

Capítulo 3

Transmisión del Calor

Energía y Medio Ambiente - UNSAM

22-Agosto-2024

En este capítulo, llevamos a cabo una revisión de los principales mecanismos de transmisión de calor. En el próximo capítulo, utilizaremos estos conceptos para estimar las pérdidas o ganancias de calor en una vivienda, lo cual es crucial para lograr un adecuado acondicionamiento térmico de una vivienda o edificio. Estos conceptos serán aplicados para calcular la necesidad de calefacción y refrigeración de interiores, contribuyendo así al acondicionamiento térmico de manera efectiva y eficiente.

Los tres procesos básicos de transferencia de calor son la *conducción*, *convección* y *radiación*. En la naturaleza, estos mecanismos de transmisión operan simultáneamente, cada uno con diferentes grados de importancia. Sin embargo, mediante el diseño adecuado de experimentos, es posible aislar cada uno de estos procesos para su estudio individual y una mejor comprensión. Desde luego, existe una extensa y excelente bibliografía al respecto. [1], [2]

Al estudiar este capítulo, se espera que el estudiante adquiera las habilidades necesarias para calcular los consumos de acondicionamiento térmico de una vivienda en diversas regiones bioambientales.

1. Conducción del Calor

Cuando se coloca una cucharita en una taza de café caliente, notamos que pronto el extremo frío se calienta. Esta observación muestra que el calor *se conduce* a través de la cucharita. La propagación del calor a través de la conducción se caracteriza por:

- ✓ La existencia un *medio material* a través del cual se propaga el calor (cucharita).
- ✓ El calor se transmite el calor *sin transporte de materia*. (no hay nada que le parece suceder a la cucharita).

La ley básica, que describe la conducción del calor, se conoce como la *Ley de Fourier* [3], [2] de la conducción del calor.

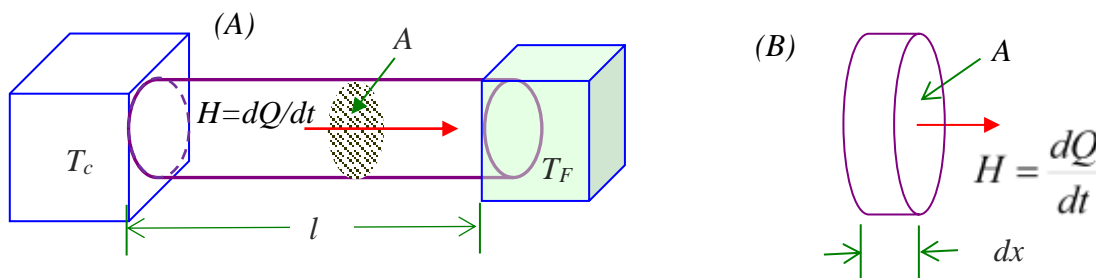


Figura 1. (A) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, asilada por los lados laterales, de longitud l con un extremo caliente (T_c) y el otro frío (T_f). (B) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal dx .

Como consecuencia del *segundo principio de la termodinámica*, [3], [4] el calor siempre se propaga de la zona caliente a la zona fría. El flujo de calor o potencia, $H=dQ/dt$, es decir el calor que fluye por una barra de material de área transversal A en la unidad de tiempo, es proporcional a la diferencia de temperatura de sus extremos (T_C-T_F), al área transversal A de la barra e inversamente proporcional a la longitud l de esta, es decir: [2]

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{T_C - T_F}{l} \quad (\text{xx.1})$$

donde k una constante de proporcionalidad, llamada conductividad térmica y es característica del material (Ver **Figura 1**). En general el subíndice F lo usaremos para designar el extremo frío y C para designar el extremo caliente, lógicamente $T_C > T_F$.

Tabla 1. Conductividades térmicas, calores específicos y densidades de algunos materiales [5].

Material	Cond. Térmica k	Calor Específico c .	Densidad ρ
	W/K.m	J/kg.K (25 °C)	kg/m ³ (25 °C)
Aire	0,023	1,01	1,3
Acero inoxidable	17,0	460	7.900
Agua	0,580	4.186	1.000
Hielo	2,20	2.090	917
Corcho	0,040	1.880	120
Diamante	2.300	509	3.513
EPS 15 kg/m ³	0,037	1.210	15,0
Fibra de vidrio	0,032-0,04	795	220
Grafito	129	710	2.260
PS Poliestireno	0,160	1.300	1.050
Lana de Roca	0,034-0,04	840	30-160
Madera	0,04-04	1.381	840
Mica	0,5	880	2.900
Mármol	2,1	879	2.800
Nitrógeno	0,026	1.040	1,250
Oxígeno	0,026	920	1.429
PEHD Polietileno alta densidad	0,5	1.800	980
PELD Polietileno baja densidad	0,330	2.200	920
Aluminio	237	909	2.700
Hierro	80	473	7.870
Cobre	400	385	5960
Plata	429	232	10.490
Vidrio	0,81-1	833	2.700

La conducción del calor en muchos materiales puede comprenderse como resultado de los choques moleculares, en el caso de líquidos y gases; o el movimiento de electrones o vibraciones de la red

cristalina, en el caso de los sólidos. Ningunos de estos fenómenos pueden percibirse a simple vista. Al chocar las moléculas calientes (más rápidas) con sus vecinas frías (más lentas) les transfieren algo de su energía, y la velocidad de éstas aumenta. Así, la energía térmica, asociada al movimiento microscópico de moléculas, átomos o electrones, se propaga sin transporte de masa, este es el *mecanismo de conducción*. En el caso de los sólidos, el movimiento de los electrones o las vibraciones de la red cristalina (movimiento de *fonones*) se propaga de un punto a otro por conducción.

El cociente $(T_C - T_F)/l$ se denomina el *gradiente térmico* de la barra. El gradiente térmico en cada punto de la barra se define por dT/dx . El signo menos en la Ec.(xx.1) indica que el flujo siempre va de la fuente caliente a la fría, es decir opuesta al signo del gradiente térmico. La forma diferencial, de la Ley de Fourier, Ec. (xx.1), para un elemento de barra de longitud infinitesimal de longitud dx es:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (\text{xx.2})$$

En la Ec.(1), implícitamente hemos supuesto que no hay pérdidas de calor en la barra por los laterales de la misma. La Ec.(xx.1) también puede escribirse como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -\frac{k \cdot A}{l} \cdot (T_C - T_F) = -\frac{\Delta T}{\mathfrak{R}_{ter}} = -U_{ter} \cdot A \times \Delta T. \quad (\text{xx.3})$$

En esta última expresión, \mathfrak{R}_{ter} es la *resistencia térmica* de la muestra, magnitud análoga a la resistencia eléctrica, en el caso de la conducción eléctrica.

$$\mathfrak{R}_{ter} = \frac{l}{k \cdot A} = \frac{1}{U_{ter} \cdot A}, \quad \text{es decir: } U_{ter} = \frac{k}{l} \quad (\text{xx.4})$$

Por su parte la *Transmitancia* U_{ter} de una placa o barra se define como:

$$U_{ter} = \frac{k}{l} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ter} \cdot A}. \quad (\text{xx.5})$$

La *transmitancia* (o *U-value*) de una palca o pared es la cantidad de Watts que *transmite por unidad de área* para un salto térmico de $\Delta T = 1 \text{ K}$ [5].

NOTA: tanto la resistencia térmica (\mathfrak{R}_{ter}) como la transmitancia térmica (U_{ter}), a veces se expresan por elemento completo (pared, etc.) incluyendo su área. Otras veces se expresan por unidad de área. Una forma de identificarlas, además de lo que se explica en el texto, es observar las unidades. Por ejemplo, la transmitancia por unidad de área se expresa en $W/m^2 \cdot K$, y la resistencia por unidad de área como $m^2 \cdot K/W$.

La similitud de la resistencia térmica con la eléctrica es mucho más que una analogía formal, como veremos más adelante, ambos procesos físicos están estrechamente relacionados. Además, esta relación entre resistencia térmica y eléctrica es muy útil a la hora de resolver problemas prácticos. Por ejemplo, si deseamos encontrar las resistencias térmicas de varias capas colocadas en serie, por ejemplo una pared a continuación de la otra, de modo que todo el calor que pasa por cada una de ellas es el mismo, **Figura 2**, la resistencia equivalente del conjunto es simplemente la suma de las resistencias térmicas individuales: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

Similarmente, para paredes en paralelo, es decir dos tipos paredes distintas que están colocadas entre las mismas temperaturas y el calor que fluye por una no fluye por la otra, **Figura 2**, tenemos: $U_{eq} = 1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \dots = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$

Resistencias térmicas en serie: Si tenemos dos medios, separando zonas que están a temperaturas T_1 y $T_2 (> T_1)$ en serie, como se ilustra en la **Figura 2.a**, por conservación de energía, en equilibrio, el flujo a través del medio 1, debe de ser igual al flujo a través del medio 2.

Si llamamos T_m la temperatura de las interfaces 1 y 2, tenemos:

$$H = -\frac{(T_m - T_1)}{\mathfrak{R}_1} \text{ y } H = -\frac{(T_2 - T_m)}{\mathfrak{R}_2} \rightarrow \mathfrak{R}_1 H + \mathfrak{R}_2 H = -(T_2 - T_1). \quad (\text{xx.6})$$

O sea:

$$H = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}_{12}}, \quad (\text{xx.7})$$

con

$$\mathfrak{R}_{12} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2. \quad (\text{xx.8})$$

Resistencias térmicas en paralelo: por un razonamiento similar, para el caso de dos medios en paralelo como en la **Figura 2. b**, tenemos que $H=H_1+H_2$, de donde obtenemos que:

$$H = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}_1} - \frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}_2} = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}_{12}}, \quad (\text{xx.9})$$

con

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{12}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2}. \quad (\text{xx.10})$$

O también, en términos de las Transmitancias o valor- U :

$$U_{12} = U_1 + U_2. \quad (\text{xx.11})$$

Este modo de combinar resistencias térmicas es completamente similar a como se combinan las *resistencias eléctricas* en serie y paralelo. De hecho, todas las técnicas que se usan para el caso de circuitos eléctricos pueden ser usadas para el caso térmico. Claramente, estas expresiones pueden generalizarse para combinaciones más complejas de medios en serie y paralelo.

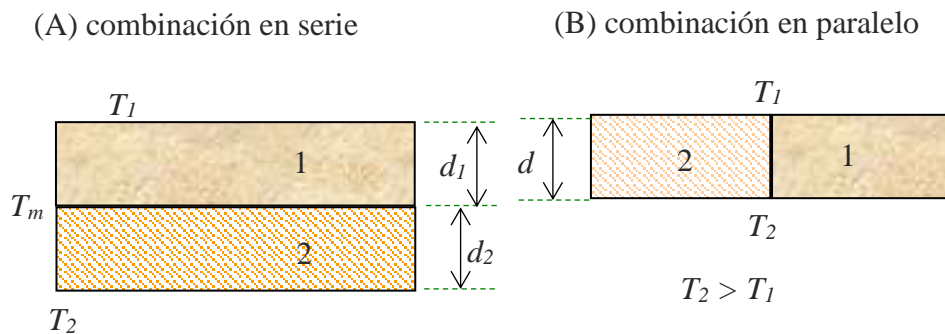


Figura 2. Conducción a través de combinación de medio en seria (izquierda) y en Paralelo (derecha)

Si analizamos los valores de las conductividades térmicas de los materiales, **Tabla 1**, vemos que los sólidos que son buenos conductores de electricidad son también buenos conductores del calor. Por otro lado, el aire es un muy mal conductor de la electricidad y el calor.

Las propiedades aislantes de la ropa provienen fundamentalmente de las propiedades aislantes del aire. Nuestro cuerpo calienta el aire en contacto con la piel y estos "paquetes" de aire dentro del tejido de la ropa (o el pelo) nos aíslan del medio. Si corre viento, esta capa de aire caliente es remplazada por otra fría y sentimos este efecto, por la sensación de frío experimentamos. La ropa nos mantiene calientes pues el aire en su interior, no se mueve con facilidad y actúa como aislante térmico. De hecho, tanto la lana, como los revestimientos de *duvet*, funcionan de este modo. En el caso de los animales, las plumas y el pelo cumplen el mismo rol que la ropa en los humanos. A propósito, es claro que *la ropa no genera calor*, a esté lo generamos nosotros a través de nuestro metabolismo, la ropa sólo nos aísla térmicamente.

2. Convección del calor

Aunque los líquidos y los gases no suelen ser muy buenos conductores de calor, pueden transmitirlo por convección. La propagación del calor a través de la convección se caracteriza por:

- ✓ Existencia de un *medio material fluido* a través del cual se propaga el calor
- ✓ Variación de la densidad del medio con la temperatura.
- ✓ Existencia de un campo gravitatorio. Sin él no hay convección.
- ✓ El calor se transmite en este caso *por transporte de materia*.

Mientras que la conducción implica moléculas y/o electrones que se mueven pequeñas distancias y chocan, en la convección interviene el movimiento de muchas moléculas a lo largo de distancias microscópicas. Dado que el enfoque matemático de este proceso resulta bastante complicado, sólo se lo describirá en forma cualitativa [1], [5], [2].

La convección puede ser *libre o forzada*. Un cuerpo que se enfría en el aire, en ausencia de corrientes de aires generadas artificialmente, es un ejemplo del primer caso. Un calefactor con ventilación forzada o caloventor, es un ejemplo de *convección forzada*. En estos artefactos, el aire se calienta y luego se distribuye mediante un ventilador. La convección natural también ocurre, por ejemplo, en el aire caliente que se eleva al calentarse, el aire en las adyacencias de un radiador o cuerpo caliente se expande y se eleva. Ver **Figura 4**. Cuando se calienta una olla con agua, se producen corrientes de convección. El agua del fondo sube, debido a su menor densidad, y reemplaza al agua más fría de la parte superior. Las corrientes oceánicas, como la corriente del Golfo, son ejemplos de *convección natural* a gran escala, al igual que los vientos u corrientes atmosféricas ascendentes.

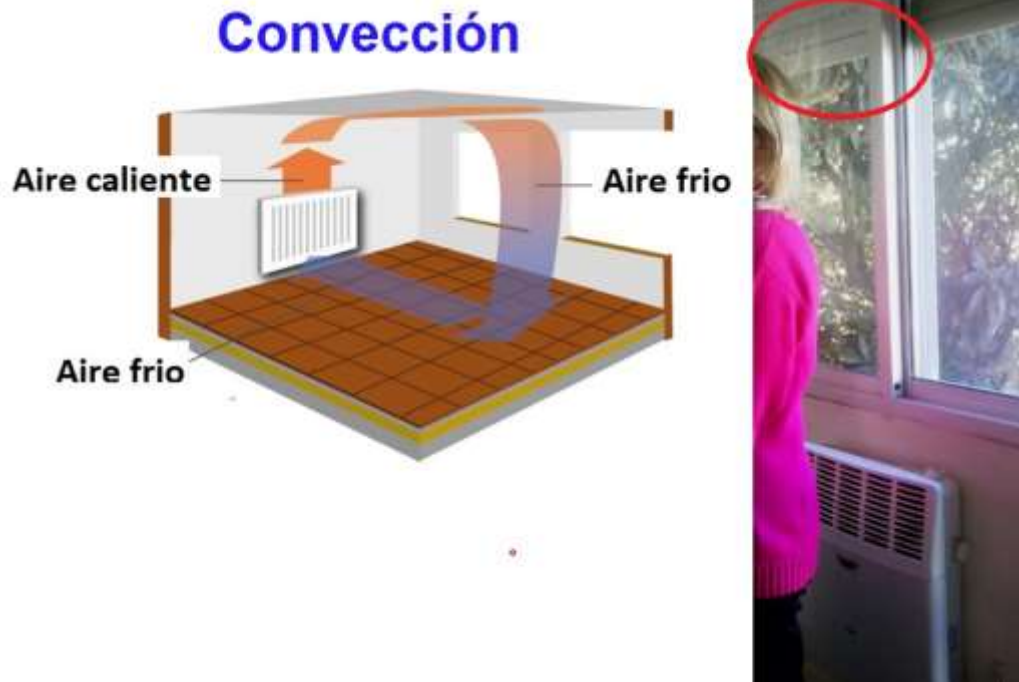


Figura 3. Fenómeno de convección del calor. A la derecha vemos como un calefactor encendido, genera un movimiento ascendente del aire, que levanta el cabello de la chica de la foto (circulo rojo). A la izquierda, como en el calor de un calefactor genera un movimiento convectivo del aire que calienta la habitación.

En el caso de la convección natural, al rededor del objeto caliente se forma una capa delgada (capa límite) de aire que por conducción propaga el calor de la superficie caliente al medio. Es posible escribir el flujo de calor disipado por convección natural como [5], [2]:

$$P_{conv} = H_{conv} = A \cdot h \cdot (T_{sup} - T_{medio}), \quad (xx.12)$$

donde A es la superficie del cuerpo expuesta al medio, h una constante característica, *coeficiente de convección*, que depende del régimen de disipación (laminar, turbulento, etc.) de la conductividad térmica del medio fluido y el estado de las superficies. T_{sup} y T_{medio} designan a las temperaturas de la superficie del cuerpo y del medio fluido respectivamente. Esta ley de enfriamiento, cuando se aplica a un cuerpo inmerso en un medio que está a una temperatura constante, T_{medio} , cuya masa es m , durante un intervalo de tiempo dt , perderá (o ganará) calor: $dQ=mc \cdot dT$. Por tanto $H=dQ/dt= m \cdot c \cdot dT/dt$, por lo tanto la Ec.(xx.12) se puede escribir como:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{A \cdot h}{m \cdot c} \cdot (T - T_{medio}) = -\lambda(T - T_{medio}), \quad (xx.13)$$

que se conoce como la *ley de enfriamiento de Newton*.

La Ec.(xx.13) también puede escribirse como:

$$H_{conv} = -A \cdot h \cdot (T - T_{medio}) = -\frac{\Delta T}{R_{con}}, \quad \text{con } R_{con} = 1/(A \cdot h) = 1/A \cdot U_{conv} \quad (xx.14)$$

3. Transmisión del calor por paredes o sistemas compuestos

Lo interesante de la resistencia de convección es que puede combinarse con las resistencias de conducción siguiendo las mismas reglas de combinaciones de serie y paralelo discutidas previamente. Debe tenerse en cuenta que, a diferencia de la constante de conductividad térmica, k , que es una propiedad característica de cada sustancia, h varía con el tipo de medio y de acuerdo a las condiciones particulares de la superficie y en régimen de movimiento del fluido alrededor del objeto. Por ejemplo, se encuentra experimentalmente que el valor de h exterior a un vidrio de ventana es $h_{ext} \approx 28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, mientras que en el lado interior es $h_{int} \approx 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, como consecuencia del hecho que por lo regular las corrientes de aire exteriores son más intensas del lado exterior a una vivienda que del lado interior.

Combinando las Ecs.(xx.8) y (xx.14) esto equivaldría a tener en el lado exterior una capa límite de espesor efectivo de uno 8 mm y una capa límite de unos 3 mm en el interior. Ver Tabla 2.

Tabla 2 Valores característicos de los *coeficientes de convección*. En paréntesis valores nominales de la constante h [6], [4].

Tipo de convección	h (W/m ² .K)
Convección libre en gases	2 -25
Convección libre en líquidos	100- 1000
Convección forzada en gases	25-250
Convección forzada en líquidos	50 – 20000
Convección forzada en líquidos con ebullición y condensación	2500-10 ⁴
Aire externo a un vidrio (interior)	5-10 (8)
Aire externo a un vidrio (exterior)	25-40 (28)

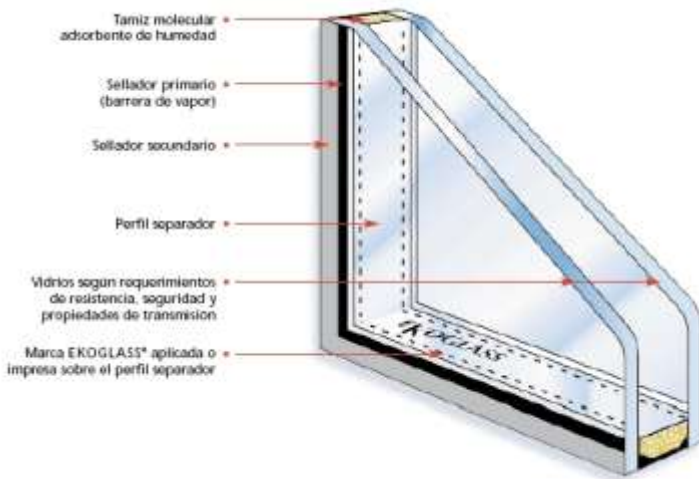


Figura 4. Ventana con Doble Vidrio Hermético (DVH). Esta figura corresponde a un particular fabricante Ekoglass.

Ejemplo 1. Transmitancias de vidrios simples y dobles

Vidrio simple: Un vidrio simple, puede considerarse constituido por tres resistencia térmicas en serie: la capa (límite) de aire exterior, el vidrio propiamente dicho (sólido) y la capa (límite) de aire interior, como se ilustra esquemáticamente en la **Figura 5**. La resistencia efectiva del vidrio simple de $d_v \approx 4\text{mm}$, será:

$$\mathfrak{R}_{\text{vidrio}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{W}} \cdot \text{K} \right) = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{h_{ce}} + \frac{d_v}{k_v} + \frac{1}{h_{ci}} \right) \approx \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{28} + \frac{0.004}{1} + \frac{1}{8} \right) \approx \frac{0.165}{A}$$

$$\mathfrak{R}_{2_{\text{vidrio}}} (\text{m}^2/\text{W} \cdot \text{K}) = \frac{0,001}{A} \cdot (35 + 4 + 125) \approx \frac{0,165}{A} \quad (\text{xx.15})$$

Pérdidas de calor por aberturas de vidrio:

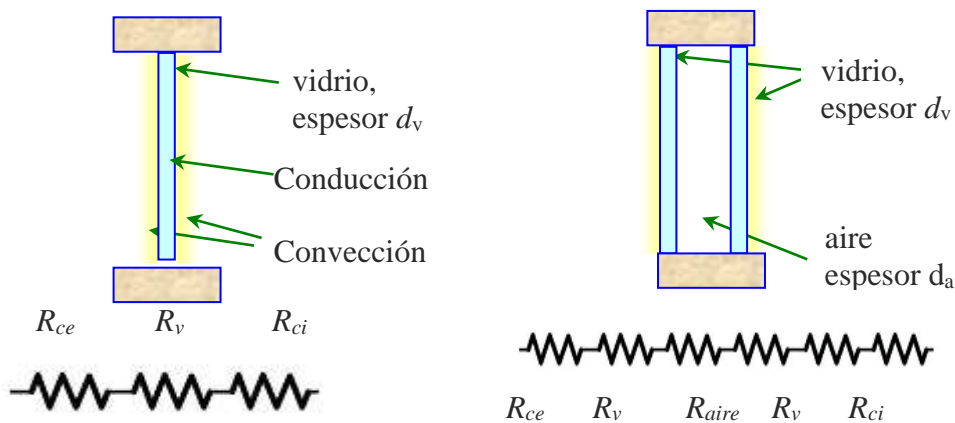


Figura 5. Ventana de simple y de doble panel: dos vidrios y una cámara de aires en el medio. En esta figura R_{ce} y R_{ci} se refieren a la resistencia de convección del aire (exterior e interior) en las adyacencias del vidrio.

Nótese, que el mayor aporte a la resistencia térmica de una hoja de vidrio simple no viene del vidrio sino de la capa de aire límite interior, ($1/h_{int} \sim 0.125$) seguida de la capa límite externa ($1/h_{ext}$), de hecho, estas dos capas constituyen el 97% de la resistencia total de la hoja de vidrio. Por esta razón, **considerar los efectos de las capas límites interior y exterior es muy importante para calcular la resistencia**

térmica total o transmitancia de cualquier tabique o pared. Esta práctica de usar resistencias convectivas, en ambos lados de los vidrios, paredes, techos, etc. es muy importante y se aplica también a todo elemento expuesto al aire interior y exterior.

Vidrio doble: la resistencia efectiva de un vidrio doble de $d_v \approx 4\text{mm}$ y $d_{aire} \approx 1\text{ cm}$, será:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_{2_vidrio} (m^2/w.K) &= \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{h_{ce}} + 2 \frac{d_v}{k_v} + \frac{d_{aire}}{k_{aire}} + \frac{1}{h_{ci}} \right) \approx \\ &\approx \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{28} + \frac{0,008}{1} + \frac{0,01}{0,023} + \frac{1}{8} \right) = \frac{0,001}{A} \cdot (35 + 8 + 435 + 125) \\ \mathfrak{R}_{2_vidrio} (m^2/w.K) &= \frac{0,001}{A} \cdot (35 + 8 + 435 + 125) \approx \frac{0,6}{A} \quad (xx.16) \end{aligned}$$

Nótese, que el mayor aporte a la resistencia térmica de una **hoja de vidrio doble**, no viene del vidrio sino principalmente del **aire entre los dos vidrios** (72%) y de la capa de aire límite interior, (21%) seguida de la capa límite externa (6%), de hecho estas tres capas constituyen el 99% de la resistencia total de la hoja de vidrio doble. Para estimar la mejora en el aislamiento v de una ventana de doble vidrio, respecto de una de panel simple, debemos dividir $H_{2vidrio}/H_{1vidrio}$, el resultado es:

$$v = \frac{H_{1vidrio}}{H_{2vidrio}} = \frac{\mathfrak{R}_{2_vidrio}}{\mathfrak{R}_{1vidrio}} \approx \frac{0,6}{0,165} \approx 3,6 \quad (xx.17)$$

para una ventana típica, es decir que la mejora en aislación es un factor de 4 aproximadamente. Un problema con este tipo de ventanas es el mantenimiento del interior libre de hongos y humedad. Para lograrlo, se suele usar algún *gas inerte* en el interior, por ejemplo: N_2 o Ar a una presión ligeramente superior a la atmosférica y algún tipo de sílica para absorber la humedad (agua) y el gas neutro impide el crecimiento de hongos. Con nuevas tecnologías, usando láminas antirreflectantes especiales (*low reflectance coating*) es posible mejorar aún más la aislación de ventanas dobles. [6]

4. Radiación del calor

En la conducción y la convección es necesaria la presencia de la materia para que se produzca la transferencia de energía. Sin embargo, la vida sobre la Tierra depende de la transferencia de energía del Sol a la Tierra, y ésta llega a nuestro planeta atravesando el espacio vacío. ¡Recordar que la atmosfera es una capa muy delgada, de unos 15 a 30 km de espesor, y la distancia Tierra Sol es de unos 150 millones de km! Si la Tierra tuviese el tamaño de un melón o pelota de futbol de 15 cm de radio, el espesor de la atmosfera seria 0,5mm o sea equivalente a 2 hojas de papel. A propósito, en esta escala el Sol estaría a 4 km.

La energía del Sol nos llega por el mecanismo de *radiación*. El calor que recibimos de un hogar a leña o a gas es principalmente energía radiante (la mayor parte del aire que se calienta en la chimenea sube por el tiro mediante convección y no llega hasta nosotros), lo mismo ocurre con el calor de una estufa eléctrica. La propagación del calor a través de la radiación se caracteriza por:

- ✓ No necesitar la existencia de un medio *material* para que se produzca la radiación.
- ✓ El calor se transmite *sin transporte de materia*.

La radiación consiste esencialmente en ondas electromagnéticas. La radiación del Sol se produce principalmente en la zona visible y en otras longitudes de onda a las que el ojo no es sensible, como la infrarroja, que es la principal responsable del calentamiento de la Tierra.

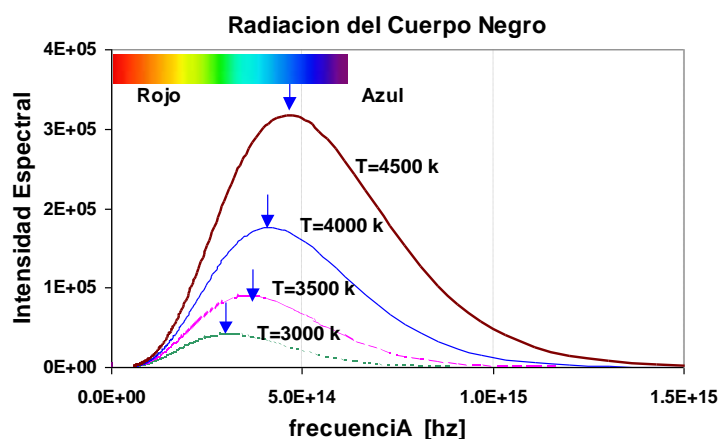
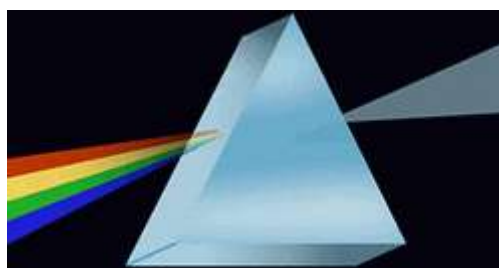


Figura 6. Espectro de la radiación electromagnética de un cuerpo negro a distintas temperaturas. Las flechas indican la posición del máximo de radiación a cada temperatura. Arriba se muestra como al pasar un haz de luz blanca, por ejemplo, proveniente de una fuente incandescente, al pasar por un prisma se recompone en los distintos colores del arco iris. Abajo, vemos las curvas de radiación emitida por cuerpos (negros) de distintas temperaturas. Estas curvas vienen descriptas por la Ley de Plank. [3]

La tasa a la que un objeto irradia energía viene dada por la expresión de Stefan-Boltzmann:

$$P_{irr} = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T^4 \tag{xx.18}$$

aquí, A es el área de la superficie del objeto que irradia y que está a la temperatura absoluta T. $\varepsilon(\lambda, T)$ es una propiedad característica de cada material y las condiciones de su superficie llamada la emisividad del material y que en general depende de la temperatura y longitud de onda λ o tipo de radiación electromagnética (visible, infrarroja, etc) ($1 > \varepsilon > 0$). σ_{SB} es una constante universal llamada la constante de Stefan-Boltzmann, su valor es $\sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. En equilibrio térmico un cuerpo absorbe tanto como irradia (*Ley de Kirchoff*), por lo tanto, los *buenos emisores* son también *buenos absorbentes*. Las superficies negras tienen emisividades mayores que las claras o brillantes. Esto hace que los objetos negros y oscuros absorben casi toda la radiación que les llega y es la causa de que la ropa clara sea preferible a la oscura cuando el día es caluroso. Si un objeto de temperatura T_1 está en un medio a una temperatura T_2 el objeto estará absorbiendo y emitiendo radiación, la potencia radiada neta será:

$$P_{irr_neta} = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \tag{xx.19}$$

En equilibrio, $P_{irr_neta}=0$, o sea $T_1=T_2$.

Si T es próximo a T_2 , ($T \approx T_2$) entonces:

$$P_{irr_neta}(T) \approx 4 \cdot A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T_2^3 \cdot (T - T_2) \quad (xx.20)$$

Un cuerpo de masa m y calor específico c , se enfriará siguiendo la ecuación:

$$\frac{dT}{dt} \approx (4 \cdot A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T_2^3 / m \cdot c) \cdot (T - T_2) = k_{ir} \cdot (T - T_2) \quad (xx.21)$$

La radiación emitida por un cuerpo (negro) a distintas temperaturas viene descrita por la Ley de Plank. [7], [3] En la parte inferior de la **Figura 6** vemos las curvas de radiación emitidas por cuerpos (negros) de distintas temperaturas.

5. Radiación del cuerpo negro

Todo objeto caliente emite radiación electromagnética. Cuando encendemos una estufa eléctrica, de esas que tienen un tubo de cuarzo, notamos que a medida que se calienta, va irradiando más calor y cada vez más copiosamente; también su color va cambiando. Al principio sentimos el calor, pero el tubo no brilla. Al aumentar más la temperatura el tubo se pone rojo incandescente y si se calienta más aún. Lo mismo se observa en una lámpara incandescente, la luz irradiada se vuelve similar a la luz de Sol (luz blanca). Esta es una característica de todos los objetos: a medida que aumenta la temperatura la cantidad de energía radiada aumenta fuertemente y su color va cambiando.

En la **Figura 6** se presentan los espectros de radiación de un cuerpo (negro) a distintas temperaturas absolutas (la temperatura absoluta es la temperatura en grados centígrado más 273 °C, sus unidades son grados Kelvin, o sea, $T_{absoluto} [K] = T[°C] + 273.15°C$). Si la radiación de un cuerpo caliente, llamado comúnmente “cuerpo negro”, se hace pasar por un prisma, la misma se descompone en distintas frecuencias (colores). Vemos que a medida que aumenta la temperatura, el área de las curvas de la **Figura 6** aumentan rápidamente (esto es la energía total emitida por unidad de tiempo), justamente esta área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann, Ec.(xx.18). Además, notamos que el máximo de la curva, representado por las flechas verticales, se va corriendo a frecuencias mayores a medida que aumenta la temperatura. Se puede escribir una relación entre la frecuencia de máxima radiación para cada temperatura. Esta relación se llama *Ley de Wien* [3]:

$$f_{Maximo} [Hz] = 1.038 \times 10^{11} \cdot T [K] \quad (xx.22)$$

La *ley de Wien* afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia las frecuencias más grandes, o equivalentemente a regiones de longitudes de onda más cortas. Esta ley nos permite entender por qué un cuerpo al calentarlo, primero se pone rojizo y a medida que se calienta más se va volviendo más azul, pasando por un color blanco incandescente. Esta propiedad de los cuerpos calientes es lo que posibilita la visión de mamíferos en la oscuridad. Dado que los mamíferos mantenemos una temperatura muy estable, de 37°C (= 310 K), nuestro espectro de radiación tiene un máximo en el infrarrojo. Si usamos un visor sensible a esta radiación (cámara infrarroja) [8] podremos ver la silueta de un mamífero en la oscuridad. Ver **Figura 7**. Estas propiedades de la radiación de un cuerpo caliente también se aplican en termografía, que es una técnica que permite tomar una foto que muestra la distribución de las temperaturas de una persona o cualquier objeto. [8] Esta técnica permite detectar, algunas enfermedades, ya que los tejidos enfermos, muchas veces tienen una temperatura levemente mayor a los sanos.

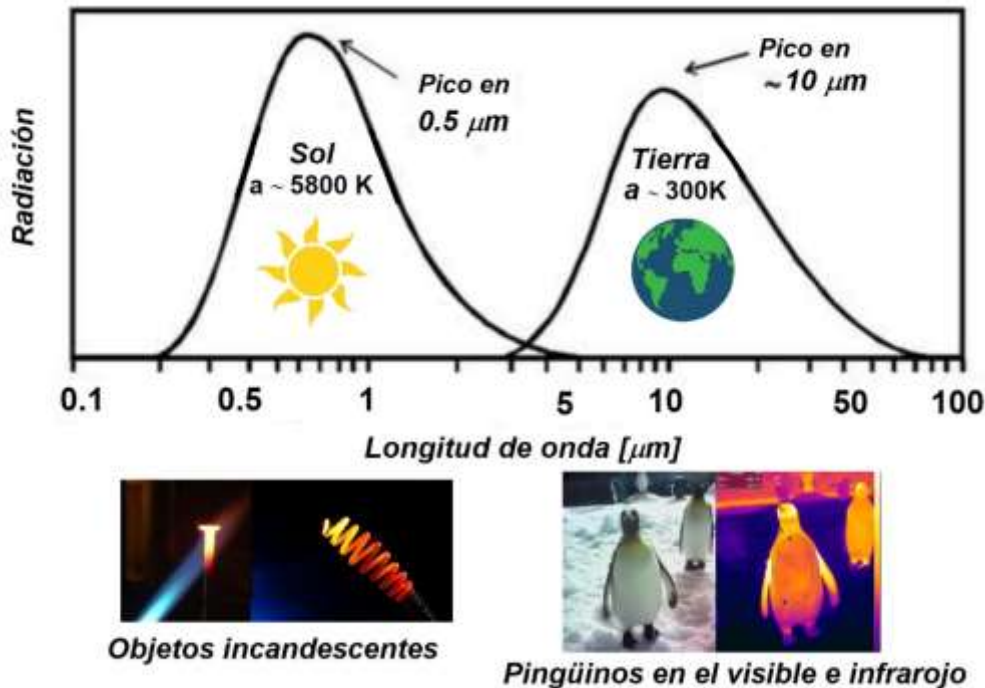


Figura 7. Arriba, espectros emisión de objetos calientes como el Sol que irradia principalmente en el visible ($T \sim 5800\text{ K}$) y objetos a temperaturas típicas de la tierra ($T \sim 300\text{ K}$). Abajo, fotos en el visible de objetos incandescentes ($T > 3000\text{ K}$) y objetos y animales terrestres ($T \sim 300\text{ K}$), en el visible e infrarrojo.

La ley de Wien se utiliza también para determinar las temperaturas de las estrellas, a partir de los análisis de su radiación. En general, estudiando el espectro de emisión de un cuerpo podemos determinar su temperatura.

6. Efecto de Invernadero

Los invernaderos son estructuras diseñadas para regular la temperatura y la humedad de un ambiente interior. Existen diferentes tipos de invernaderos, pero todos cuentan con superficies cubiertas con materiales transparentes que dejan pasar la luz del sol y el calor, pero bloquean el paso de la radiación infrarroja. Ver **Figura 8**. Los materiales más comunes utilizados en los invernaderos modernos son el vidrio o plásticos rígidos de policarbonato. También se usan laminas nylon o polietileno.

La clave del funcionamiento de un invernadero se ilustra en la **Figura 9**. Tanto el vidrio común como una lámina de plástico o nylon son transparentes a la luz visible pero opacos a la radiación infrarroja (IR). Cuando el invernadero está expuesto a la radiación solar, la luz del sol penetra en su interior. Los objetos en su interior irradian energía, principalmente en la región del IR, que no pasa el vidrio o nylon. Así, la temperatura en su interior aumenta respecto a la temperatura exterior. El efecto invernadero se produce cuando la radiación solar incide sobre un recinto cerrado, con paredes transparentes a la radiación visible, pero opacas o muy absorbentes de la radiación infrarroja, por ejemplo, vidrio, pero hay varios gases que tienen la misma propiedad que el vidrio o nylon, por ejemplo el metano o CO_2 , Ver **Figura 14** y **Figura 15**.



Invernadero de Plástico o nylon (agrotileno)

Invernadero de Vidrio

Figura 8. A la izquierda, invernadero de plástico o nylon. A la derecha un invernadero de paredes y techo de vidrio. Ambas estructuras se usan para cultivar plantas a temperaturas más altas que las que prevalecen a cielo abierto o evitar heladas (momentos en que la temperatura externa congela el agua.)



Figura 9. Fotografías en visible e infrarrojo (IR) de la misma situación o personas. Arriba a la izquierda vemos que una bolsa de plástico negra es opaca en el visible pero transparente en el IR. Arriba, derecha y abajo, vemos como un vidrio común es transparente al visible pero opaco en el IR.

¿Qué hace que un invernadero sea especial? principalmente, es la cantidad de luz, la temperatura controlada y la cantidad de humedad fácilmente manipulada que reciben las plantas. algunos invernaderos están dedicados a cultivos decorativos como las flores. Otros cuentan con plantas que dan lugar a productos comestibles, como los tomates, lechuga, etc. Que no sería posible cultivar

de otra manera en regiones frías. Los invernaderos también protegen a las plantas de congelamiento, cuando el sol se pone, el calor no se disipa tan rápido como lo hace en el exterior, lo que permite que las plantas que no congelen en las noches fría (heladas).

Desde el punto de vista de la física, lo que calienta un invernadero es lo mismo que calienta el interior de un automóvil en un día soleado. La luz visible ingresa al vehículo a través del vidrio, que calientan el interior. Estos elementos internos (tapizado, asientos, etc.) comienzan a irradiar energía, en la región del IR, pero como esta radiación no pasa por el vidrio, gran parte de la energía que penetra por los vidrios queda atrapada. Así es posible que en un día soleado de invierno, a una temperatura ambiente de unos 15°C, uno deje un auto al sol, y después de poco tiempo es posible que su interior este a unos 40°C o aún más caliente.

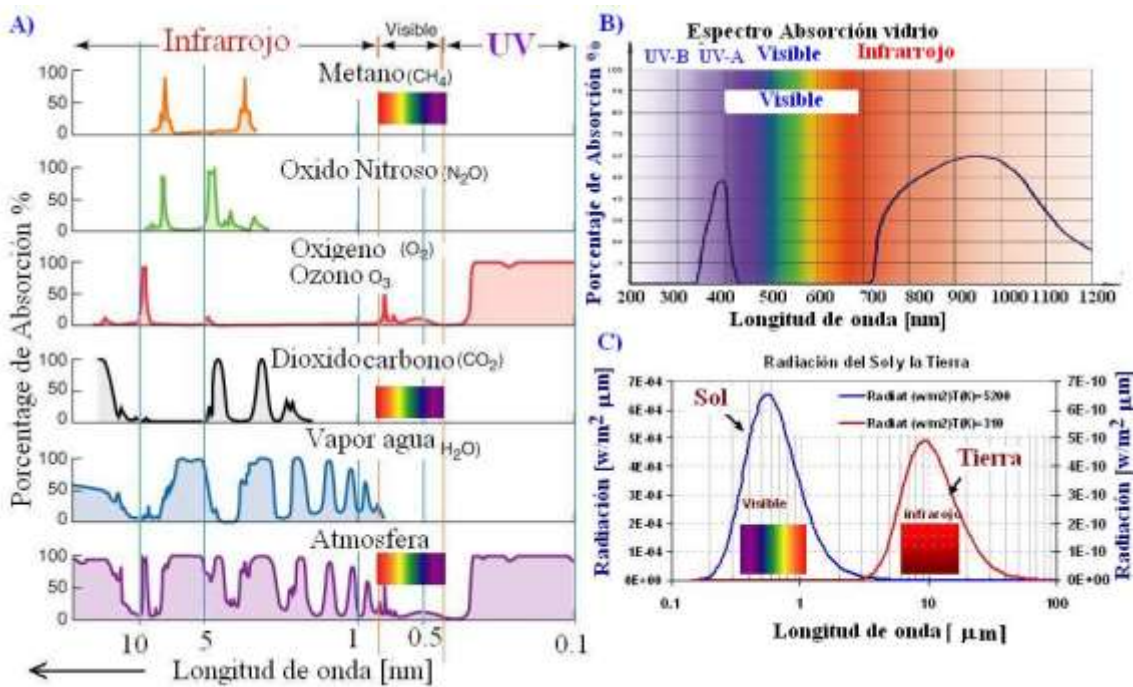


Figura 10. A) Espectros absorción para distintos gases presentes en la atmósfera terrestre. B) Espectro de Absorción del vidrio. C) Curvas de emisión de dos cuerpos negros a dos temperaturas diferentes: $T=5200$ K (Sol) y a $T=310$ K (Tierra).

Efecto invernadero en la Tierra. De hecho, el efecto invernadero también opera en la tierra. Ver Figura 10. Los rayos del sol llegan a la Tierra la calientan. Luego la Tierra libera parte de ese calor en forma de radiación IR. Los gases de efecto invernadero en la atmósfera (principalmente el dióxido de carbono, el metano, el vapor de agua, etc.) atrapan parte de esta radiación IR y la reemiten al interior, aunque algo puede escapar al espacio. Esto hace que la atmósfera se caliente, al igual que el interior de un invernadero, o similar a como una manta nos mantiene caliente por la noche.

De este modo, la Tierra es aproximadamente unos 30°C más cálida que los que ocurriría sin este mecanismo de calentamiento. De no existir este efecto, nuestro planeta sería mucho más frío y la vida tal como la conocemos no sería posible. Su temperatura media sería como la de la Luna o sea unos -22 °C. La temperatura de la Luna de día es de unos 127 °C y de noche de unos -173°C y como en la Luna no hay atmosfera, tampoco hay efecto invernadero allí. Sin embargo, en la Tierra, gracias al efecto invernadero, la temperatura media es de unos 15 °C, lo que permite que los océanos no estén todos congelados y la vida como la conocemos sea posible. Así, gracias a este efecto y los gases de efecto invernadero que existen en la atmosfera, hacen que la vida en la Tierra sea viable. Sin embargo, debido a actividades humanas, la cantidad de estos gases (CO₂, metano, vapor de agua, etc) ha venido

aumentando dramáticamente, y hay cada vez más evidencia que este incremento es el responsable del calentamiento global que estamos experimentando. [9]

En el caso de la tierra, ver **Figura 10**, la radiación del Sol pasa por la atmósfera, pero la radiación IR emitida por la Tierra, que están a más baja temperatura ($T \sim 30^\circ\text{C}$). Así, la radiación térmica de la superficie de la Tierra es en gran medida absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI), vapor de agua, metano, CO_2 , ozono, etc. La radiación absorbida es re-emitida en todas direcciones. El efecto invernadero fue descubierto y explicado por J. Fourier [12], J. Tyndall [13] y S. Arrhenius [14]. Dado que la *reflectividad* de la Tierra es de aproximadamente el 30% (*albedo*), su temperatura de equilibrio, en ausencia de EI, sería de unos -18°C . El efecto de invernadero eleva la temperatura media de la Tierra en unos 27°C , para dejarla en un agradable promedio de 15°C . Ver sección de temperaturas de los planetas.

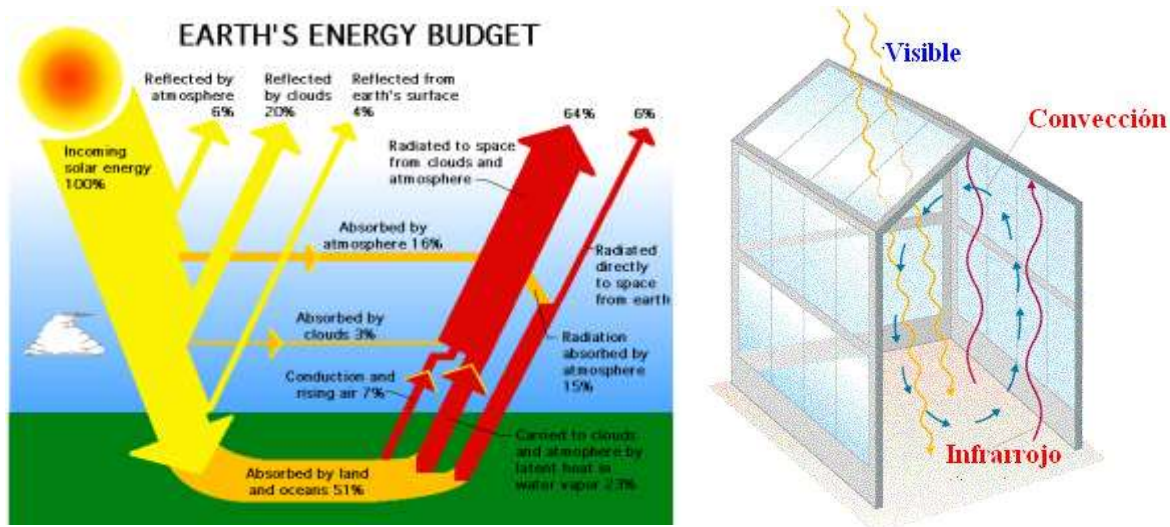


Figura 11. A la izquierda, balance energético en la atmósfera terrestre. A la derecha un invernadero de paredes y techo de vidrio. El vidrio, transparente al visible, no lo es al infrarrojo, que es la radiación emitida por los objetos a temperaturas próximas a la ambiental, $T \sim 30^\circ\text{C}$.

7. ♣ Enfriamiento y Evaporación

La evaporación es una transición lenta de las moléculas en la superficie de un líquido a la fase vapor. El vapor circundante, en la capa límite al líquido, en general pronto tiende a saturarse con la sustancia que se evapora. Cuando una molécula con alta energía cinética se acerca de la superficie, si su energía es mayor que un cierto valor, $\epsilon_{ev} = \frac{1}{2} \mu v_{esc}^2$, puede pasar a la fase vapor, es decir se evapora. Como las moléculas que preferentemente se evaporan, son las de mayor energía, $v > v_{esc}$, la que queda en la fase líquida tiene en promedio menos energía, es decir el proceso de evaporación genera enfriamiento. Ver Figura xx.24.

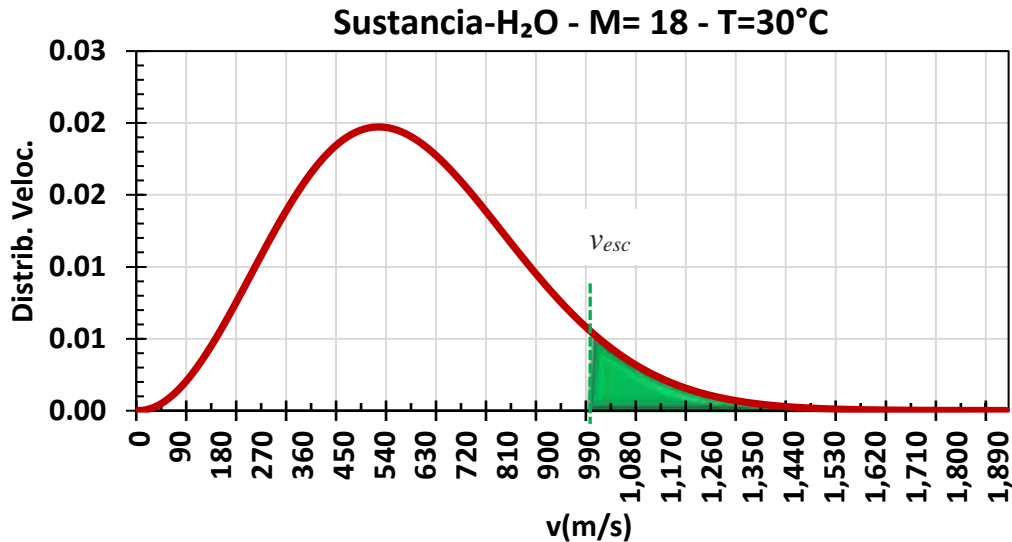


Figura 12. Distribución de las velocidades moleculares según la Ley de Maxwell-Boltzmann. A la izquierda se indican esquemáticamente: la velocidad más probable, media y la velocidad cuadrática media.

Las moléculas de un líquido preferentemente se evaporen, son la que están cerca de la superficie, deben moverse en la dirección adecuada y tener suficiente energía cinética para vencer las fuerzas intermoleculares de atracción de la fase líquida, es decir tiene energía cinética $\varepsilon > \varepsilon_{esc}$ [3]. Cuando solo una pequeña proporción de las moléculas cumple con estos criterios, la tasa de evaporación es baja. Dado que la energía cinética de una molécula es proporcional a su temperatura, la evaporación se acelera a temperaturas más altas. A medida que escapan las moléculas más energéticas, las moléculas restantes en la fase líquida se tienen menor energía cinética o sea la temperatura del líquido disminuye. Este fenómeno también se denomina enfriamiento evaporativo.

Este mecanismo lo podemos percibir fácilmente, mojándonos la de la mano con la lengua, si soplamos, experimentaremos una sensación de enfriamiento. De hecho, este es el mecanismo de enfriamiento natural de los humanos. Cuando hace calor, transpiramos, la brisa ayuda a evaporar la transpiración, de este modo nos refrescamos. Algunos animales, como los perros, usan la lengua como elemento de enfriamiento, cuando están acalorados jadean con la lengua afuera, lo que estimula la evaporación y enfriamiento de la lengua y su cuerpo. Asimismo, en los días húmedos, este efecto de evaporación se ve inhibido, ya que la humedad ambiente es próxima a la saturación. Con lo cual este mecanismo de enfriamiento se inhibe. De allí la famosa frase: “*lo que mata es la humedad.*”

Los sistemas de enfriamiento evaporativo utilizan el mismo principio que la transpiración para proporcionar enfriamiento a la maquinaria y los edificios. Una torre de enfriamiento es un dispositivo de rechazo de calor, que descarga aire caliente de la torre de enfriamiento a la atmósfera a través del enfriamiento del agua. Una cantimplora, con un paño humedecido, o una bota de vino funciona del mismo modo.

8 . ♣ Temperatura de los planetas

Un modelo muy útil simple de aplicación de los conceptos discutidos en este capítulo es la estimación de las temperaturas de los distintos planetas del sistema solar (SS). Para ello vamos a suponer que tenemos un planeta cualquiera del SS, que está a una distancia d_p del Sol y tiene una temperatura media T_p . La energía que llega a la Tierra del Sol, por unidad de superficie, se llama la Constante Solar (CS). Su valor será:

$$CS = \frac{P_{Sol}}{4\pi \cdot d_p^2} \approx 1.368 \text{ kW} \quad (\text{xx.71})$$

Si supondremos que el albedo del planeta es α_P . El *albedo* (palabra que tiene la misma raíz que *albino*, deriva del latín y significa *blancura o blanco*) es la relación entre la potencia reflejada o dispersada por la superficie del planeta y la potencia que le llega del Sol. Vamos a suponer que la Potencia Radiada por el Sol es P_{Sol} . Si la temperatura de espacio la designamos por $T_e \approx 3$ K, en equilibrio térmico tenemos:

$$P_{Absorbida} = CS \cdot (1 - \alpha_P) \cdot \pi \cdot R_p^2 = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R_p^2 \cdot \sigma_{SB} (T_p^4 - T_e^4), \quad (xx.72)$$

Donde el segundo término es la potencia absorbida por la cara del planeta expuesta al Sol y el tercer término la irradiada por el planeta en toda su superficie ($4\pi R_p^2$). R_p es el radio del planeta, por lo tanto, suponiendo que $T_e \ll T_p$, tenemos:

$$T_p = \left[\frac{P_{Sol}}{16\pi \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot d_p^2} (1 - \alpha_P) \right]^{1/4} = \left[\frac{CS}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB}} (1 - \alpha_P) \right]^{1/4}. \quad (xx.73)$$

En particular para la Tierra, ($\alpha_T \approx 0,3$ y $\epsilon_T \approx 1$) tenemos:

$$T_T = \left[\frac{CS}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB}} (1 - \alpha_T) \right]^{1/4} \approx 255K = -18^\circ C. \quad (xx.74)$$

Esta temperatura sería la que tendría la Tierra en ausencia de Efecto de Invernadero. Con lo que podemos escribir también:

$$T_P = T_T \left[\frac{(1 - \alpha_P)}{(1 - \alpha_T)} \right]^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{d_T}{d_P}}. \quad (xx.75)$$

Que nos permite calcular la temperatura de todos los planetas de SS conociendo sus distancias al Sol y sus respectivos albedos [33], [34]. En la Tabla XX.8, se indican los valores de estas distancias, y las temperaturas medidas de los planetas junto con las estimaciones de dichas temperaturas usando la Ec. (Xx.75). En esta aproximación hemos supuesto que los albedos de todos los planetas varían, pero en general caen en el rango [35]: $\alpha_P = 38 \pm 15$.

Planeta	dp (UA)	Tp_Exp (K)	Tp_Cal (K)
Mercurio	0.39	452	408
Venus	0.72	726	300
Tierra	1.00	255	255
Marte	1.52	230	207
Júpiter	5.20	120	112
Saturno	9.54	88	83
Urano	19.18	59	58
Neptuno	30.06	48	47
Plutón	39.53	37	41

Tabla xx.11 – Valores las distancias de los distintos planetas respecto del Sol, en Unidades Astronómicas, segunda columna y sus respectivas temperaturas medidas (tercera columna). La última columna son los valores de las Temperaturas calculadas usando la Ec. Xx.70. Nótese que Venus tiene una temperatura mucho mayor que la prevista por este caculo, debito al importante efecto de invernadero que ocurre en este planeta.

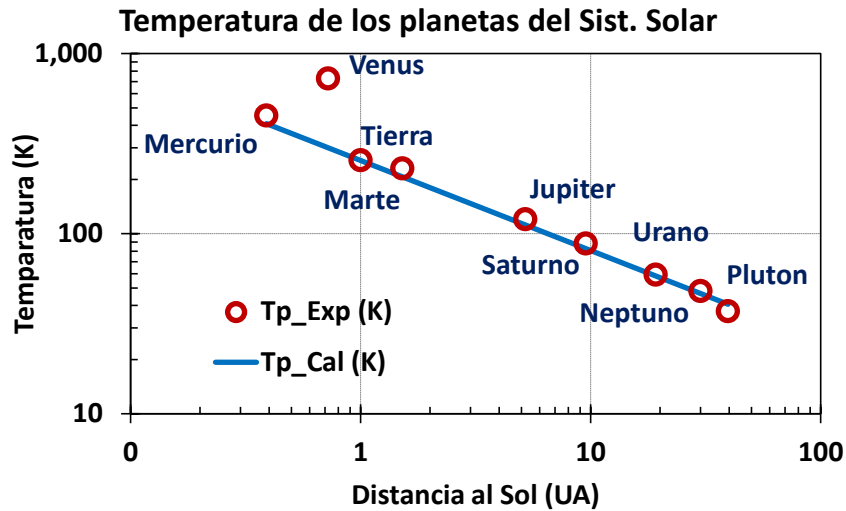


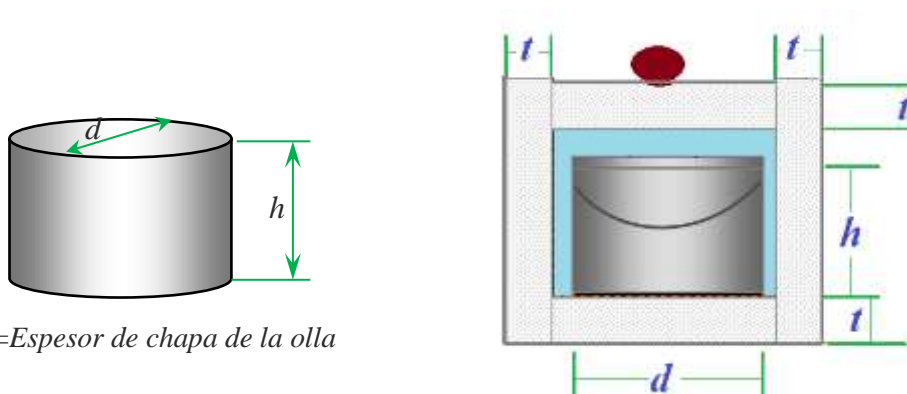
Figura 13. Temperatura de los distintos planetas como función de su distancia al Sol. Los símbolos rojos son los valores médicos y la curva azul las predicciones del modelo propuesto, Ec. Xx.75. Como se ve las predicciones del modelo son muy buenas.

Un hecho notable de esta estimación es la subestimación de nuestro modelo en la temperatura de planetas como Venus, aunque también en menor medida de la Tierra. Esto se deba al efecto de invernadero, claramente no incluido en este modelo simple. Como se sabe en la Tierra es de unos 33°C, pero en el caso de Venus este efecto es muchísimo mayor, del orden de 450°C [36].

Todos los planetas del sistema solar tienen alguna forma de efecto invernadero, que se produce cuando los gases de efecto invernadero en la atmósfera de un planeta impiden que el planeta pierda calor al espacio, elevando la temperatura de su superficie. El grado del efecto depende de la cantidad y los tipos de gases de efecto invernadero en su atmósfera, así como de su distancia al sol. Venus, es el planeta con mayor efecto invernadero, con una temperatura promedio de ~460°C debido a su espesa atmósfera compuesta de 96% de CO₂.

Como vimos, en la Tierra, el efecto invernadero en la Tierra eleva su temperatura en unos 30°C. En Marte, el efecto invernadero es casi insignificante ya que su atmósfera es muy fina.

8. ♣ Pérdida de calor de objetos complejos



e =Espesor de chapa de la olla

Figura 14. Cacerola u olla cilíndrica, de diámetro d , altura h y espesor del metal de e , sin aislamiento térmico (izquierda) y con aislamiento (derecha). Suponemos que espesor de la aislación térmica es t .

9. ♣ Ollas Térmicas u Ollas Brujas

♣ ♣ **Ejemplo 1: Ollas Brujas.** Para que el proceso de cocción se realice en forma segura, se requiere cocinar los alimentos a temperaturas superiores a 75°C [10]. A esta temperatura se elimina la mayoría de los gérmenes comunes. Además, hay muchas comidas como; guisos, cocidos o pucheros, ablandamiento o *tiernización* de carnes, etc.; que requieren mucho tiempo de cocción, por lo que su preparación es energéticamente intensiva. Es colocar una cacerola con los productos a cocinar en una hornalla, llevarlos a hervor y luego mantener su temperatura, proporcionando la energía a la cacerola, para compensar sus pérdidas de calor por disipación. Otro modo de lograr una temperatura estable cocción, consiste en llevar la cacerola con los alimentos a hervor, y luego colocar la olla en una caja con buena aislación térmica. Esta caja térmica se conoce como *olla térmica*, *olla bruja* o Hay Box.* La cacerola dentro de la caja térmica puede mantener su temperatura por varias horas arriba de los 75°C sin necesidad de suministrarle energía. Así se puede lograr ahorros considerables de energía y obtener alimentos bien cocidos; a la par de preservar los nutrientes de estos. En este ejemplo calcularemos las pérdidas de calor de la olla, sin aislación térmica y con aislación térmica, usando una caja cilíndrica de *Telgopor* o EPS, con un cartón corrugado entre la olla y el EPS, para que este no llegue a temperaturas cercanas a 100 °C que es cuando comienza a deteriorarse este material. Claro, también puede usarse otros materiales aislantes que resisten mejor altas temperaturas como: lana de roca, lana de vidrio, corcho, etc. En la segunda parte de este ejercicio, nos proponemos calcular la constante de tiempo de enfriamiento de la olla en los dos casos.

Olla sin aislación térmica

La resistencia térmica de las paredes laterales será:

$$R_L = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Lat} \quad (xx.23)$$

Aquí, como antes, h_{ce} es el coeficiente de convección de aire exterior a la olla, h_a es el coeficiente de convección de agua en el interior de la cacerola, e es el espesor del metal el que está hecha y k_m su conductividad térmica, $A_{Lat} (= \pi.d.h)$ es el área lateral de la olla. Similarmente, la resistencia de la tapa y base será:

$$R_{Tapa} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{tapa}, \quad (xx.24)$$

y

$$R_{base} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{base}, \quad (xx.25)$$

$A_{tapa} (= \pi.d^2/4)$ es el área la tapa y base de la olla. Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de calor de la olla sin aislación térmica (SAT) por cada grado de diferencia de temperatura, λ_{olla}^{SAT} , será:

$$\lambda_{olla}^{SAT} = (1/R_{base} + 1/R_{Tapa} + 1/R_L) = H/\Delta T. \quad (xx.26)$$

Por su parte, la temperatura de la olla $T(t)$ seguirá un decaimiento exponencial, con una constante de tiempo: $\tau_{SAT} = m_T \cdot c_T / \lambda_{olla}^{SAT}$, donde m_T es la masa total de la olla y su contenido y c_T el calor específico medio de la olla y su contenido. O sea, $T(t) = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{SAT}}}$, donde T_0 es la temperatura del medio circundante y T_{ini} la temperatura inicial de la olla y su contenido.

Olla con aislación térmica

Si se coloca un aislante térmico de espesor t , y conductividad k_{ais} , tanto en los laterales como en la tapa y base, la resistencia térmica de las paredes laterales será:

$$R_L^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Lat} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{Lat} \quad (xx.27)$$

* Haybox, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Haybox>
El desafío Energético- 2024 – S.Gil

Aquí, como antes, h_{ce} es el coeficiente de convección de aire exterior a la olla, h_a es el coeficiente de convección de agua en el interior de la cacerola, e es el espesor del metal el que está hecha y k_m su conductividad térmica, $A_{Lat} (= \pi.d.h)$ es el área lateral de la olla. Similarmente, la resistencia de la tapa y base será:

Tabla 3 Valores de los parámetros usado para una olla de 3 litros, no totalmente llena, y con una aislación térmica de EPS de 5 cm de espesor. Los parámetros de aislación y del material de la olla, aluminio, se tomaron de las tablas anteriores.

Dimensiones		Resultados	
$d(cm)=$	20	Sin Aislación	
$h(cm)=$	20	$\lambda (W/K)=$	1,432
$e_{al}(mm)=$	2	$\tau (h)=$	2,63
EPS_ Aislante(mm)=	50	T_cocción (h)=	0,71
Vol_nom (l)=	3,0	Con Aislación	
$T_{in}=$	90	$\lambda (W/K)=$	0,128
$T_{ex}=$	18	$\tau (h)=$	29,33
$T_{ref}=$	73	T_cocción (h)=	7,90

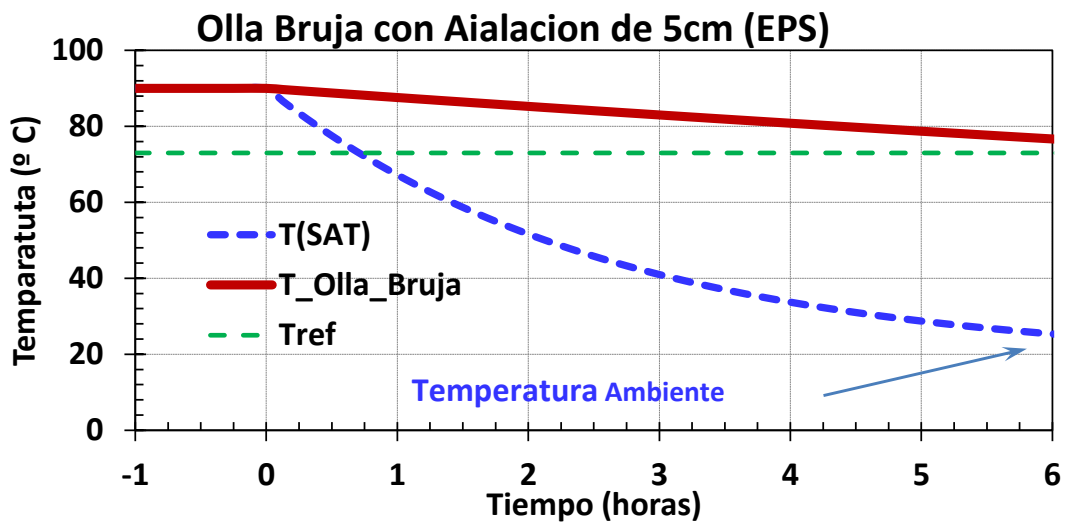


Figura 15. Variación de la temperatura de una olla sin aislación térmica, curva azul de trazos, y con aislación de 5 cm de EPS (olla bruja), curva roja. El volumen líquido de 3 litros y la temperatura ambiente se supone de $T_{ex}=18^\circ C$. En el primer caso la olla llega a $T_{ref}=75^\circ C$, definido como en tiempo de cocción en 0,71 h y con la olla bruja el tiempo de cocción se prolonga por 7,9 h.

$$R_{Tap}^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{tap} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{tap} \quad (xx.28)$$

$$R_{base}^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{tap} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{tap} \quad (xx.29)$$

Aquí h_{ci} es el coeficiente de convección de aire en el interior de la aislación. Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de calor de la olla con aislación térmica (CAT) por cada grado de diferencia de temperatura, λ_{olla}^{CAT} , será:

$$\lambda_{olla}^{CAT} = (1/R_{base}^{Ais} + 1/R_{tap}^{Ais} + 1/R_{Lat}^{Ais}) = H/\Delta T \quad (xx.30)$$

En la **Tabla 3** se presentan los valores de las constantes para una olla de unos 3 litros con una aislación térmica de 5 cm de Telgopor o EPS. De nuevo aquí, la temperatura de la olla $T(t)$ seguirá un

decaimiento exponencial, con una contante de tiempo: $\tau_{CAT} = m_T \cdot c_T / \lambda_{olla}^{CAT}$, donde m_T es la masa total de la olla y su contenido y c_T el calor específico medio de la olla y su contenido.

En la **Figura 15** se ilustra la variación de temperatura de la olla con y sin aislación térmica, para un contenido de 3 litros y las dimensiones indicadas en la Tabla 3. Como se ve, un recinto de EPS de 5 cm, hace que las temperatura del contenido, partiendo de $T_i=90$ °C, y temperatura ambiente de $T_{ex}=18$ °C, se mantenga a una temperatura superior a 75 °C, por más de 7 horas. Por lo tanto, la cocción continúa por todo este tiempo. De este modo el ahorro de energía en cocción puede ser muy importante, superior al 50%. Estos sistemas se usaron en Europa durante la primera y segunda guerras mundiales, como modo de ahorrar energía. Actualmente puede ser una excelente opción para muchos países en desarrollo que no tiene acceso a energía barata por redes.

10. ♣ ♣ Conductividad térmica y eléctrica de los materiales

Los metales en general son buenos conductores del de calor. Los buenos conductores eléctricos son también buenos conductores térmicos, aunque existen notables y útiles excepciones como el acero inoxidable, la mica y el diamante. Para los metales, (que son buenos conductores eléctricos) existe una relación entre la conductividad eléctrica ρ y la conductividad térmica k dada por la *Ley de Wiedemann-Franz*: [11]

$$k[W/m.k] \cdot \rho[ohm.m] = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 \cdot T = L \cdot T = 2.45 \cdot 10^{-8} \cdot T \left[\frac{W.\Omega}{k^2}\right] \quad (xx.31)$$

k_B es la *constante de Boltzmann* y e la *carga del electrón*. El valor de este producto, en el sistema SI vale dentro de 20% para los metales más comunes, pero no para semiconductores, grafito, diamante o aisladores.

La madera el plástico, el vidrio, el aire, tiene coeficientes de conducción térmica pequeños (son malos conductores del calor). Esto explica porque los pisos de madera o alfombra son más “cálidos” para caminar descalzos que unos de mosaico, este último es mejor conductor térmico que la alfombra o la madera.

11. ♣ ♣ Tubos enterrados

♣ ♣ † **Sistemas con simetría cilíndrica y esférica:** Consideremos los casos de sistemas cilíndricos y esféricos como se muestran en la **Figura 16**. En estos casos consideramos un elemento infinitesimal de radio r y espesor dr . Por cada uno de estos elementos atraviese la misma potencia H_0 , es decir los elementos están en serie. En el caso cilíndrico, el área de uno de estos elementos infinitesimales es $A=2\pi.r.l$ y su espesor dr . De la Ec.(xx.4) tenemos:

$$H_0 = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot 2\pi r \cdot l \cdot \frac{dT}{dr} \text{ o sea } -\frac{H_0}{k2\pi \cdot l} \frac{dr}{r} = dT, \quad (xx.32)$$

por tanto:

$$-\frac{H_0}{k2\pi \cdot l} \ln(b/a) = T_2 - T_1 \text{ o } H_0 = -k \frac{2\pi}{l \cdot \ln(b/a)} (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}} \quad (xx.33)$$

donde

$$\mathfrak{R} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi \cdot l \cdot k} \quad (\text{Cilindro hueco}) \quad (xx.34)$$

† El símbolo ♣ ♣ se utiliza para indicar un tema de carácter más avanzado que el resto de texto.
El desafío Energético- 2024 – S.Gil

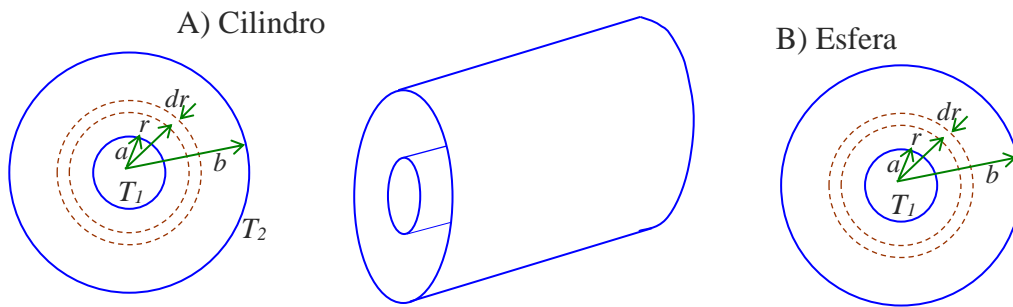


Figura 16. (A) Transmisión del calor a lo largo de un cilindro de radio interior a y exterior b cuyas temperaturas están a temperaturas T_1 y T_2 . Su longitud es l . B) caso similar correspondiente a una esfera.

En el caso de una esfera hueca de radio interior a y exterior b , **Figura 16. B**, el área del elemento infinitesimal de radio r es: $A=4\pi \cdot r^2$, siguiendo un razonamiento similar, tenemos:

$$H_0 = -k \frac{4\pi}{(1/a-1/b)} (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}} \text{ con } \mathfrak{R} = \frac{(1/a-1/b)}{4\pi \cdot k}. \quad (\text{xx.35})$$

Lo útil e interesantes, es que, con estas definiciones de resistencias térmicas para sistemas con simetrías cilíndricas y esferitas, las resistencias en serie y paralelo se comban con las mismas reglas que en el caso plano discutido en la **Figura 2**.

Hay asimismo casos con geometrías más complejas en las que puede encontrarse soluciones analíticas como por ejemplo tubos enterrados a una profundidad z de la superficie o tubos en una pared como se muestra en la Figura xx.4, donde es útil introducir un factor de forma S , tal que:

$$H_0 = -S \cdot k \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}}. \quad (\text{xx.36})$$

Los valores de S , *factores de forma de conducción (conductive shape factor)*, están tabulados para algunos casos simples [6], [7]. Ver **Tabla 4** Coeficientes de forma para das geometrías simples.

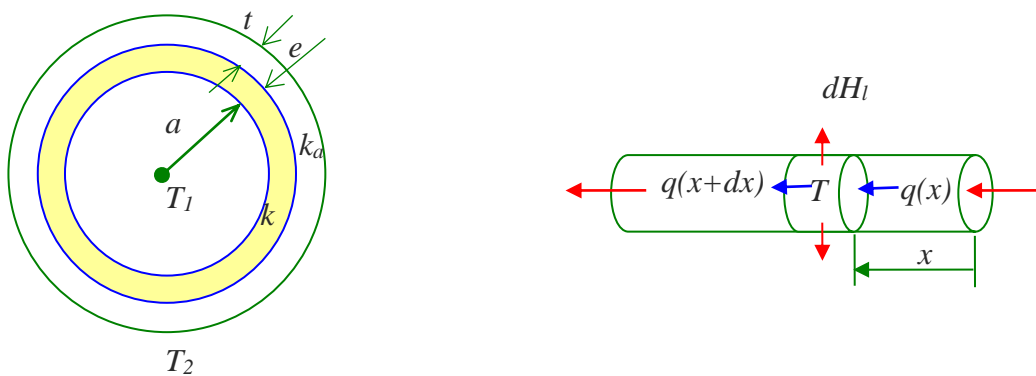
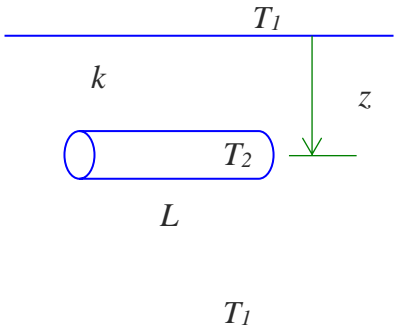
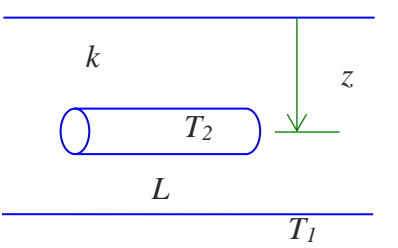


Figura 17. Tubo de agua enterrado a una gran profundidad.

♣ ♣ **Ejemplo 3:** Consideremos un caño de agua enterrado muy profundamente, que lleva agua de densidad ρ y calor específico c , que se inyecta en el tubo a una temperatura inicial T_0 y flujo Q_0 ($=\pi \cdot a^2 \cdot v$). Aquí v es la velocidad media del fluido. Suponemos que el tubo tiene una conductividad k , radio interior a y espesor e . Además, tiene un revestimiento de espesor t y conductividad k_a . El terreno está a una temperatura $T_i < T_0$. Nuestro problema es conocer la variación de la temperatura del agua a medida que nos alejamos una distancia x del punto de inyección. Ver **Figura 17**.

Tabla 4 Coeficientes de forma para das geometrías simples. [2]

Descripción física	Diagrama	Factor de forma S
Conducción a través de un material de conductividad k , cilindro a una profundidad z y a una temperatura T_2 . La superficie de la superior está a una temperatura T_1 . Cilindro de radio a y longitud L .		$S = \frac{2\pi \cdot L}{\ln(2z/a)}$ $\mathfrak{R} = \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k \cdot L}$
Conducción a través de una pared de conductividad k , cilindro a una profundidad z y una temperatura T_2 y las superficies de la pared están a una temperatura T_1 .		$S = \frac{2\pi \cdot L}{\ln(4z/\pi a)}$ $\mathfrak{R} = \frac{\ln(4z/\pi a)}{2\pi \cdot k \cdot L}$

Si tomamos un elemento infinitesimal de longitud dx , la resistencia efectiva será:

$$dH = -\frac{(T_2 - T)}{\delta \mathfrak{R}} \text{ con } \delta \mathfrak{R} = \delta \mathfrak{R}_c + \delta \mathfrak{R}_r = \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k \cdot dx} + \frac{\ln(1+t/(a+t))}{2\pi \cdot k_a \cdot dx}. \quad (\text{xx.18})$$

Si $q(x) = c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot T(x)$ es una cantidad proporcional a la energía que fluye por unidad de tiempo por el tubo, del balance energético en el elemento infinitesimal considerado tenemos:

$$dH = q(x + dx) - q(x)$$

o sea

$$c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot dT = 2\pi \cdot (T(x) - T_2) \cdot dx \cdot [\ln(1 + e/a)/k + \ln(1 + t/(a + t))/k_a], \quad (\text{xx.37})$$

o bien

$$\frac{dT}{(T(x) - T_2)} = \left[\frac{2\pi}{c \cdot \rho \cdot Q_0} \cdot (\ln(1 + e/a)/k + \ln(1 + t/(a + t))/k_a) \right] \cdot dx = dx/\lambda. \quad (\text{xx.38})$$

Esta ecuación puede ser integrada para dar el resultado buscado, es decir $T(x)$:

$$T(x) = T_2 + (T_0 - T_2) \cdot e^{-x/\lambda} \quad (\text{xx.39})$$

con

$$\lambda = \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0}{2\pi} \cdot [(\ln(1 + e/a) + \ln(1 + t/(a + t)))]^{-1} \approx \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0}{2\pi} \left[\frac{e}{a} + \frac{t}{a+e} \right], \quad (\text{xx.40})$$

Para el caso en que $e \ll a$ y $t \ll a$, como en general $k_a < k$, tenemos:

$$\lambda \approx \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0}{2\pi \cdot k_a} \frac{t}{(a+e)} \left[1 + \frac{e}{t} \left(\frac{a+e}{a} \right) \frac{k_a}{k} \right]^{-1} \approx \frac{c \cdot \rho \cdot Q_0}{2\pi \cdot k_a} \frac{t}{(a+e)} \left(1 - \frac{e}{t} \left(1 + \frac{e}{a} \right) \frac{k_a}{k} \right), \quad (\text{xx.41})$$

λ puede interpretarse como la longitud en el tubo en la que la diferencia de temperatura del agua $T(x) - T_2$ es $(T_0 - T_2)/e$. es decir λ es una longitud característica en el que el agua se termaliza con el medio, T_2 . Si aumentamos la aislación, (t/k_a) aumenta y consecuentemente lo hace λ . Similarmente, si Q_0 aumenta, λ también lo hace.

♣ ♣ **Ejemplo 2:** Consideremos un caño de aire enterrado a una profundidad z . El terreno tiene una conductividad k_t y la superficie está a T_0 . Siguiendo el mismo razonamiento anterior, consideremos un segmento del tubo de longitud dx , radio interior a y espesor e con conductividad k_c . El aire mismo en

el interior del tubo presenta convección con coeficiente $h_a \approx 60 \text{ W/m}^2$. La resistencia total asociada a la convección dentro del tubo, el tubo o caño mismo y el terreno será:

$$\delta\mathcal{R} = \delta\mathcal{R}_{conv} + \delta\mathcal{R}_{coño} + \delta\mathcal{R}_{terreno} = \frac{1}{h_a \cdot 2\pi a \cdot dx} + \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k_c \cdot dx} + \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k_t \cdot dx}. \quad (\text{xx.42})$$

El balance energético, Ec. xx.16, se convierte en:

$$c_a \cdot \rho_a \cdot Q_a \cdot dT = (T(x) - T_0) \cdot dx \left[\frac{1}{h_a \cdot 2\pi a \cdot dx} + \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k_c \cdot dx} + \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k_t \cdot dx} \right]^{-1}, \quad (\text{xx.43})$$

o bien

$$\frac{dT}{(T(x)-T_0)} = \frac{2\pi \cdot k_c}{c_a \rho_a \cdot Q_a} \cdot \left[\frac{k_c}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + k_c \frac{\ln(2z/a)}{k_t} \right]^{-1} \cdot dx = dx/\lambda. \quad (\text{xx.44})$$

Donde:

$$\lambda = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot k_c} \cdot \left[\frac{k_c}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + k_c \frac{\ln(2z/a)}{k_t} \right], \quad (\text{xx.45})$$

y

$$T(x) = T_0 + (T_i^{(aire)} - T_0) \cdot e^{-x/\lambda} \quad (\text{xx.46})$$

Donde $T_i^{(aire)}$ es la temperatura del aire a la entrada del tubo. $T(x)$ la temperatura del aire después de recorrer una distancia x en el tubo. Desde luego, c_a , ρ_a y Q_a son el calor específico, densidad y flujo del aire en el tubo.

12. ♣ ♣ Radiación de cómica de fondo (CMB)

Variación de la temperatura en la expansión de un gas

Posiblemente todos hemos experimentado el hecho de que cuando inflamamos la rueda de una bicicleta con un inflador manual, el extremo por donde sale el aire, se calienta. Este fenómeno ocurre toda vez que se comprime un gas sin que entre o salga energía del sistema (proceso adiabático), Ver Capítulo 5. Por ejemplo, en el caso del inflador, la compresión ocurre rápidamente y no da tiempo para que se intercambie energía con el medio. En el caso que el gas se expanda rápidamente, él se enfría, esto ocurre cuando usamos un desodorante en aerosol, el desodorante sale frío, aunque estuvo toda la noche a temperatura ambiente. De hecho, un refrigerador funciona gracias a este principio. Un gas comprimido por el compresor de la heladera se descomprime rápidamente en la región del congelador, enfriándose y tomando calor del medio. Este mismo principio opera en gran escala en el Universo. A medida que el Universo se expande, el mismo se va enfriando. Podemos determinar la temperatura media del Universo, midiendo la radiación electromagnética de fondo. En las secciones que siguen discutiremos este efecto en más detalle.

♣ ♣ Radiación Cómica de Fondo (CMB)

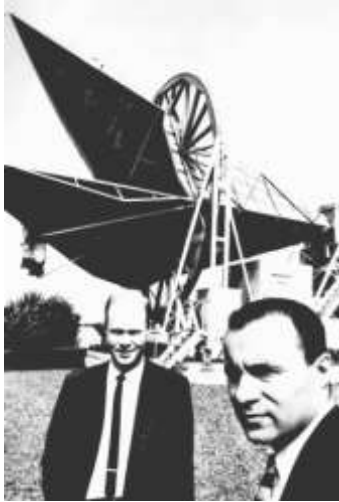


Figura 18. Penzias y Wilson recibirían el premio Nóbel de Física en 1978 por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (CMB). G.Gamov, uno de los primeros en predecir su existencia en los años 40, murió unos diez años antes.

Haciendo una analogía, podemos decir que la evolución del Universo equivaldría, en cierta forma, a lo que ocurre con una nube de vapor de agua que se expande al subir por la atmósfera. A medida que se expande se enfría, el vapor se transforma en líquido, el líquido se condensa en gotitas de agua que finalmente precipitan en forma de lluvia. La relación entre expansión y enfriamiento es tan estrecha, que los científicos han logrado, a partir de ella, calcular con gran exactitud la temperatura teórica a la que debería encontrarse el Universo en la actualidad. Tal temperatura es de aproximadamente 3 K (en la escala absoluta de Kelvin) ó -270 grados Celsius bajo cero. Como vimos antes, un cuerpo a una temperatura determinada emite radiaciones electromagnéticas características de esa temperatura (ver **Figura 19**) y era de esperarse que existiese algún tipo de radiación que confirmase los 3 K calculados para el Universo. No fue sino hasta 1964 cuando los ingenieros de la Bell Telephone Arno Penzias y Robert Wilson, efectuando mediciones de ondas de radio en New Jersey, descubrieron una radiación de fondo que interfería con su trabajo y que no podían eliminar, ya que parecía provenir de todo el Universo. Inmediatamente dieron la noticia a los físicos de la Universidad de Princeton que trabajaban en la teoría del Big Bang [15], [16].

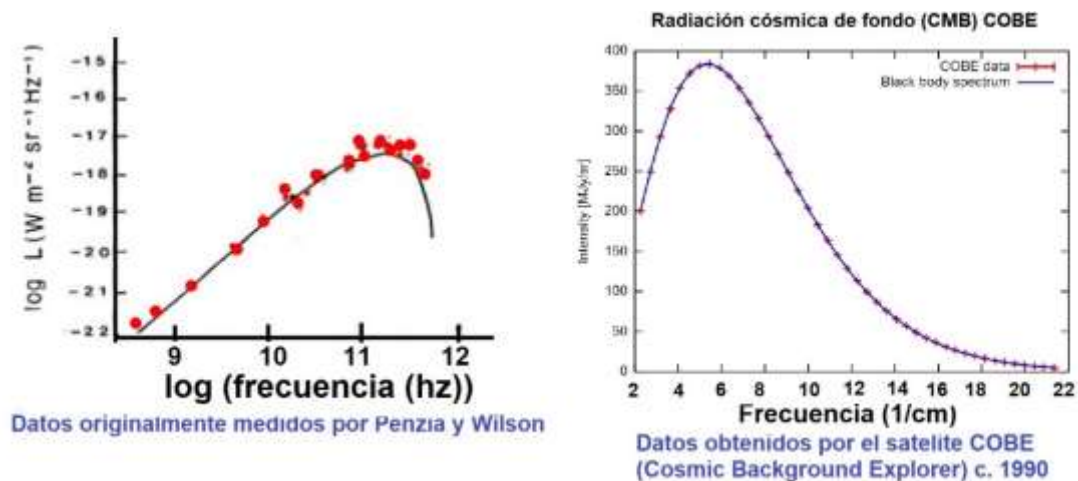


Figura 19. Espectro de radiación de fondo cósmica medida por Penzias y Wilson (izquierda). Los puntos discretos son los valores medidos. La curva continua es la predicción de la radiación de un cuerpo negro a la temperatura $T=3\text{ K}$. La curva de la derecha son datos obtenido por el satélite COBE. [12]

Ellos confirmaron que dicha radiación era el “fósil físico” buscado por los científicos que correspondería a la radiación electromagnética que emite un cuerpo a 3 grados Kelvin. Naturalmente, este descubrimiento, uno de los más importantes de la radio astronomía, significó un fuerte respaldo a la teoría del Big Bang. [13] Penzias y Wilson recibieron el premio Nóbel de física por el descubrimiento de lo que posteriormente se denominó “radiación térmica cosmológica” o CMB. De hecho, se estima que cerca del 10% del ruido de fondo que se observa en un televisor común, al sintonizar en un canal no ocupado por una señal de una emisora, esa especie de *lluvia* es consecuencia de la radiación de fondo. Es interesante notar que la radiación CMB puede detectarse con un simple

televisor. Cuando un TV se sintoniza en una canal sin servicio, se ve una especie de "lluvia" y se escucha un ruido característico. Aproximadamente, 10% de ese ruido proviene de la CMB, o sea es una señal primordial antiquísima.

En resumen:

- ✓ El espectro de la radiación de fondo (CMB) corresponde al de un cuerpo (negro) a la temperatura de 2.72 Kelvin.
- ✓ La CMB es una reliquia del momento en que el Universo estaba muy caliente, era muy denso y opaco. Mas precisamente del instante en que la temperatura era tal, que los fotones interactuaban fuertemente con los átomos de H ionizándolos. A mediada que el Universo se enfrió, la radiación no pudo seguir ionizando los átomos, es decir la radiación se desacopló de la materia y siguió viajando hasta el presente.
- ✓ Los puntos más calientes o "Hot spots" en la CMB resultan de fluctuaciones en la temperatura del Universo en el momento del desacople de la radiación con la materia.

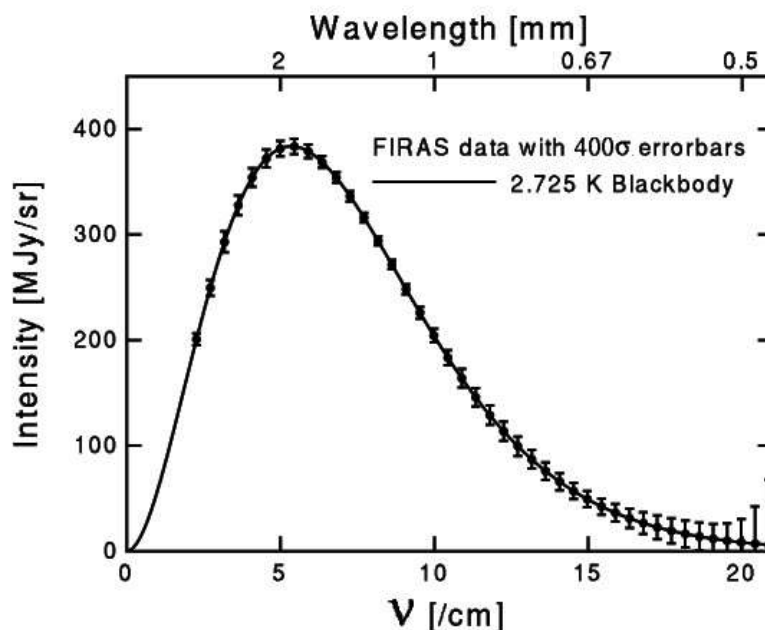


Figura 20. Espectro de radiación de fondo cósmica obtenido en la década de los 90 con el instrumento FIRAS del Satélite COBE de la NASA. La línea continua corresponde a la radiación de un cuerpo negro a T=2.725 K.

Referencias

[1] D. Giancoli, Physics Principles with Applications 7th Edition, NY: Pearson, 2014.

[2] Y. Çengel, Transferencia de Calor – Y. A. Çengel- 2da. Ed., Mexico DF, Excelente y muy completa presentación de la transferencia de calor, incluyendo conducción, radiación y convección.: Mc Graw Hill , 2004.

[3] F. Sears, M. Zemansky, H. Young y R. Freedman, College Physics, NY: Pearson Ed., 2009.

[4] J. D. Wilson, College Physics (7th Edition) 7th Edition, N.Y.: Pearson, 2009.

[5] . M. Zemansky, «Calor y Termodinámica (Trad. de: Heat and Thermodynamics - 5th Ed. McGraw Hill N.Y. 1968).,» Madrid 1975, Aguilar , 1975.

[6] Wikipedia, «Thermal transmittance. [En línea] 2022.,» 2024. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_transmittance..

- [7] Wikipedia, «Lay de Plank,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Planck.
- [8] Wikipedia, «Cámaras Térmicas,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%A1mara_t%C3%A9rmica.
- [9] NASA, «¿Cómo sabemos que el cambio climático es real?,» 2024. [En línea]. Available: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/evidencia/>.
- [10] P. Lorenzo y S. Gil, «Ollas térmicas u “ollas brujas”, un modo simple y práctico de reducir los consumos,» *Petrotecnia*, vol. LV, n° 4, pp. 68-76, 2018.
- [11] Wikipedia, «Ley de la conductividad de Wiedemann-Franz,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_la_conductividad_de_Wiedemann-Franz.
- [12] Wikipedia, «COBE (Cosmic Background Explorer),» 2024. [En línea]. Available: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/COBE>.
- [13] S. Gil, «Clase introductoria de cosmología,» UDESA, 2003. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/359774151_Introduccion_a_la_Cosmologia_-_Para_Principiantes.
- [14] R. Prieto y S. Gil, «Regulación del termostato: un modo simple y racional de ahorrar energía en calefacción y refrigeración,» *Petrotécnia (Revista del IAPG)*, Vols. %1 de %2LV, N05, n° Dic.2014, pp. 102-114, 2014.

Problemas y preguntas de Transmisión del calor

- 1) Explique la diferencia entre conducción, convección y Radiación.
- 2) ¿Porque el Telgopor (EPS) es un buen aislante térmico? ¿El vacío lo es?
- 3) La diferencia entre conducción, convección y radiación.
- 4) Cómo llega el calor del Sol a los planetas.
- 5) Cómo calienta la estufa del aula.
- 6) Cómo funciona un termo.
- 7) Explique porque se usa frazada en invierno. (porque hace frío no es respuesta válida). B) porque usa ventilador en verano. C) como funciona un termo. D) por qué cuando hay viento el frío “se siente más”. E) por qué no deben dejarse mascotas o bebés en un auto cerrado, al sol.
- 8) Calcule el cociente de los flujos de calor, o sea el cociente de las pérdidas de calor por la ventana para el caso de una ventada simple de 1 m^2 de área y un vidrio de 3 mm de espesor comparada con la misma ventana de vidrio doble con dos vidrios de 3 mm de espesor separados por 2 cm de aire. Incluya los efectos de convección en las superficies. (Nota considere que el coeficiente de convección interna $h_{in}=8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y el exterior es $h_{ex}=28 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. b) Comente la importancia de poner vidrio doble para ahorrar energía. ¿Este resultado vale tanto para la calefacción como la refrigeración, suponiendo la misma diferencia térmica entre el interior y exterior?
- 9) Calcular la pérdida de *energía radiante* de una persona desnuda en una habitación a 20°C suponiendo que la persona se comporta como un cuerpo negro, el área del cuerpo es de 1.5 m^2 y la temperatura de su superficie es de 33°C (la temperatura superficial del cuerpo humano es ligeramente inferior a la temperatura interna, debido a la resistencia térmica de la piel). Suponga una emisividad 0.95. B) Si además de la radiación, se considera la pérdida de energía por convección, suponiendo un coeficiente de convección es aproximadamente $6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, Calcule la pérdida solo por este mecanismo. C) Combine ambos mecanismos de pérdida y discuta cual es más significativo. D) Compare el valor hallado para la pérdida de calor, con la

producción de energía básica del metabolismo que es de aproximadamente 120 W (suponiendo una ingesta de 2500 kcal por día).

- 10) Una caja de espuma de poliestireno (EPS) para mantener frías las bebidas en un día de campo (ver Figura 22) tiene un área de pared total (incluida la tapa, base y lados) de $0,80 \text{ m}^2$ y un espesor de pared de 2.0 cm , y está llena con hielo, agua y latas gaseosas a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. A) Calcule la tasa de flujo de calor hacia el interior de la caja, si la temperatura exterior es de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. B) ¿Cuánto hielo se derrite en un día? ($k_{\text{EPS}} = 0,1 \text{ W/m.K}$)

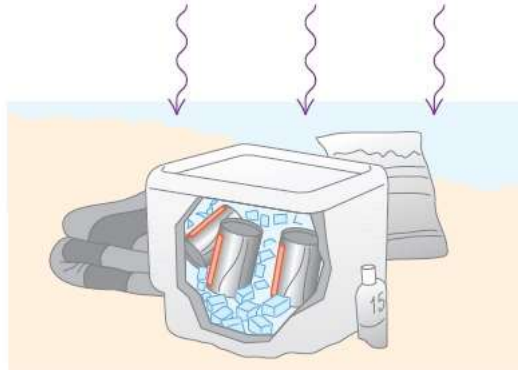


Figura 21

- 11) Para la transferencia de calor por conducción, la propagación de energía térmica será mínima para una barrera si la misma es de: a) Cobre, b) Fe, c) Pb d) aire, e) agua. Explique por qué.
- 12) Un artículo periodístico acerca del clima dice que “la temperatura de un cuerpo mide cuánto calor contiene el cuerpo”. ¿Es esta descripción correcta? ¿Por qué?
- 13) ¿Debemos agregar calor (ΔQ) a un objeto para aumentar su temperatura (ΔT)?Cuál es la relación cuantitativa entre ΔQ y ΔT .
- 14) Algunos acondicionadores de aire caseros para climas secos, el aire se enfría soplando a través de un filtro saturado de agua, evaporando parte del agua. En Argentina se los conoce como climatizadores evaporativos. ¿Cómo esto enfría el aire? ¿Funcionaría este sistema en un clima muy húmedo? ¿Por qué?
- 15) (II) Demuestre que el flujo de calor ($H = dQ/dt$) a través de la pared compuesta de dos materiales: el primer material tiene una conductividad k_1 , un área total A_1 y un espesor l_1 , y el segundo tiene una conductividad térmica k_2 , un área A_2 y un espesor l_2 (Ver Fig.1 a), con una diferencia de temperatura es ΔT , viene dada por:

$$H = \frac{dQ}{dt} = \frac{A \cdot (T_2 - T_1)}{(l_1/k_1 + l_2/k_2)} = \frac{\Delta T}{R_{eq}}, \text{ con } R_{eq} = R_1 + R_2 = \frac{l_1}{A \cdot k_1} + \frac{l_2}{A \cdot k_2}$$

- 16) (III) Una ventana doble consta de dos placas de vidrio separadas por un espacio de aire (figura 1 b), si el espesor del primer vidrio es l_1 , el del segundo es l_3 y el de la capa de aires l_2 , (las conductividades respectivas se designan con el correspondiente subíndice). (a) Demuestre que el flujo de calor por conducción es:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{A \cdot (T_2 - T_1)}{(l_1/k_1 + l_2/k_2 + l_3/k_3)}$$

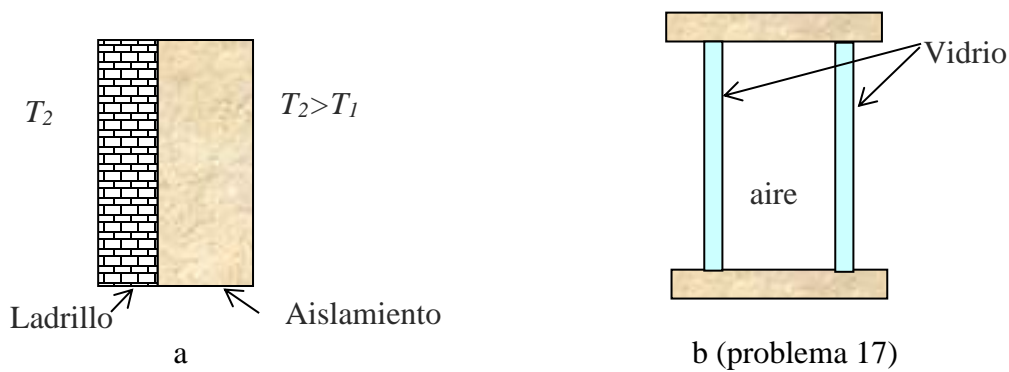


Figura 22

- 17) (b) Calcule el cociente de los flujos de calor, o sea el cociente de las pérdidas de calor por la ventana para el caso de una ventana simple de 1 m^2 de área y un vidrio de 3 mm de espesor comparada con la misma ventana de vidrio doble con dos vidrios de 3 mm de espesor separados por 2 cm de aire. Comente la importancia de poner vidrio doble para ahorrar energía. ¿Este resultado vale tanto para la calefacción como la refrigeración, suponiendo la misma diferencia térmica entre el interior y exterior?
- 18) ¿Qué cantidad de calor es necesario entregar a 1 kg? de Fe para aumentar su temperatura en $\Delta T=80^\circ\text{C}$? Comparar este valor con la cantidad de calor necesario para que un kilo de agua aumente su temperatura en el mismo valor.
- 19) ¿Qué masa de aluminio tiene la misma capacidad calorífica que 1 kg de agua?
- 20) Calcular la cantidad de calor que se debe entregar a 1 kg de agua que se encuentra a 0°C A) para llevarla a 100°C en fase líquida. B) para transformarlo íntegramente en vapor a la temperatura de 100°C .
- 21) Si se tienen 500 g de agua a 20°C y se le agregan 500 g de Pb a 100°C . ¿Cuál será el estado final del sistema si este es cerrado?
- 22) (II) En una ventana de vidrio de 4 m^2 y 5 mm de espesor, la cara externa se encuentra expuesta a una temperatura de 5°C mientras que la cara interior está a una temperatura de unos 20°C . a) ¿Cuál es el flujo de calor a través del vidrio? b) Cual es la potencia de la estufa eléctrica que debería tener encendida en el interior, para mantener la temperatura estable, si las perdidas por la ventana fuesen las más importante. c) si el costo de la electricidad es de 0,1 USD/kWh, cuánto cuesta tener esta estufa encendida por 10 horas durante el invierno. Suponga que este dura unos 120 días. d) ¿Cuánto paga el kWh en su casa? $k_{\text{vidrio}} \approx 0.84 \text{ W/m.K}$.
- 23) (I) Encuentre la potencia total radiada al espacio por el Sol (*Luminosidad Solar*), suponiendo que éste es un emisor perfecto con $T=5500^\circ\text{C}$, el radio del Sol es de $7.0 \times 10^8 \text{ m}$. (b) A partir del resultado anterior, determine la potencia por unidad (*Constante solar o Irradiancia solar*), de área que llega a la Tierra, que se encuentra a una distancia de $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ (Figura 23)

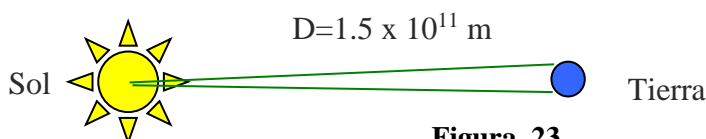


Figura 23

- 24) ¿Por qué un día cálido y húmedo en el trópico generalmente es más incómodo para los seres humanos, que un día cálido y seco en el desierto?
- 25) A veces se usa un trozo de papel de aluminio para envolver una papa y cocerla en un horno caliente. Por lo general, el papes de Al puede manejarse con seguridad unos cuantos segundos después de que la papa se retiró del horno. Sin embargo, ¿no puede decirse lo mismo de la papa! Dé razones para esta diferencia.
- 26) Los viajeros del desierto a veces guardan agua en bolsas de lona o bota de cuero. Algo de agua se filtra por la lona y se evapora. ¿Cómo enfría esto el agua del interior?
- 27)