCIA TÉRMICA Y ANALOGÍA ELÉCTRICA

Los valores de resistencia térmica se pueden obtener por diferentes métodos:

##### - Valores tabulados:

- \* Norma UNE-EN 1745: 2002.
- \* Base de datos (LIDER).
- \* Documentos reconocidos (catálogo de elementos constructivos).

##### - Ensayos

- \* Equipo de caja caliente guardada o calibrada.

##### - Simulaciones

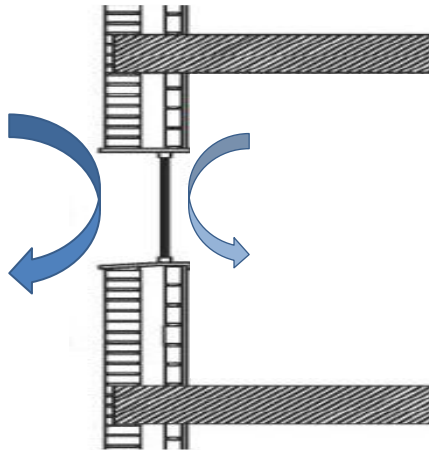
### 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

#### 4.2. Resistencia térmica

##### RESISTENCIA TÉRMICA DEL AIRE

Se mide igualmente en  $m^2 \cdot K / W$  pero hay que distinguir dos situaciones:

- El aire ambiente. En este caso se denomina **Resistencia superficial** y desde el punto de vista del cálculo puede ser **exterior** o **interior**.
- El aire como cámara de aire confinada entre dos capas de materiales.





## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### RESISTENCIA TÉRMICA SUPERFICIAL

$h_c$  depende de la velocidad del aire (a mayor velocidad más transmisión de calor y menos resistencia) y de la dirección del flujo de calor.

El coeficiente de convección interior  $h_{ci}$  vale:

Para flujo de calor hacia arriba	$h_{ci} = 5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Para flujo de calor horizontal	$h_{ci} = 2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$
Para flujo de calor hacia abajo	$h_{ci} = 0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

A su vez el coeficiente de convección exterior  $h_{ce}$  vale [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ]

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v$$



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### RESISTENCIA TÉRMICA SUPERFICIAL

A efectos de cálculo y dimensionado se adoptan unos valores normalizados.

Resistencias superficiales normalizadas [ $m^2.K/W$ ]			
	Dirección del flujo de calor		
	Hacia arriba	Horizontal	Hacia abajo
Resistencia superficial interior	0,10	0,13	0,17
Resistencia superficial exterior	0,04	0,04	0,04



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE

Depende de la dirección del flujo de calor (horizontal, ascendente o descendente) y del grado de ventilación (cámaras de aire sin ventilar, ligeramente ventiladas o muy ventiladas).

Aumenta con el espesor pero llega un momento que los efectos convectivos del aire hacen que se sature su valor, de tal forma que

|| → **NO SE PUEDE** ← ||

obtener directamente como el cociente entre espesor y conductividad térmica.



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE

Para cámaras sin ventilar (anchura y longitud al menos 10 veces superior al espesor) la resistencia térmica se obtiene como:

$$R_s = \frac{1}{h_a + h_r}$$

Donde  $h_a$  es el coeficiente de conducción – convección

Para flujo de calor hacia arriba	$h_a = \max (1,95; 0,025/d)$
Para flujo de calor horizontal	$h_a = \max (1,25; 0,025/d)$
Para flujo de calor hacia abajo	$h_a = \max (0,12 \cdot d^{-0,44}; 0,025/d)$

siendo  $d$  el espesor del hueco en la dirección del flujo de calor.



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE

$h_r$  depende de las emisividades de las superficies.

$$h_r = E \cdot h_{r0}$$

E es el factor de emisividad de las superficies.

$$E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$$



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE

Para los cálculos se suelen usar valores tabulados

Espesor de la Cámara de Aire	Dirección del flujo de calor		
	Mm	Hacia arriba	Horizontal
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Resistencia Térmica (en  $m^2.K/W$ ) de cámaras de aire sin ventilación. Superficies de alta emisividad

Fuente: CTE (2006)





## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE

Para **cámaras ligeramente ventiladas** el valor de la resistencia es la mitad de los valores anteriores.

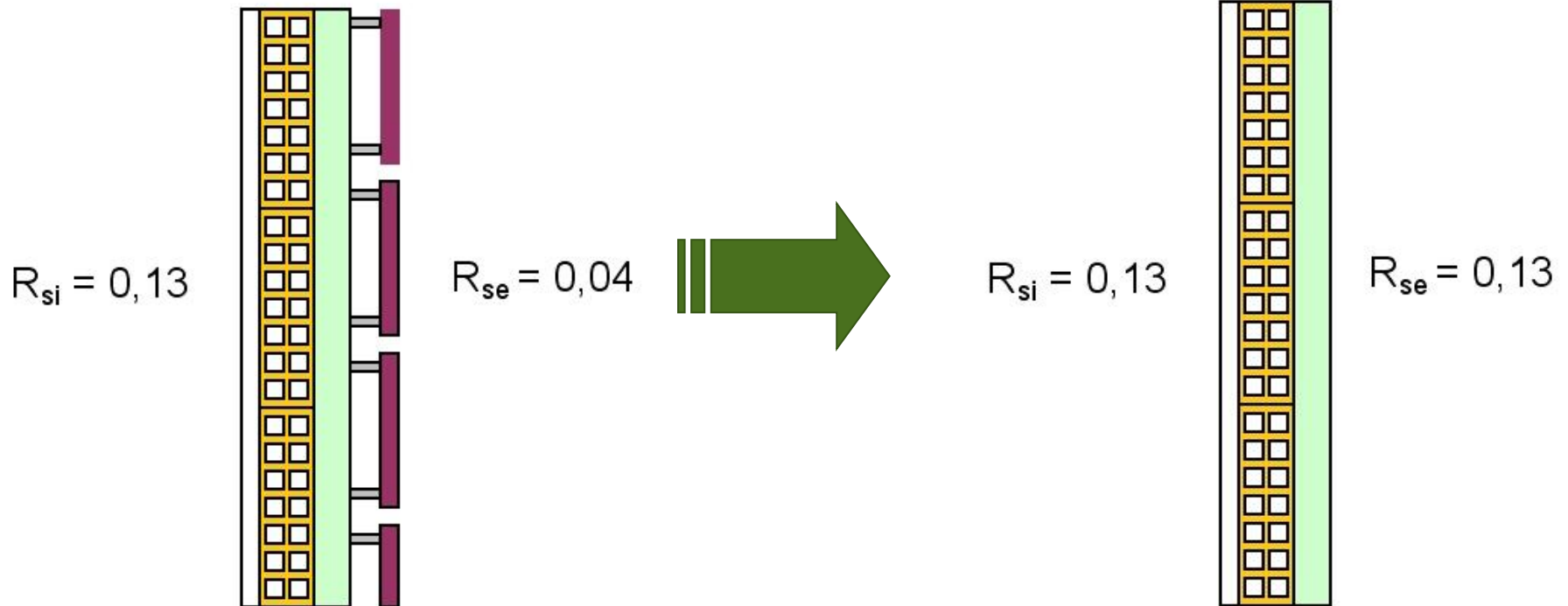
Para **cámaras de aire muy ventiladas**, la resistencia térmica total de la solución constructiva se obtiene despreciando la resistencia de la cámara de aire y del resto de elementos entre la cámara de aire y el ambiente exterior y sustituyendo la resistencia superficial exterior por una resistencia para aire en calma, de valor igual a la resistencia superficial interior.



## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.2. Resistencia térmica

#### CÁMARAS DE AIRE (MUY VENTILADAS)





## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.3. Transmitancia térmica

Es la inversa de la resistencia térmica total. Es equivalente a un coeficiente global de transmisión, representando la cantidad de energía que se transmite por m<sup>2</sup> de un material, cerramiento, etc. para una determinada diferencia de temperatura. Se representa por la letra U y se mide en W/m<sup>2</sup>·K.

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}} = \frac{1}{R_{\text{si}} + \sum R_i + R_{\text{se}}}$$

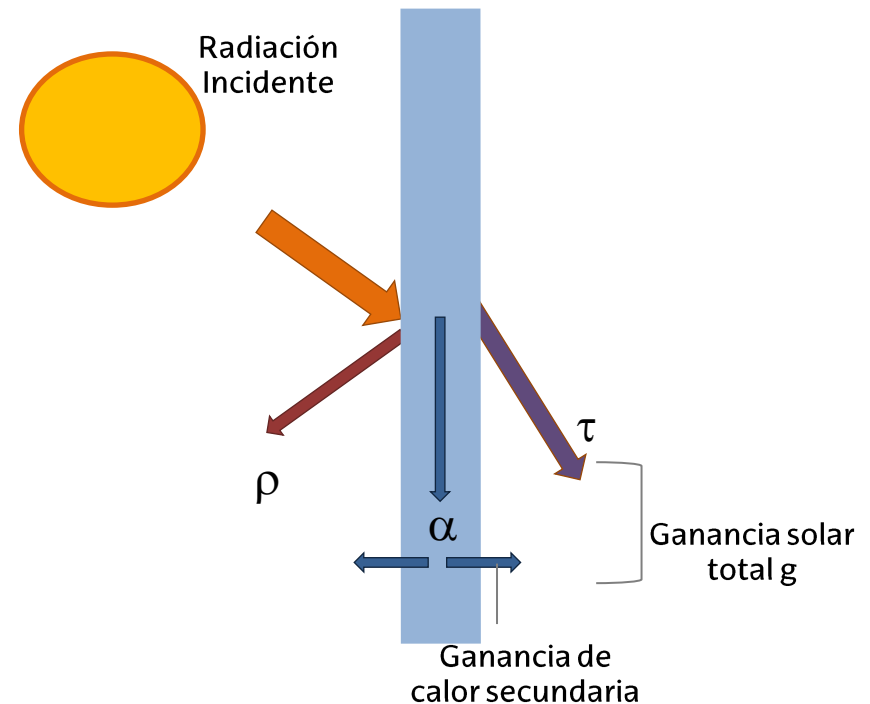
Hasta Septiembre-2013 era uno de los principales parámetros empleados para verificar el cumplimiento normativo del CTE-HE1.

### 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

#### 4.4. Factor Solar

Es el cociente entre la radiación solar a incidencia normal que atraviesa el material y la que se introduciría si el material fuese totalmente transparente.

Depende del ángulo de incidencia, por lo que a nivel de caracterización térmica se suelen dar los valores a "incidencia normal". Es adimensional.





## 4. PROPIEDADES FÍSICAS Y PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

### 4.4. Factor Solar

#### OBTENCIÓN DE VALORES

Los valores del factor solar se pueden obtener por diferentes métodos:

- Método de la Norma UNE-EN 410:1998. *Emisividades espectrales a incidencia normal*
- Ensayos
- Valores tabulados (LIDER)



### 5. ANÁLISIS TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN



Fig. 8. [Fuente](#)



## 5. ANÁLISIS TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN

### 5.1. Introducción

Existen dos tipos principales de análisis térmico en la edificación, de distinto nivel de complejidad:

- Análisis en régimen estacionario
- Análisis en régimen dinámico



## 5. ANÁLISIS TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN

### 5.2. Régimen estacionario

Las propiedades que “hasta hace unos días” se exigían desde un punto de vista de cumplimiento normativo y legal se basaban en el régimen estacionario. Supone una idealización de la realidad.

Principalmente obtenidas por ensayo y simulación

- Conductividad térmica ( $k$ )
- Resistencia térmica ( $R$ ) (muros y ventanas).
- Transmitancia térmica ( $U$ ) (muros y ventanas).
- Factor solar ( $g_{\perp}$ ) (ventanas).





### 5. ANÁLISIS TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN

#### 5.2. Régimen dinámico

Las propiedades tienen en cuenta la variabilidad existente en las condiciones ambientales, principalmente en la temperatura exterior.

Obtenidas sobre todo mediante métodos numéricos (computacionales).

Dificultad para determinarlas, lo que lleva a asumir simplificaciones (variaciones periódicas senoidales, teorema de la convolución, ...)

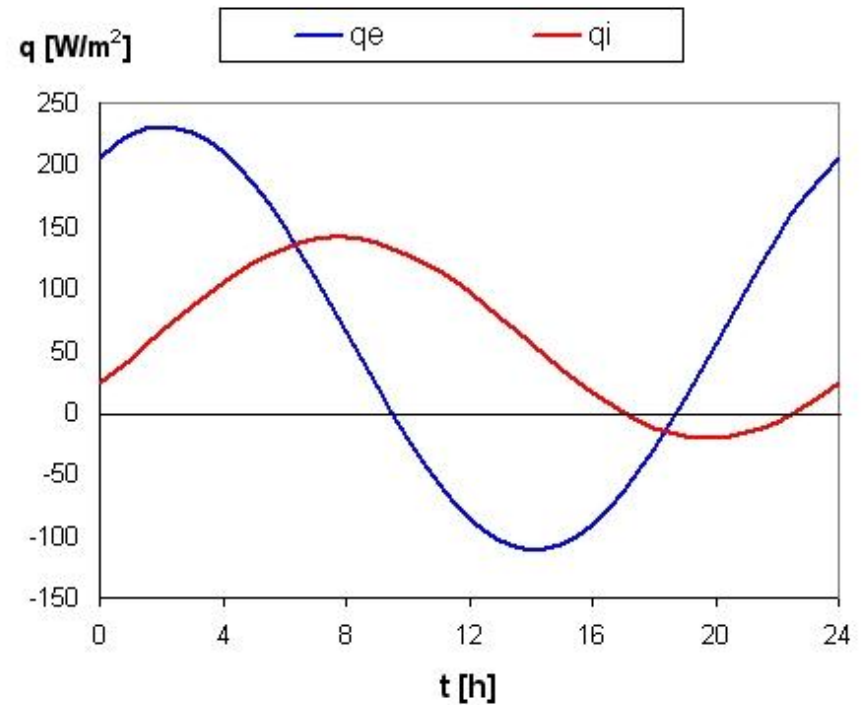
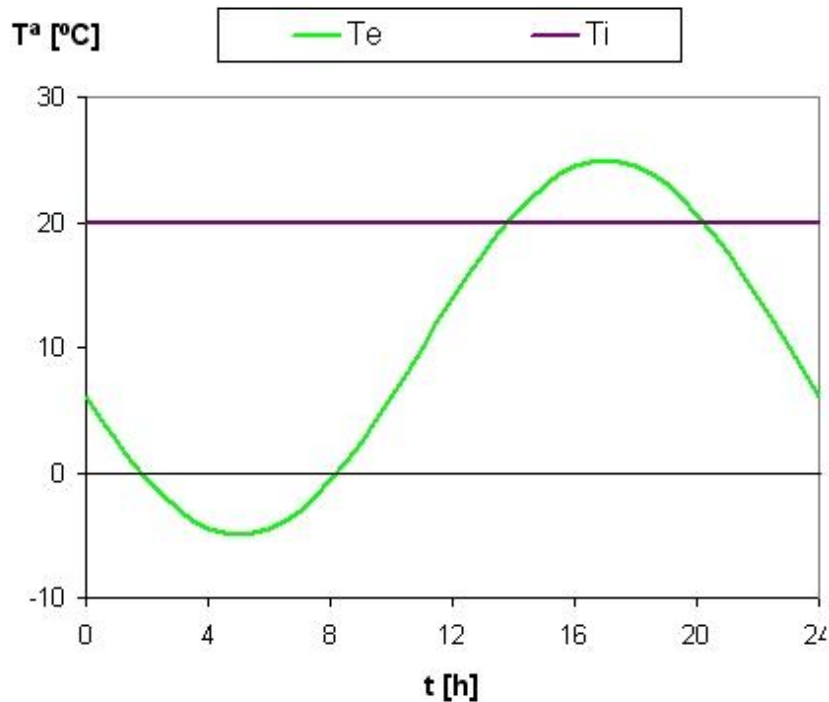
Utilizadas en programas de simulación energética de edificios y de dimensionamiento de sistemas de climatización.

- Impedancia termica ( $Z$ ).
- Factores de respuesta
- Desfase ( $\delta$ ).
- CTFs
- Amortiguamiento.
- Transmitancia dinámica.



### 5. ANÁLISIS TÉRMICO EN LA EDIFICACIÓN

#### 5.2. Régimen dinámico





## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Y. A. Çengel, *"Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico"*. McGraw Hill. 2007. ISBN: 978-970-10-6173-2
- F. Kreith, M. S. Bohn. *"Principios de transferencia de calor"*. Thomson. 2002. ISBN: 84-9732-061-1



### 6. REFERENCIAS IMÁGENES

Fig.	Pag	Autor	Fuente	Licencia
1	4	Ian	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC 2.0
2	9	Timothy Vogel	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC 2.0
3	11	NASA	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC 2.0
4	11	Lucas VB-Wikimedia	<a href="#">[Fuente]</a>	Pub. Dom.
5	18	Micah camara	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC-ND 2.0
6	21	LKEM	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC-ND 2.0
7	28	Seier+seier	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY- 2.0
8	46	Paolo Margari	<a href="#">[Fuente]</a>	CC BY-NC-ND 2.0