



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

*Instituto de Energías Renovables
Universidad Nacional Autónoma de México
Temixco Morelos*

TRANSFERENCIA DE CALOR EN EDIFICACIONES

Conceptos básicos – introducción Ener-Habitat

Guadalupe Huelasz

Septiembre 2013

Contenido

- **Transferencia de calor**
- **Mecanismos de transferencia de calor**
- **Ejemplos de transferencia de calor en edificaciones**
- **Trasferencia de calor a través de muros y techos**
 - **Conducción - modelo independiente del tiempo**
 - **Conducción - modelo dependiente del tiempo**
 - **Diferencias en los resultados de los modelos**
 - **Implicaciones – Normas mexicanas**
- **Herramienta numérica Ener-Habitat**
- **Parámetros de evaluación de sistemas constructivos**

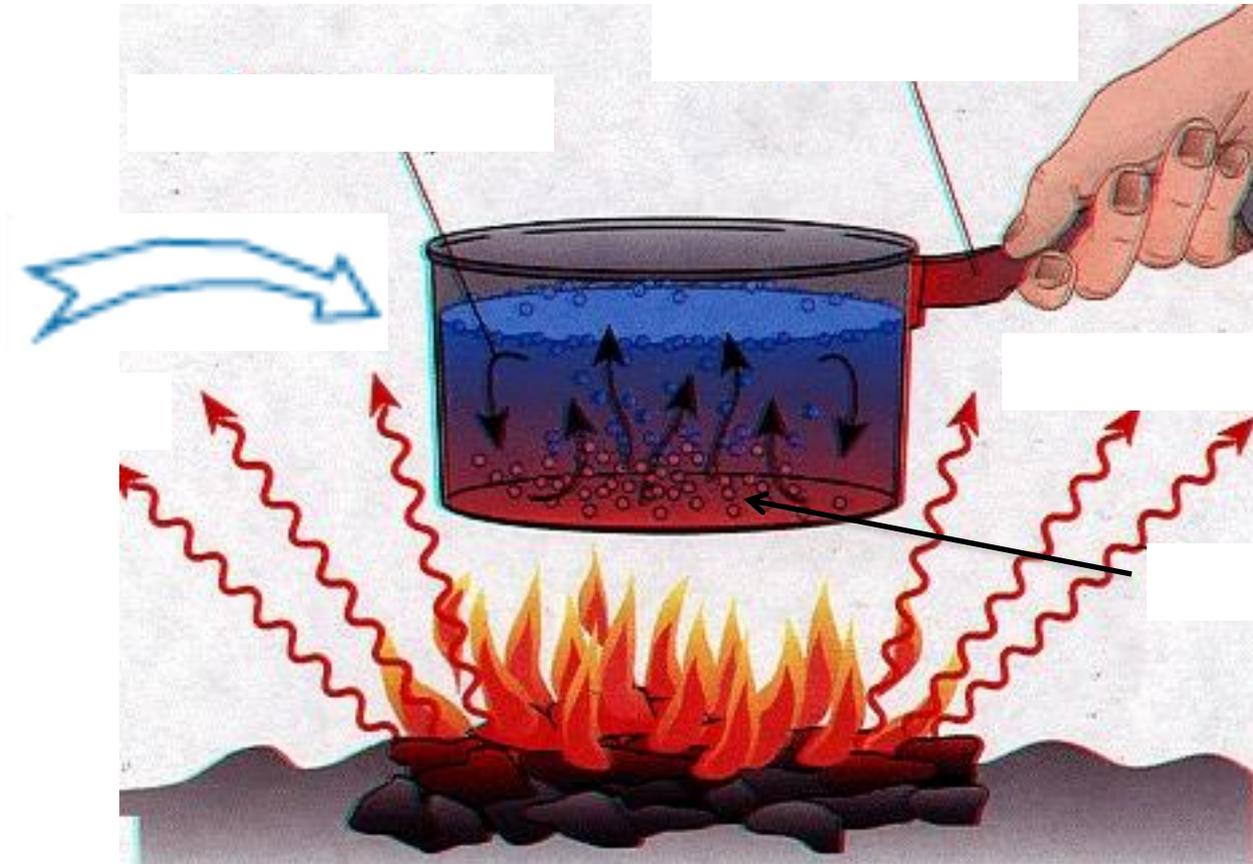
Transferencia de calor

= energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura
de mayor temperatura hacia menor temperatura

$$T_h \longrightarrow T_c \quad T_h > T_c$$

Mecanismos de transferencia de calor?

Mecanismos de transferencia de calor



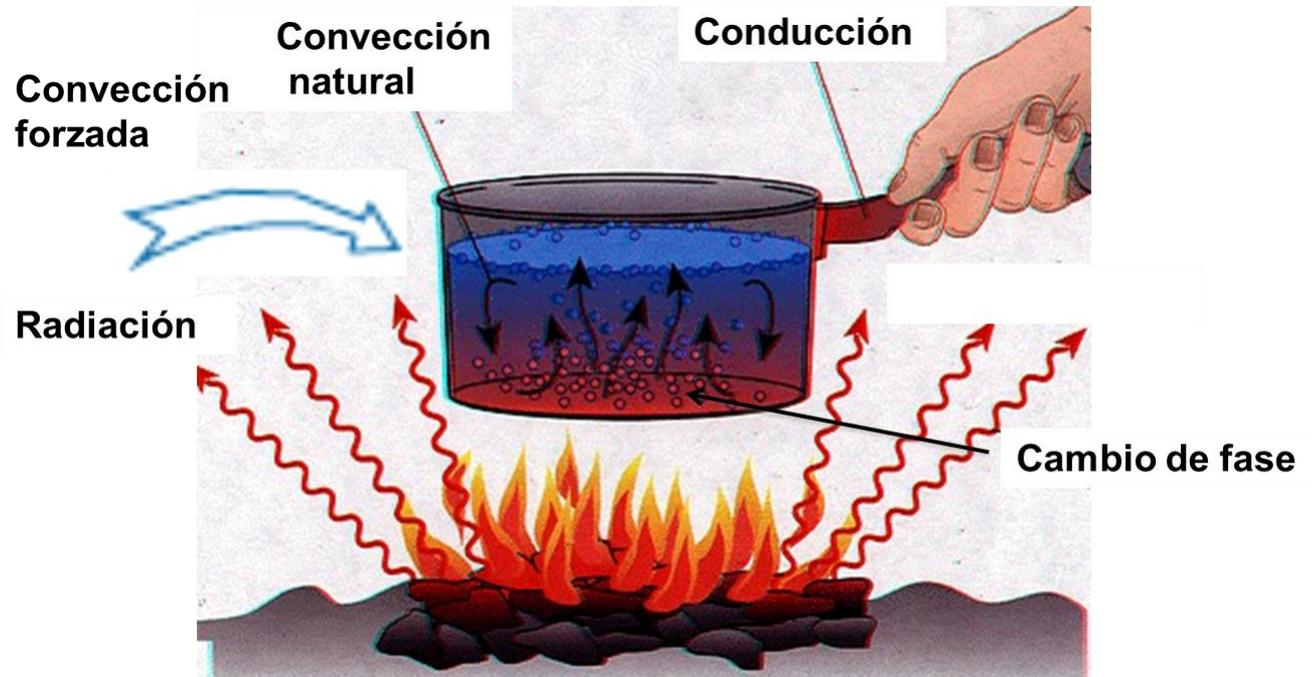
Mecanismos de transferencia de calor



Mecanismos de transferencia de calor

Características?

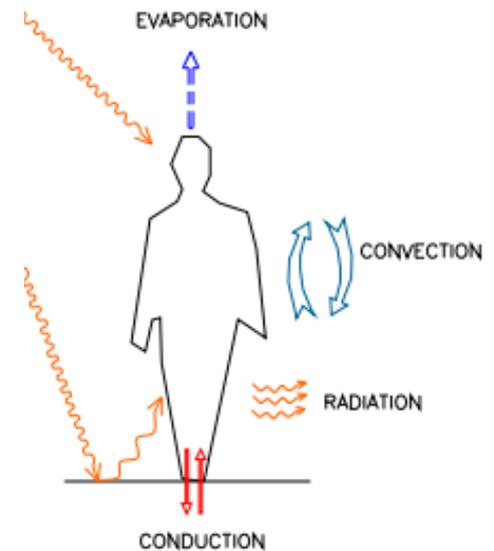
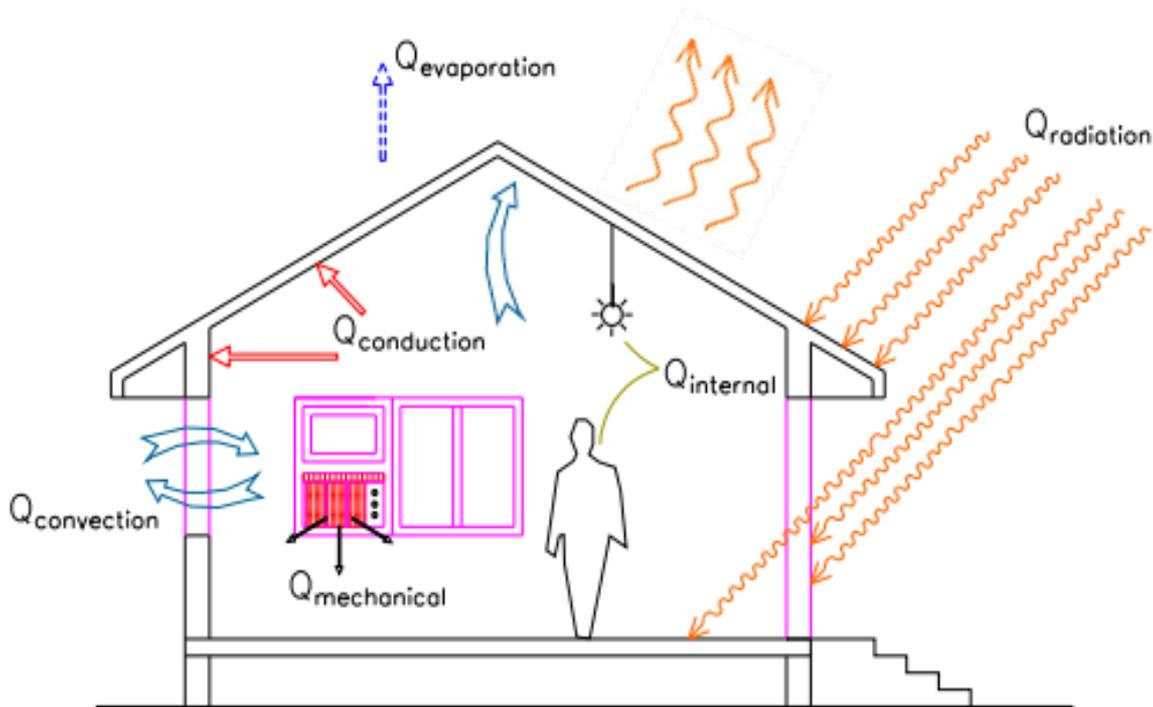
Medio?



Mecanismos de transferencia de calor

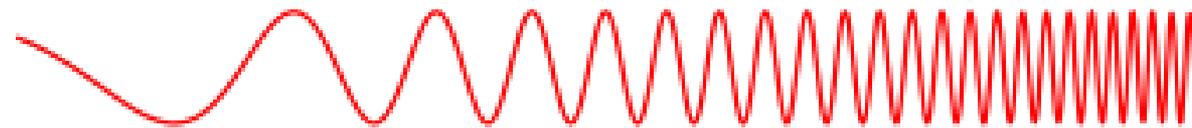
Mecanismo	característica	medio
Conducción	movimiento microscópico	material
Convección	movimiento macroscópico	material
•Natural	diferencias de densidad (T)	
•Forzada	fuerzas externas	
Radiación	ondas electromagnéticas - superficies	no
Cambio de fase	calor latente	material

Ejemplos de transferencia de calor en edificaciones



Radiación electromagnética

¿Penetra la atmósfera terrestre?



Tipo de radiación
Longitud de onda (m)

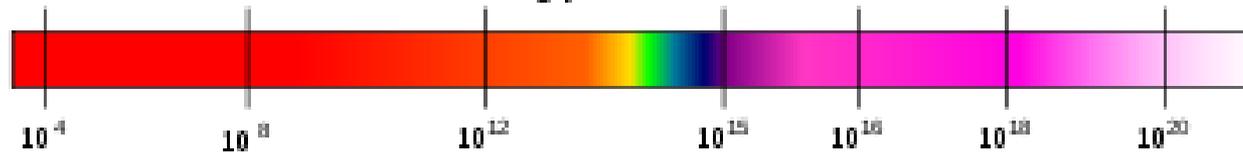
Radio 10^3	Microondas 10^{-2}	Infrarrojo 10^{-5}	Visible $0,5 \times 10^{-6}$	Ultravioleta 10^{-8}	Rayos X 10^{-10}	Rayos gamma 10^{-12}
-----------------	-------------------------	-------------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------------	---------------------------

Escala aproximada de la longitud de onda



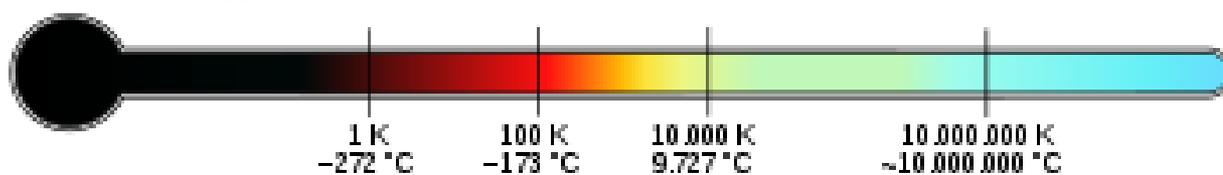
Edificios	Humanos	Mariposas	Punta de aguja	Protozoos	Moléculas	Átomos	Núcleo atómico
-----------	---------	-----------	----------------	-----------	-----------	--------	----------------

Frecuencia (Hz)



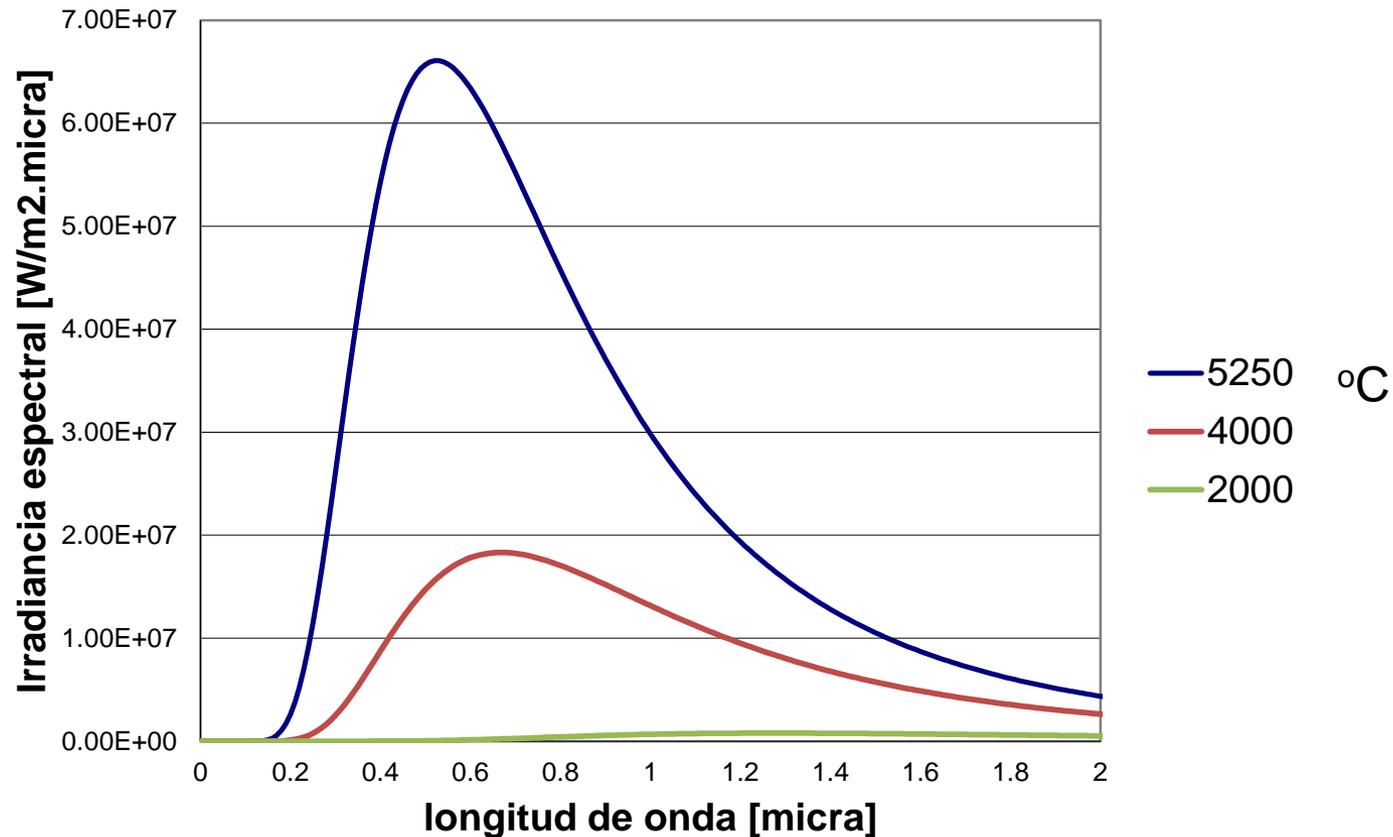
$$f = c/\lambda$$

Temperatura de los objetos en los cuales la radiación con esta longitud de onda es la más intensa



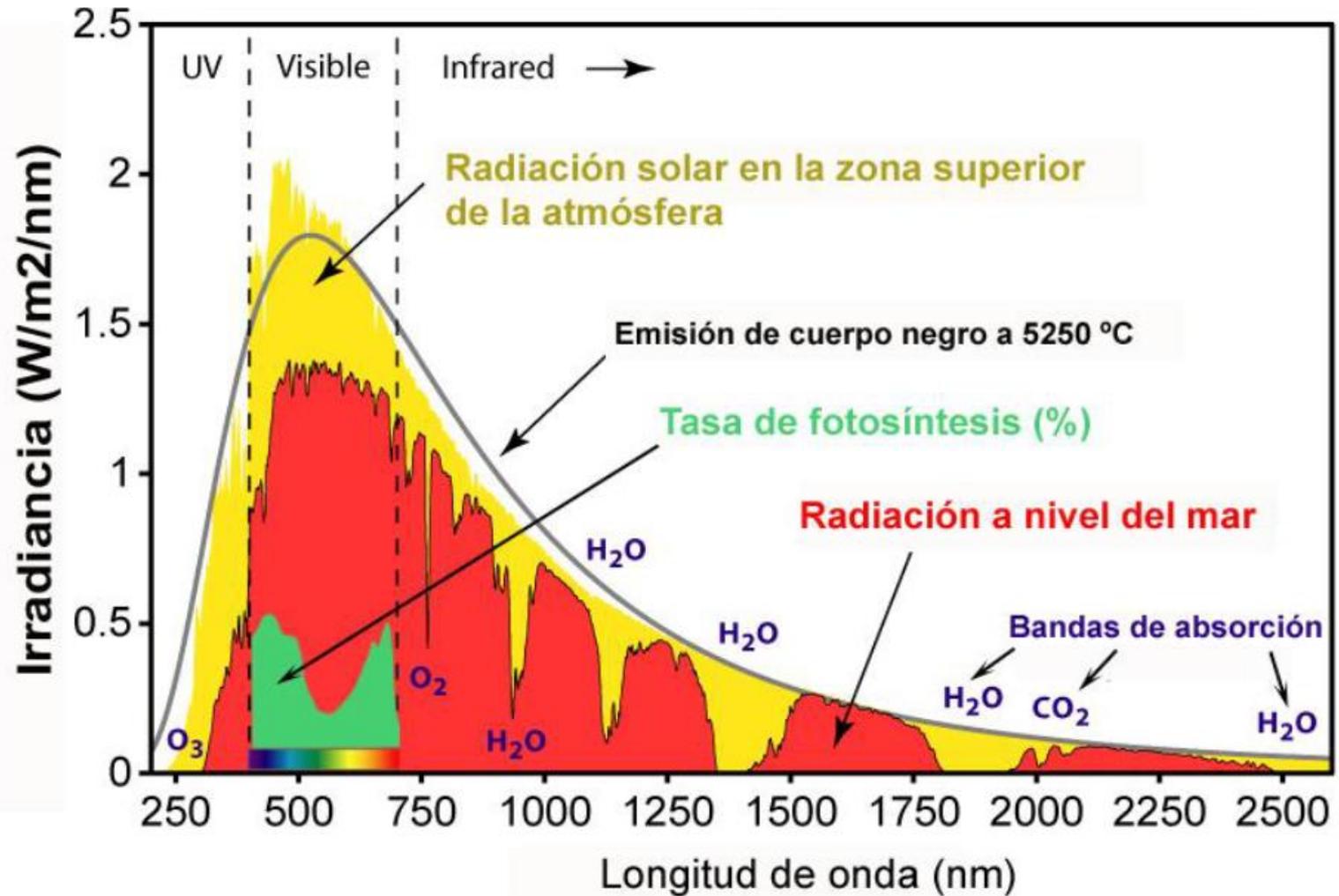
Radiación electromagnética de cuerpo negro

Todo cuerpo radia de acuerdo a su temperatura

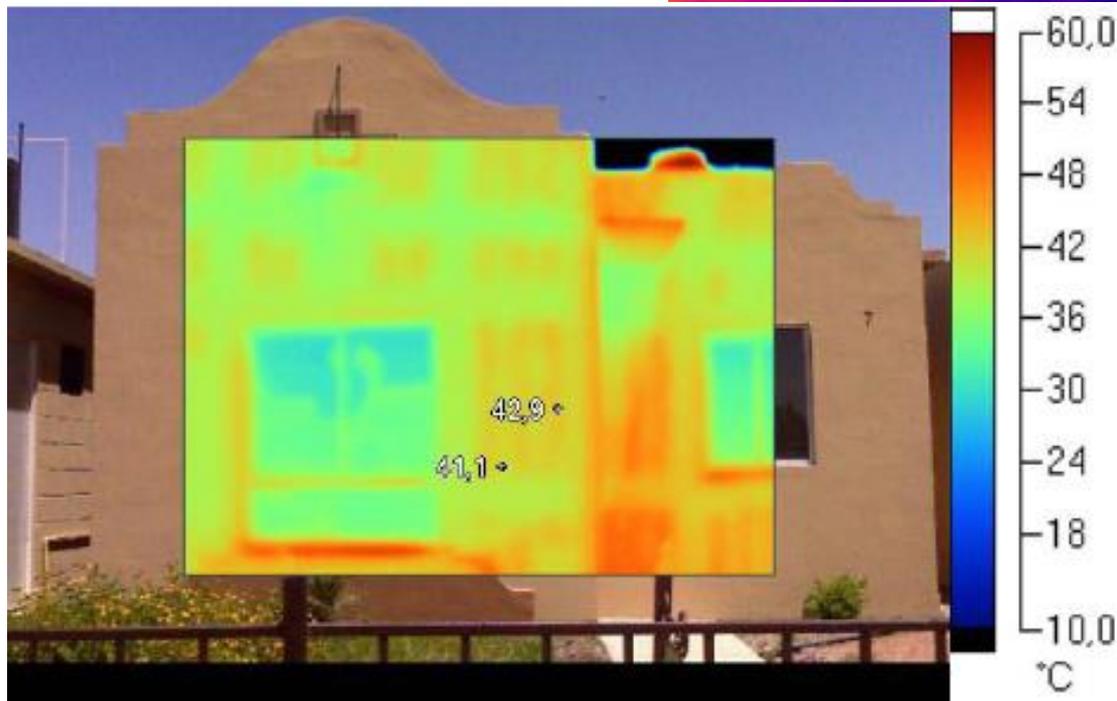
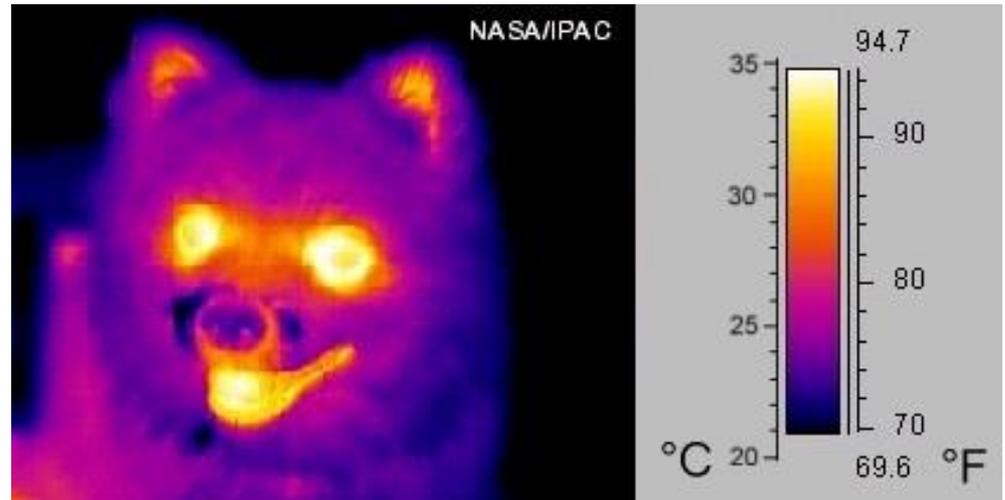


Rango de longitud de onda visible: 0.4 (violeta) a 0.75 (rojo) micras

Radiación solar



Termografías: “fotografías” en infrarrojo



**Seleccionar la
emisividad
correcta**

Cambio de fase en edificaciones

- Aire (húmedo)

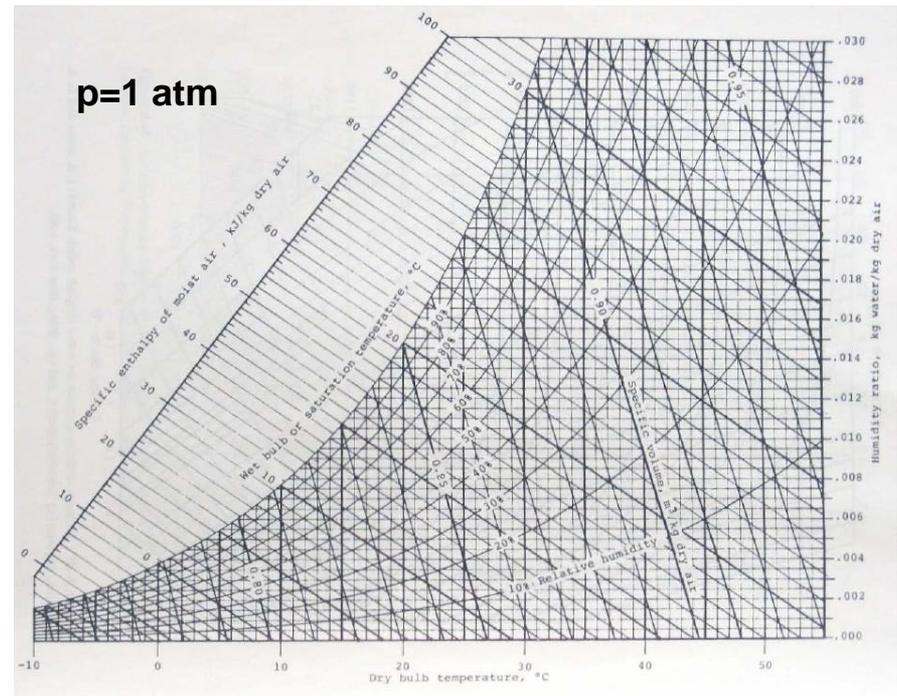
es una mezcla de aire seco + vapor de agua

- Confort térmico - evaporación del sudor
- Enfriamiento evaporativo - al evaporarse el agua requiere energía (calor latente), la toma del aire y baja su temperatura.

Psicrometría

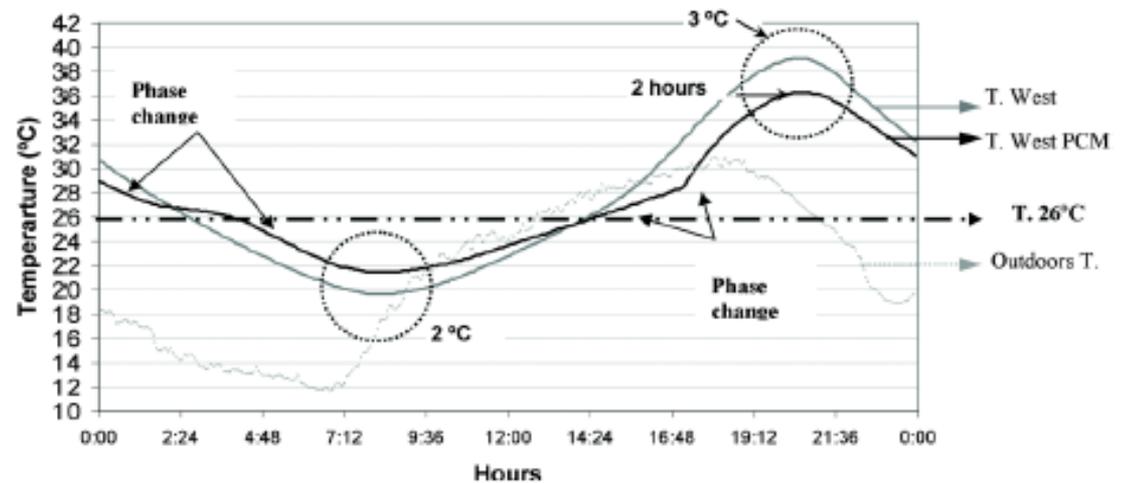
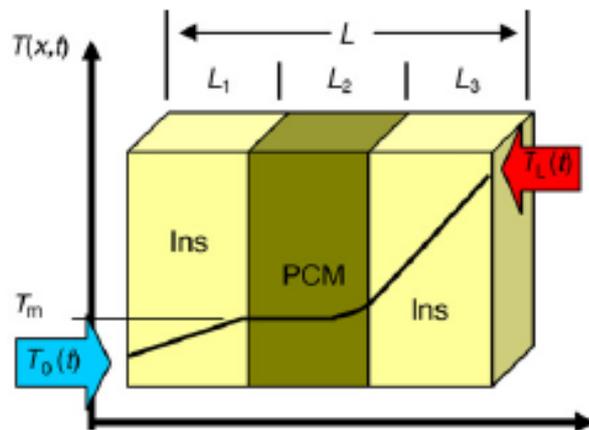
3 variables independientes:

- Presión
- Temperatura
- Humedad relativa

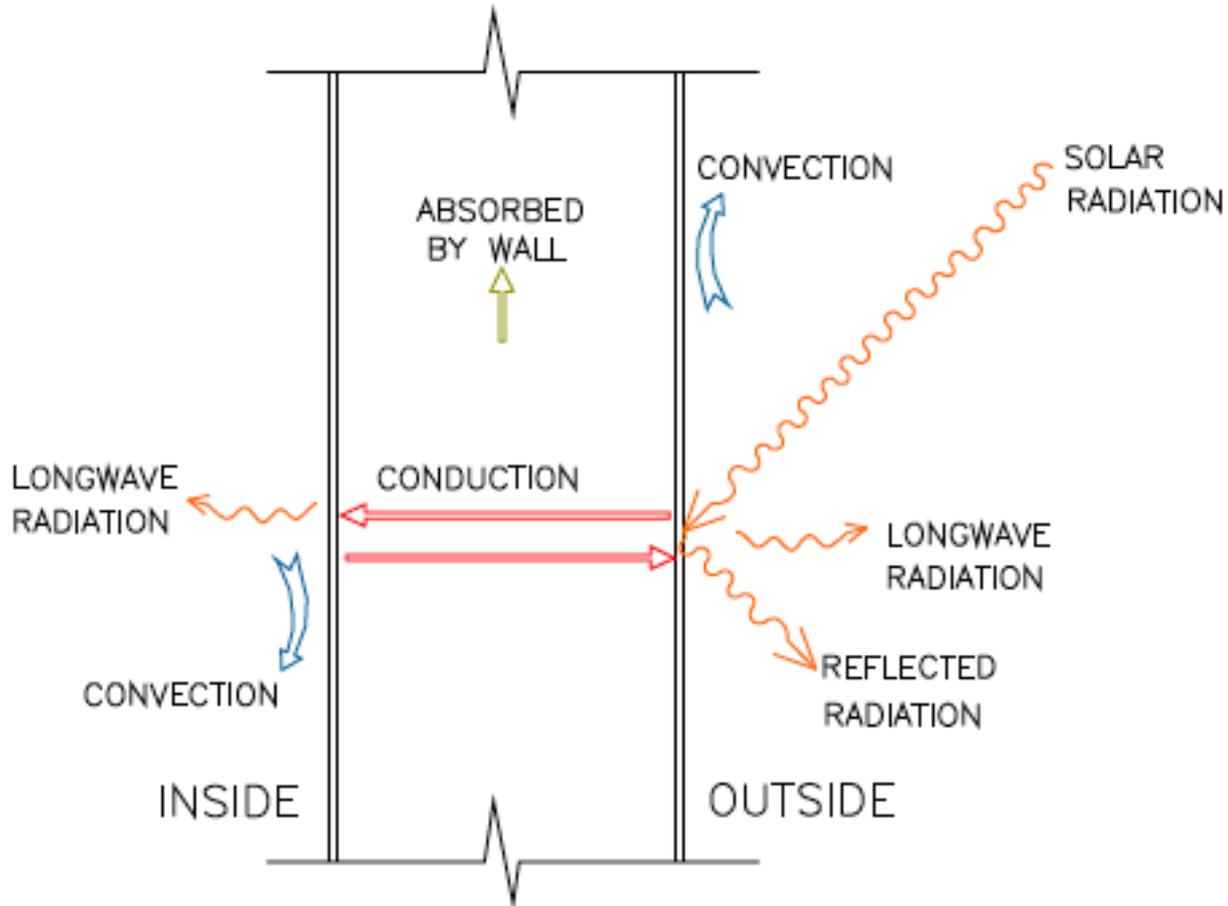


Cambio de fase en edificaciones

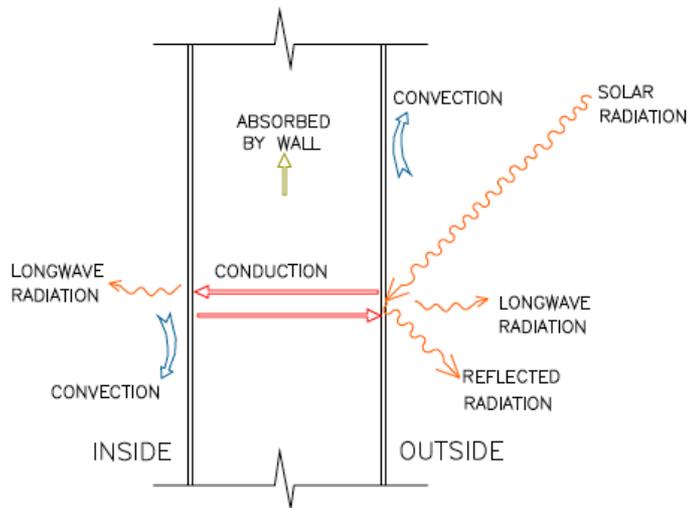
- **Materiales de cambio de fase en muros y techos de la envolvente** - es una forma de almacenar energía en el muro/techo, al cambiar de fase de sólido a líquido usan energía (calor latente) en vez de aumentar temperatura y al cambiar de líquido a sólido liberan energía en vez de disminuir temperatura.



Transferencia de calor a través de muros y techos



Transferencia de calor a través de muros y techos



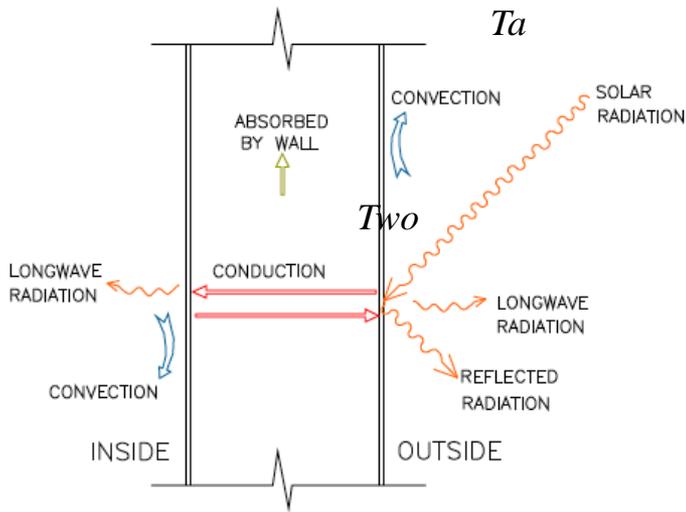
Exterior

- **Convección forzada** – velocidad del viento
- **Convección natural** – dif. temperatura m/t y ambiente
- **Radiación solar absorbida** – rad incidente y absorptancia solar de la superficie exterior del m/t
- **Radiación de onda larga** – dif. temperatura m/t y superficies “enfrente” y emisividad en onda larga de la superficie exterior del m/t

Interior

- **Convección forzada** – velocidad del aire al interior
- **Convección natural** – gradientes verticales de temp.
- **Radiación de onda larga** – dif. temperatura m/t y superficies “enfrente” y emisividad en onda larga de la superficie interior del m/t

Transferencia de calor a través de muros y techos



Exterior

- Convección forzada
- Convección natural

} h_o

- Radiación solar absorbida AI

- Radiación de onda larga C_E

= { $-3.9^{\circ}C$ techo
 $0^{\circ}C$ muro

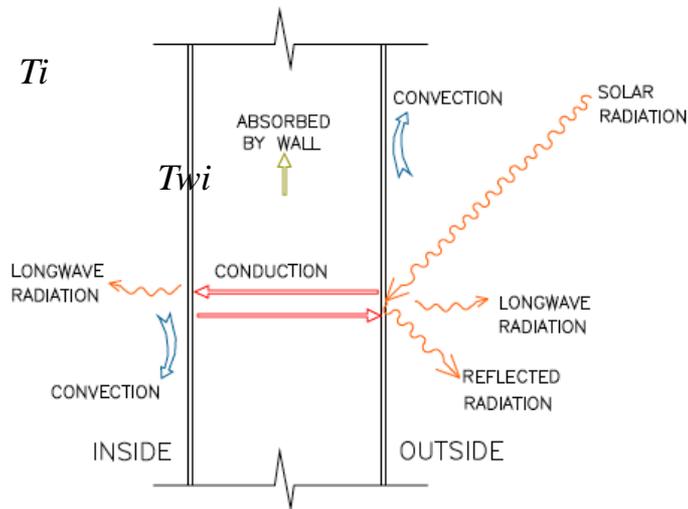
Temperatura sol-aire

$$T_{sa} = T_a + \frac{AI}{h_o} + C_E$$

Trasferencia de calor del exterior al muro/techo

$$q'' = h_o(T_{sa} - T_{wo})$$

Transferencia de calor a través de muros y techos



Interior

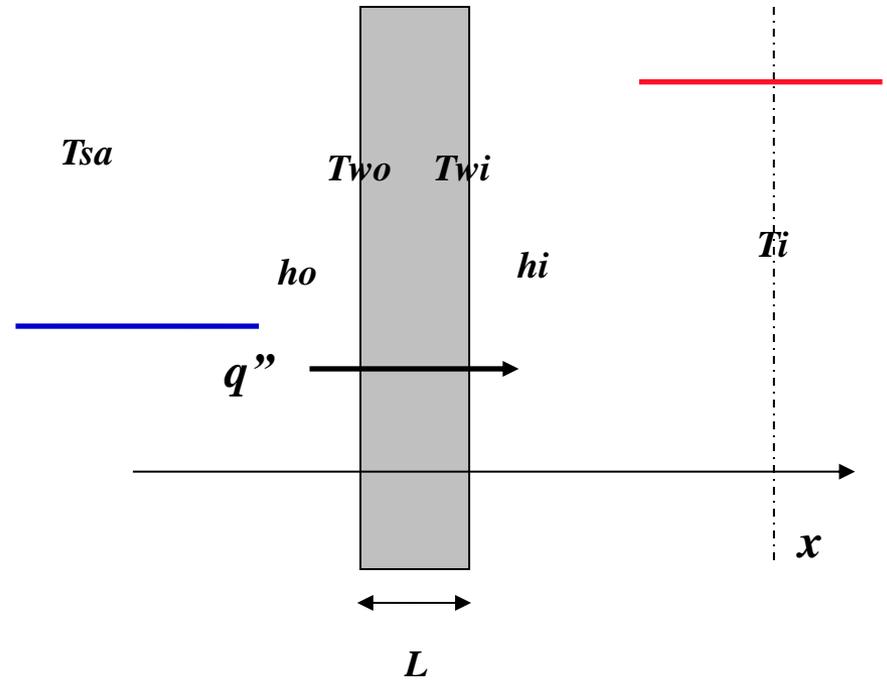
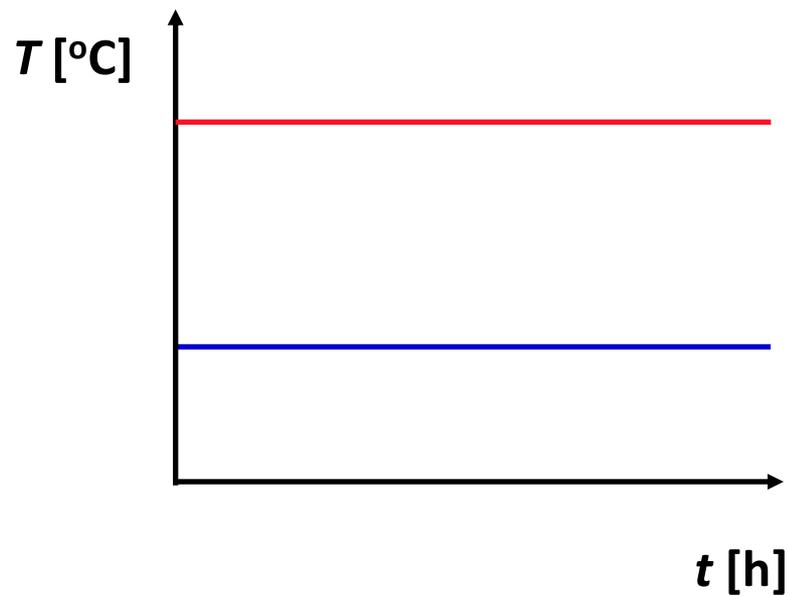
- Convección forzada
 - Convección natural
 - Radiación de onda larga (se desprecia)
- } h_i

Trasferencia de calor del muro/techo al interior

$$q'' = h_i(T_{wi} - T_i)$$

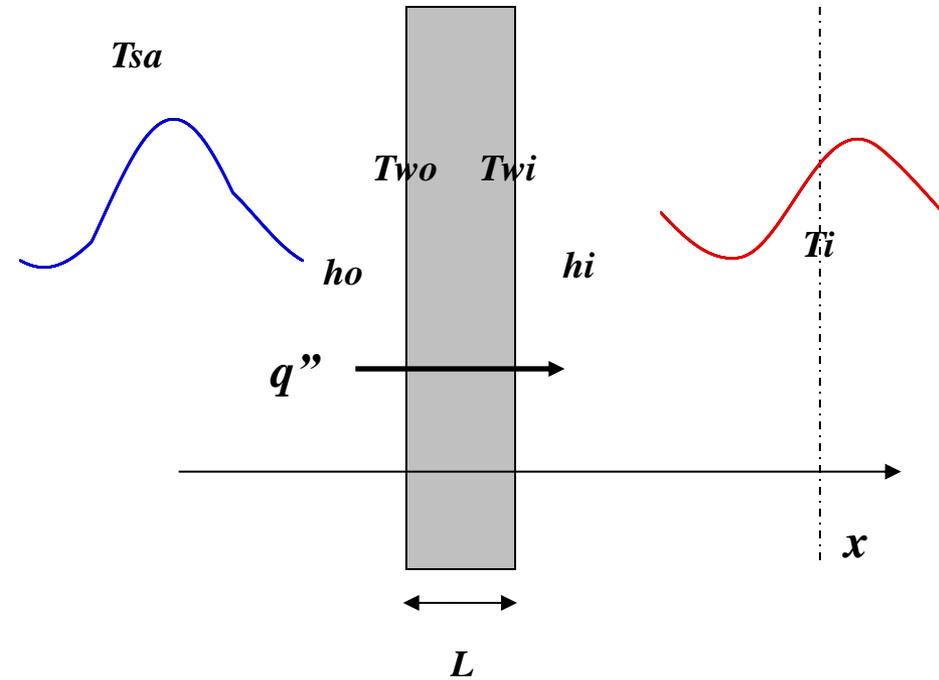
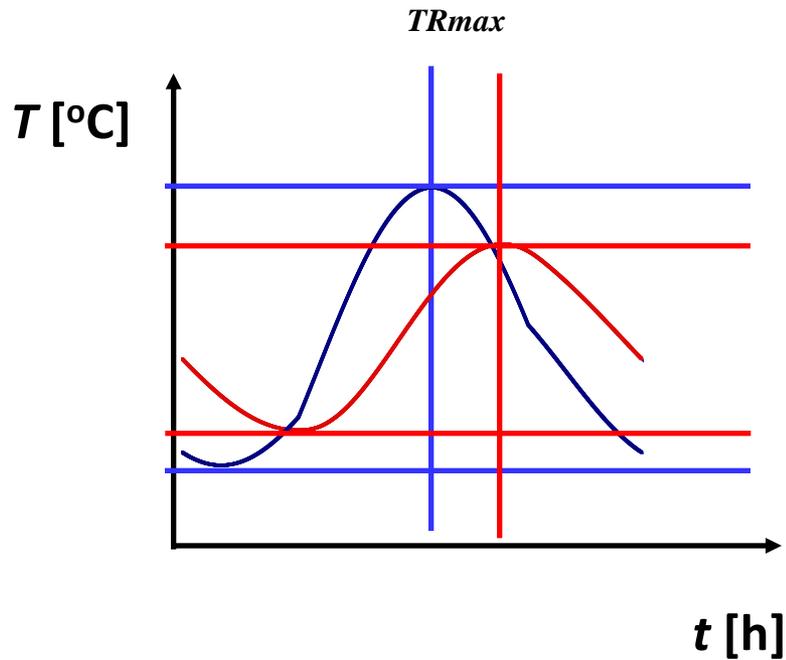
Modelo de transferencia de calor

independiente del tiempo



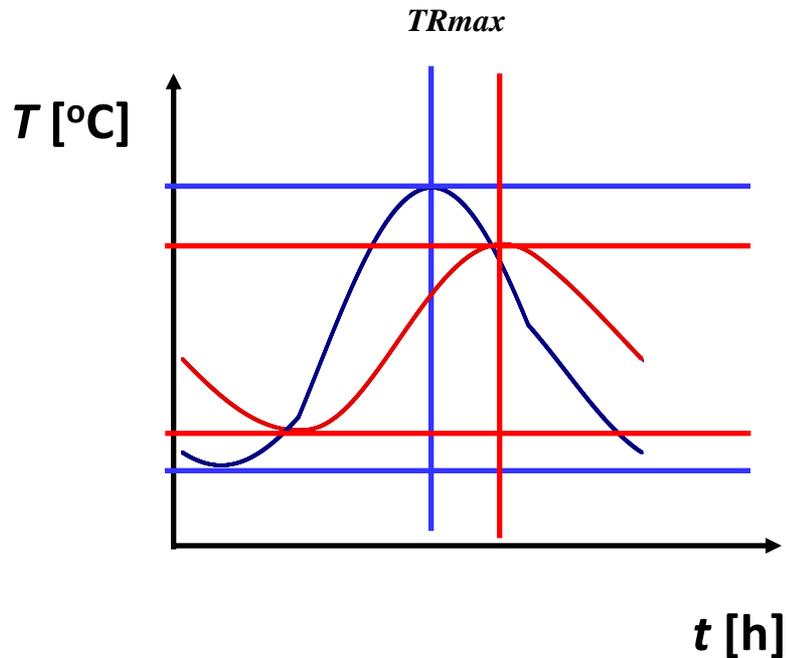
Modelo de transferencia de calor

dependiente del tiempo



Modelo de transferencia de calor

dependiente del tiempo



Factor de decremento $[0,1]$

$$FD = \frac{Ti_{\max} - Ti_{\min}}{Tsa_{\max} - Tsa_{\min}}$$

Tiempo de retraso o desfase $TR [0, \infty)$

$$TR = t(Tsa_{\max}) - t(Ti_{\max})$$

se busca $FD \downarrow$ $TR \uparrow$

Modelo de transferencia de calor independiente del tiempo

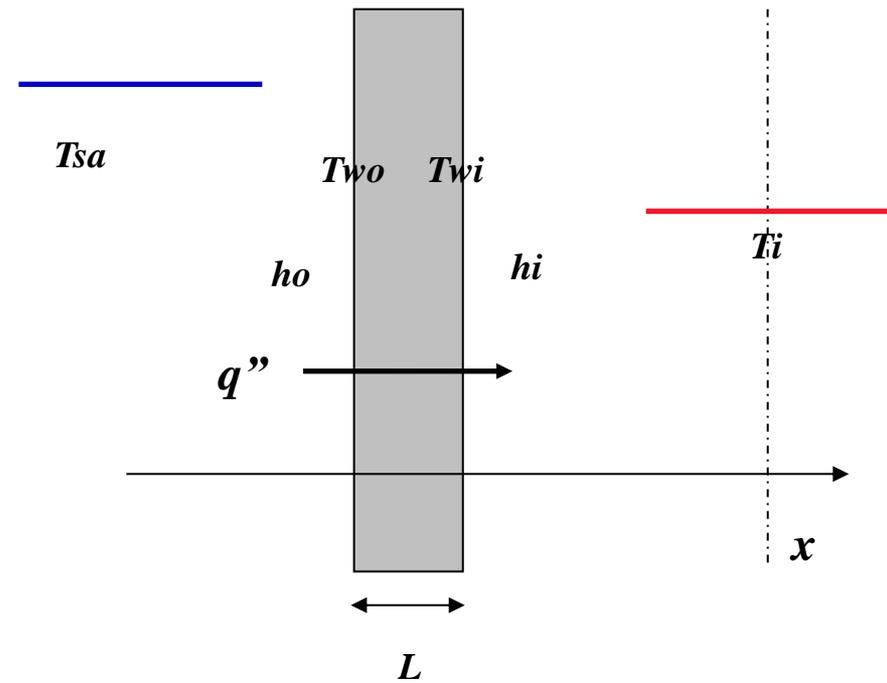
Muro o techo una capa

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

Condiciones de frontera

$$q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wo} = ho(Tsa - Two)$$

$$q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wi} = hi(Twi - Ti)$$



Solución
$$q'' = \frac{Tsa - Ti}{R}$$

Resistencia térmica o **valor R**

$$R = \frac{1}{ho} + \frac{L}{k} + \frac{1}{hi}$$

se desea **valor R** ↑

No toma en cuenta la masa térmica 22

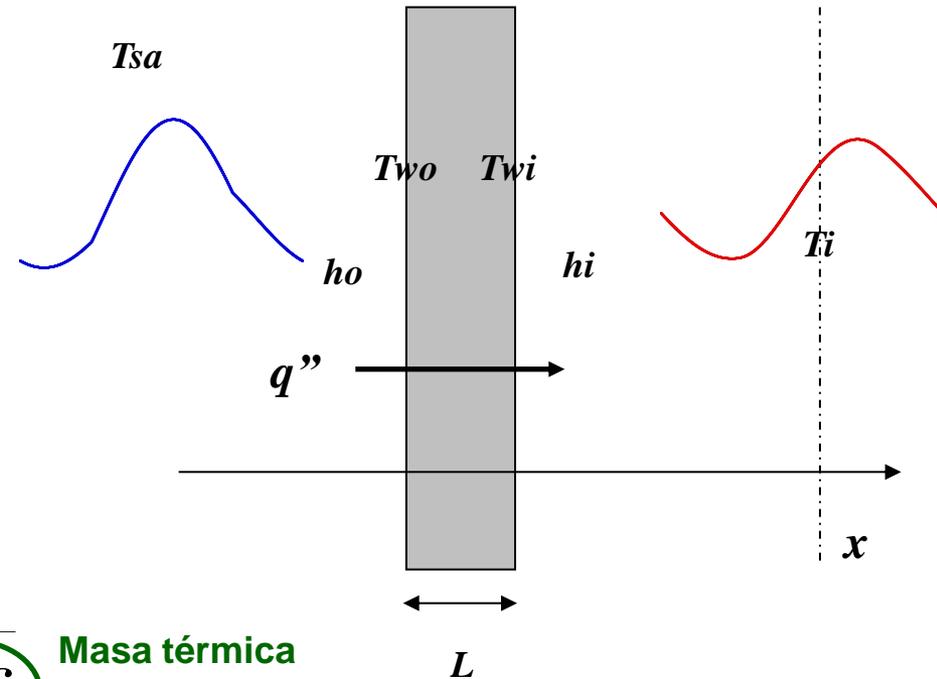
Modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo (Simulación dinámica)

Muro o techo una capa

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c}$$

Masa térmica



Condiciones de frontera

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{wo} = ho(Tsa - Twa)$$

$$q'' = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{wi} = hi(Twi - Ti)$$

Condiciones iniciales (arbitrarias)

Sin aire acondicionado

$$d\rho_a c_a \frac{\partial Ti}{\partial t} = hi(Twi - Ti)$$

Con aire acondicionado) $Ti = T_{AC} = cte$

se desea $\alpha \downarrow$ $k \downarrow$

Si toma en cuenta la masa térmica

solución por métodos numéricos

Comparación resultados

**Simulaciones dependiente del tiempo
(toma en cuenta la masa térmica)**

VS

**Simulaciones independiente del tiempo
(no toma en cuenta la masa térmica)**

Parámetros de simulación

Techo horizontal

Lugar: Temixco, Morelos

Periods: Mayo

$h_{out} = 13\text{W/m}^2$

$h_{in} = 6.6\text{W/m}^2$

$d = 2.5\text{m}$

$RF = 3.9^\circ\text{C}$

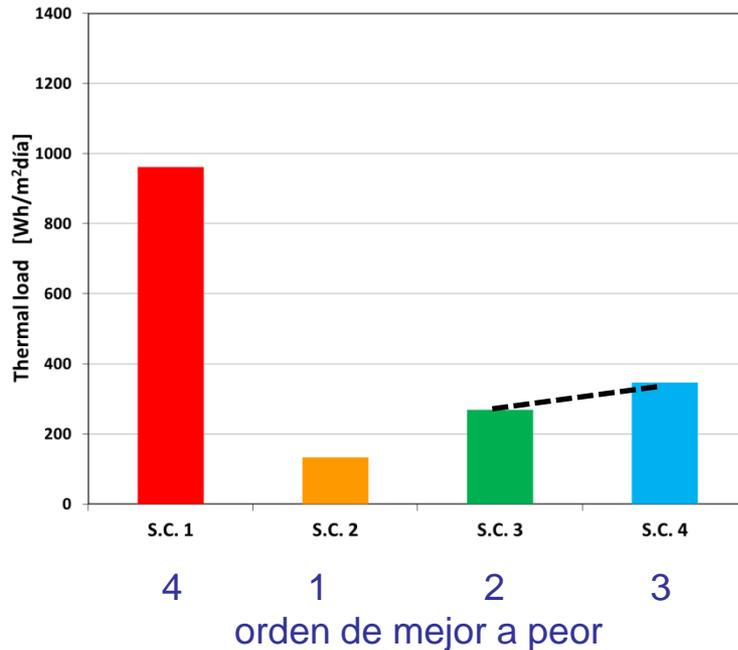
$A = 0.7$

Algunas referencias que han señalado la importancia de simulaciones dependiente del tiempo

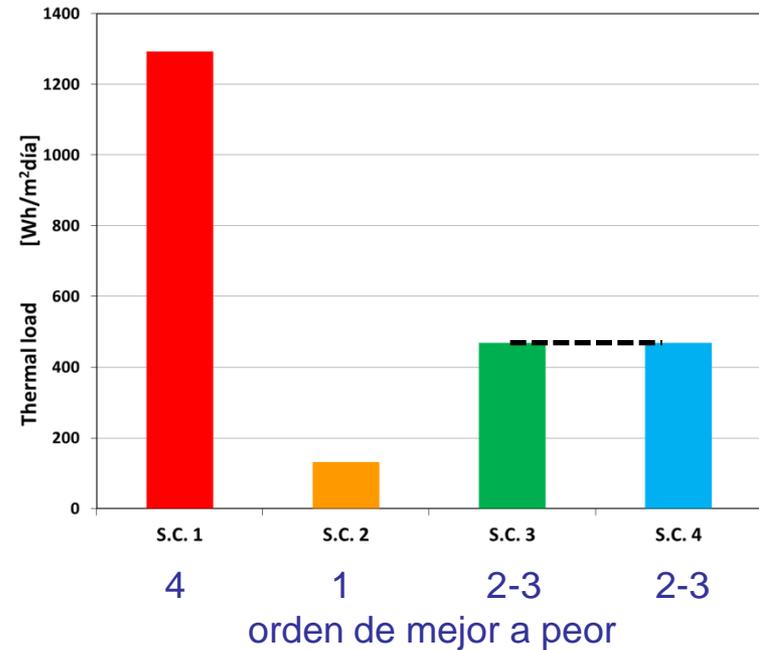
- Kuehn TH, Ramsey WW, Threlkeld JL, 2001. Thermal Environmental Engineering, Prentice Hall, New Jersey, p. 481-485 y 559-560.
- Energy Plus, 2012, EnergyPlus University Course Teaching Material, Lecture 7: Building Modeling Questions. p.26. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_training.cfm
- Barrios G, Huelsz G, Rechtman R, Rojas J, 2011. Wall/roof thermal performance differences between air-conditioned and non air-conditioned rooms. Energy and Buildings 43, 219-223.
- Barrios G, Huelsz G, Rojas J 2011. Thermal evaluation of envelopes of non air-conditioned buildings. Proceedings CISBAT 2011, 14-16 September 2011. Lausanne, Switzerland. 135-140. (ISBN CD-version: 978-2-8399-0906-8 ISBN Print-version: Vol.I: 978-2-8399-0907-5 Vol.II: 978-2-8399-0918-1)
- Barrios G, Huelsz G, Rojas J. 2012. Thermal performance of envelope wall/roofs of intermittent air-conditioned rooms. Applied Thermal Engineering 40, 1-7.
- Huelsz, G., Rechtman, R., Rojas, R. 2009 Altos valores de la resistencia térmica no aseguran un buen desempeño térmico de la envolvente de una edificación. Memorias de la XXXIII Semana Nacional de Energía Solar, ANES, Guadalajara, Jal., 28 septiembre- 3 octubre 2009, ABC-050, 237-240.
- Huelsz G., Barrios G., Rechtman R., Rojas J., 2010 Importancia del análisis de transferencia de calor dependiente del tiempo en la evaluación del desempeño térmico de la envolvente de una edificación. Estudios de Arquitectura Bioclimática, Anuario 2010 Vol. X. Compilador Aníbal Figueroa Castrejón. Editorial Limusa y UAM Azcapotzalco, (ISBN 978-607-477-482-5) 7-19.

Con aire acondicionado - Carga térmica

Dependiente tiempo (Dt)
(si considera la masa térmica)



Independiente del tiempo (It)
(sólo valor R, no considera la masa térmica)



S.C.1 CAD (10cm)	R=0.3 m ² C/W
S.C.2 EPS (10cm)	R=2.7 m ² C/W
S.C.3 EPS (2cm) + CAD (8cm)	R=0.8 m ² C/W
S.C.4 CAD (8cm) + EPS (2cm)	R=0.8 m ² C/W

Observación

- It y Dt clasifican S.C casi en mismo orden (al menos en estos ejemplos)
- It no distingue orden capas

CAD Concreto alta densidad
EPS Poliestireno expandido

Con aire acondicionado - Carga térmica

Comparación Independiente del tiempo (It) VS Dependiente tiempo (Dt)

S.C.	Descripción ext a int (espesor)	Valor R	Dif It vs Dt
S.C.1	Concreto (10cm)	0.3 m ² °C/W	34%
S.C.2	EPS (10cm)	2.7 m ² °C/W	-1%
S.C.3	EPS 2cm + Concreto (8cm)	0.8 m ² °C/W	74%
S.C.4	Concreto (8cm) + EPS (2cm)	0.8 m ² °C/W	35%

Conclusión

Independiente del tiempo (solo valor R, no considera la masa térmica)

- En sistemas constructivos con masa térmica **sobre estima el valor de la carga térmica. Sobredimensionando equipos de aire acondicionado** para esos S.C.
- Resultado señalado por referencias como Kuehn et al. 1998 y Energy Plus 2012.

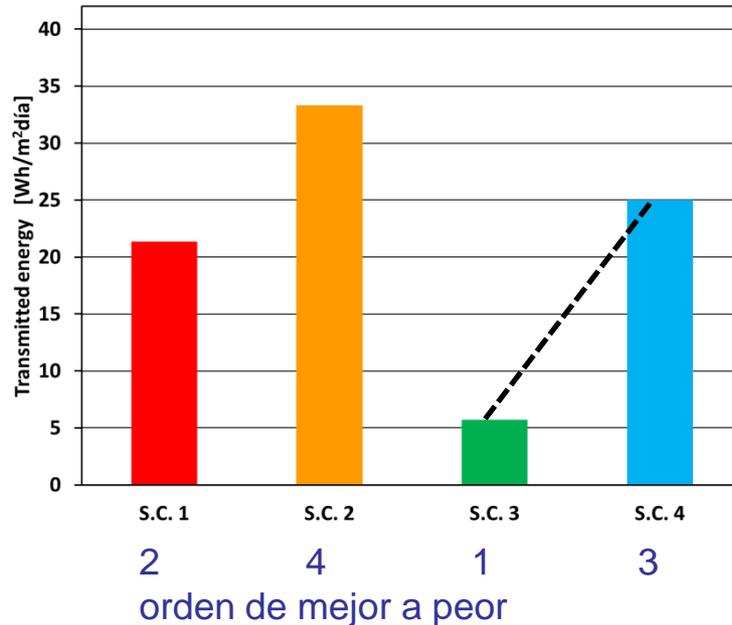
- Kuehn T H, Ramsey J W, Threlkeld J L, 1998 Thermal environmental engineering / 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, p. 485
- Energy Plus, 2012, EnergyPlus University Course Teaching Material, Lecture 7: Building Modeling Questions. p.26. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_training.cfm

Sin aire acondicionado – Energía transmitida*

* Como las simulaciones son para un día típico del mes, son condiciones periódicas, por lo que la energía que entra por un sistema constructivo es la misma que sale del sistema y se reporta con el nombre de energía transmitida.

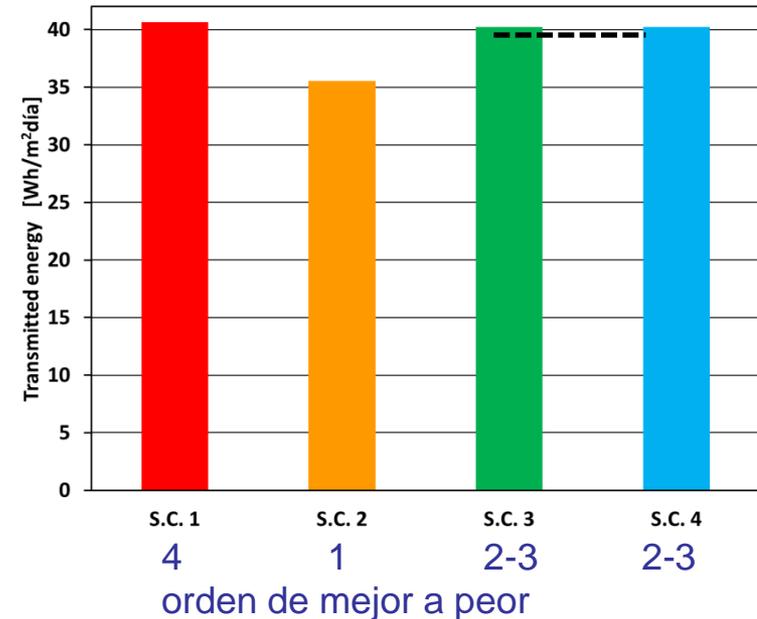
Dependiente tiempo (Dt)

(si considera la masa térmica)



Independiente tiempo (It)

(no considera la masa térmica)



S.C.1 CAD (10cm)

$R=0.3 \text{ m}^2\text{C/W}$

S.C.2 EPS (10cm)

$R=2.7 \text{ m}^2\text{C/W}$

S.C.3 EPS (2cm) + CAD (8cm)

$R=0.8 \text{ m}^2\text{C/W}$

S.C.4 CAD (8cm) + EPS (2cm)

$R=0.8 \text{ m}^2\text{C/W}$

CAD Concreto alta densidad

EPS Poliestireno expandido

Observaciones

- It sobre estima la energía transmitida.
- It y Dt **NO** clasifican S.C en mismo orden de mejor a peor
- It **NO** distingue posición de capas dentro del S.C.

Sin aire acondicionado – Energía transmitida

Comparación Independiente del tiempo (It) VS Dependiente tiempo (Dt)

S.C.	Descripción ext a int (espesor)	Valor R	Dif It vs Dt
S.C.1	Concreto (10cm)	0.3 m ² °C/W	90.5%
S.C.2	EPS (10cm)	2.7 m ² °C/W	6.8%
S.C.3	EPS 2cm + Concreto (8cm)	0.8 m ² °C/W	605.9%
S.C.4	Concreto (8cm) + EPS (2cm)	0.8 m ² °C/W	60.8%

Conclusión

Independiente del tiempo (solo valor R, no considera la masa térmica)

- En sistemas constructivos con masa térmica **sobre estima el valor de la energía térmica transmitida.**
- **Puede clasificar incorrectamente el orden de mejor a peor configuración.**

Normatividad en México

Normas mexicanas para la eficiencia energética de la envolvente de edificios:

- **NOM-008_ ENER-2001** (no residenciales)
- **NOM-020_ ENER-2011** (uso habitacional)

Tienen por objetivo racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento

- Existe incongruencia entre objetivo y aplicabilidad en todo el país
- **Están basadas en modelo de transferencia de calor independiente del tiempo inadecuado para climas de México**
- No son operativas porque la construcción es competencia municipal

Sistema de Evaluación “Vivienda Verde” SISEViVe del INFONAVIT

- **Está basado en modelo de transferencia de calor independiente del tiempo inadecuado para climas de México**

Herramienta numérica



- De acceso **gratuito**, previo registro.
- Está disponible en la página www.enerhabitat.unam.mx
- Fácil uso (no toma en cuenta otros factores, como ventilación, cargas internas)
- Evalúa el desempeño térmico:
 - De techos y muros de la envolvente formados por capas homogéneas y algunos con una capa no homogénea
 - En el clima de las principales ciudades de México (día típico de cada mes)
 - En condiciones de:
 - Aire acondicionado (fija temperatura)
 - No aire acondicionado
- Usa el modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo
- Es útil para comparar el desempeño de sistemas constructivos en una ciudad específica, en condiciones específicas de uso (con o sin aire acondicionado).



Es el principal producto de un proyecto patrocinado por el Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER

Realizado por:

- Instituto de Energías Renovables – Universidad Nacional Autónoma de México (líder)
- Programa de Arquitectura, Departamento de Bellas Artes - Universidad de Sonora
- Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo- Universidad Autónoma de Tamaulipas
- Facultad de Arquitectura y Diseño – Universidad de Colima
- Ingeniería Mecánica – Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
- Arquitectura Bioclimática – Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Modelo de transferencia de calor dependiente del tiempo (Simulación dinámica)

Muro o techo una capa

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \alpha = \frac{k}{\rho c}$$

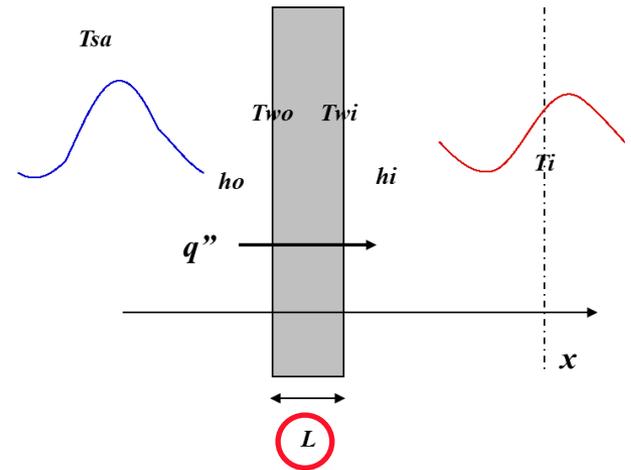
Condiciones de frontera

$$q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wo} = ho(Tsa - Two)$$

$$q'' = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wi} = hi(Twi - Ti)$$

Condiciones iniciales (arbitrarias – hasta periódico)

$$Tsa = Ta + \frac{AI}{ho} + CE$$



Sin aire acondicionado

$$d\rho_a c_a \frac{\partial Ti}{\partial t} = hi(Twi - Ti)$$

Con aire acondicionado $Ti = T_{AC} = T_c$

$$\begin{aligned} h_{out} &= 13 \text{ W/m}^2 \\ h_{in} &= 6.6 \text{ W/m}^2 \\ d &= 2.5 \text{ m} \\ C_E &= \begin{cases} -3.9^\circ\text{C} & \text{techo} \\ 0^\circ\text{C} & \text{muro} \end{cases} \end{aligned}$$

Base de datos de 61 ciudades de la República Mexicana

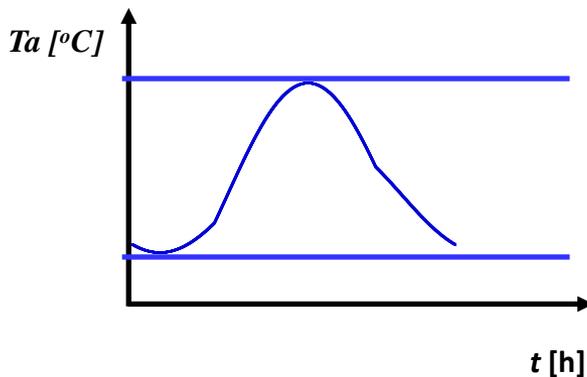
Cálculo de T_c

Modelo de temperatura de confort térmico o neutralidad

Adaptativo de Humphreys y Nicol y amplitud de zona de confort adaptado de Morillón

$$T_c - \Delta T_c / 2 \leq T_i \leq T_c + \Delta T_c / 2,$$

$$T_c = 13.5^\circ\text{C} + 0.54 T_a$$



ΔT_a ($^\circ\text{C}$)	ΔT_c ($^\circ\text{C}$)
$\Delta T_a < 13$	2.5
$13 \leq \Delta T_a < 16$	3.0
$16 \leq \Delta T_a < 19$	3.5
$19 \leq \Delta T_a < 24$	4.0
$24 \leq \Delta T_a < 28$	4.5
$28 \leq \Delta T_a < 33$	5.0
$33 \leq \Delta T_a < 38$	5.5
$38 \leq \Delta T_a < 45$	6.0
$45 \leq \Delta T_a < 52$	6.5
$52 \leq \Delta T_a$	7.0

- Humphreys, M. A. y Nicol, F. J., "Outdoor temperature and indoor thermal comfort-raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database files studies", ASHRAE Transactions, 106 (2), 2000, p. 485-492.
- Morillón, D. 2004, Atlas del bioclima de México, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Parámetros de evaluación de sistemas constructivos

Con aire acondicionado

- Q_e Carga térmica de enfriamiento [Wh/m²dia]

$$Q_e = \sum_i h_i (T_{wi} - T_i) \Delta t_i \quad \text{si } T_{wi} > T_i$$

- Q_c Carga térmica de calentamiento [Wh/m²dia]

$$Q_c = \sum_i h_i (T_i - T_{wi}) \Delta t_i \quad \text{si } T_i > T_{wi}$$

- Q Carga térmica total (enfriamiento + calentamiento) [Wh/m²dia]

$$Q = Q_e + Q_c$$

- FD_s Factor de decremento superficial [-]

$$FD_s = \frac{T_{wi_{\max}} - T_{wi_{\min}}}{T_{wo_{\max}} - T_{wo_{\min}}}$$

Parámetros de evaluación de sistemas constructivos

Sin aire acondicionado

- ***FD*** **Factor de decremento** **[-]**

$$FD = \frac{Ti_{\max} - Ti_{\min}}{Tsa_{\max} - Tsa_{\min}}$$

- ***TR*** **Tiempo de retraso** **[h]**

$$TR = t(Tsa_{\max}) - t(Ti_{\max})$$

- ***<Tin>*** **Temperatura interior promedio** **[°C]**

- ***Tinmin*** **Temperatura interior mínima** **[°C]**

- ***Tinmax*** **Temperatura interior máxima** **[°C]**

Parámetros de evaluación de sistemas constructivos

Sin aire acondicionado

- **DDHcal** Grados hora de calor [°C h]

$$DDHcal = \sum_i (T_i - T_c) \Delta t_i \quad \text{si} \quad T_i > T_c$$

- **DDHfrio** Grados hora de desconfort frío [°C h]

$$DDHcal = \sum_i (T_c - T_i) \Delta t_i \quad \text{si} \quad T_i < T_c$$

Parámetros de evaluación de sistemas constructivos

Sin aire acondicionado

Parámetro	Sistema constructivo	Absortancia solar	Clima Ta - I	Temperatura confort
FD				
TR				
<Tin>				
Tinmin				
Tinmax				
ET				
IDTcal				
IDTfrio				
DDHcal				
DDHfrio				

- Barrios G, Huelsz G, Rojas J, Ochoa J. M, Marincic I. 2012 Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. Energy and Buildings 50, 120-127.

www.enerhabitat.unam.mx



¿Qué es?

¿Cómo se usa?

¿Quiénes somos?

Contacto



No eres usuario

[Regístrate](#)

Usuario:

Contraseña:

[Entrar](#)

[Editar cuenta](#)

Olvidaste tu contraseña

[Recupera](#)

Proyecto: Vivienda Bioclimática. Laboratorio de Energía, Medio Ambiente y Arquitectura UNISON. Imagen Arq. Carlos B. Gámez Ruíz

Ener-Habitat v2.1.0.2013

Esta página funciona mejor en Firefox y Chrome

