

2. Transmisión del calor

Calor es la energía que fluye desde un cuerpo hacia otro cuya temperatura es menor. Esta transmisión también ocurre entre partes de un mismo cuerpo pero siempre hacia donde la temperatura es menor. La forma en que se produce este tránsito o la *transferencia del calor*, es el tema que se desarrolla en esta sección.

La transferencia de calor puede ocurrir cuando dos cuerpos, inicialmente a distinta temperatura se ponen en contacto, por ejemplo cuando introducimos una cuchara de metal en una olla con agua hirviendo y observamos que su temperatura aumenta. El calor se transmite o fluye espontáneamente desde el cuerpo más caliente al más frío. Pero no sólo cuando dos objetos de distinta temperatura inicial están en contacto, se produce una transferencia de energía en forma de calor. Nuestro cuerpo se calienta cuando estamos al sol o cerca de una fogata sin estar en contacto directo con ellos. El hecho experimental que se verifica en todos los casos es que para que exista transmisión de calor, debe existir diferencia de temperaturas entre dos sistemas o entre partes del mismo sistema, diferencia que también es llamada *salto térmico*. El calor siempre viajará espontáneamente del lugar más caliente al más frío.

El calor puede transferirse de un lugar a otro por tres métodos diferentes: *conducción* en sólidos y en menor medida en fluidos, *convección* sólo para fluidos (líquidos o gases) y *radiación* a través del vacío o cualquier medio transparente a ella.

2.a - Conducción

La conducción tiene lugar cuando dos objetos, o partes del mismo objeto, que están a diferentes temperaturas entran en contacto. El calor fluye espontáneamente desde el objeto más caliente hasta el más frío. El mecanismo de transmisión del calor de la conducción tiene las siguientes características:

- Existe un medio material a través del cual se propaga el calor.
- El calor fluye sin que se observe movimiento neto de materia.

La conducción del calor puede explicarse por la estructura atómica y molecular de la materia. La velocidad media de las moléculas o átomos es mayor cuanto mayor es la temperatura. En los sólidos ocurre debido al movimiento de los electrones o más precisamente de los llamados electrones libres que no están permanentemente unidos a un átomo determinado. Los metales (el hierro, el plomo, el cobre, etc.) tienen un elevado número de electrones libres y son por lo tanto buenos conductores del calor y también son buenos conductores de la electricidad. Contrariamente los sólidos no metálicos (madera, azufre, algodón, etc.) tienen una estructura microscópica donde existen pocos electrones libres y por lo tanto son malos conductores del calor (y también de la electricidad).

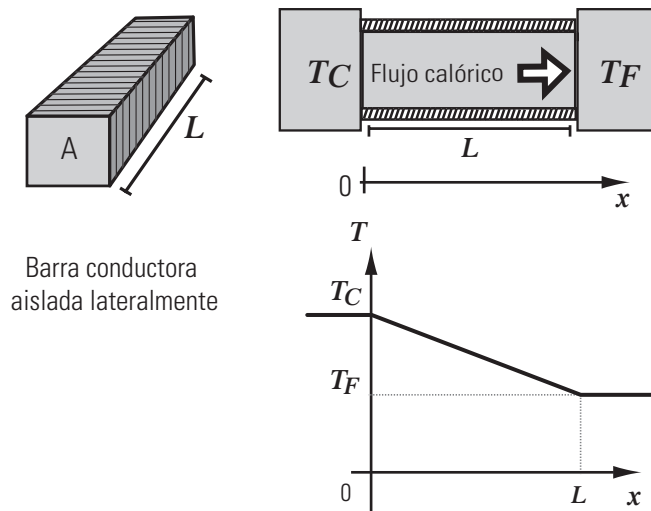
Se puede visualizar el mecanismo considerando que las moléculas o los electrones que se mueven en promedio más rápidamente y que por lo tanto corresponden a zonas de mayor temperatura chocan con los que tienen menor velocidad media y que se corresponden con zonas de menor temperatura. Estos choques permiten que la energía asociada al movimiento térmico se propague y esta propagación se denomina conducción.

Los líquidos y gases son peores conductores que los sólidos pues, como el calor se conduce por el choque de las moléculas que los componen, al estar relativamente más separadas que en la materia sólida, conducen menos eficientemente. Debido a la mayor distancia intermolecular, la materia en fase gaseosa es peor conductora que en fase líquida.

El proceso de conducción del calor fue estudiado por Jean Fourier (1768 - 1830) y a él se debe la ley empírica que lleva su nombre.

La ley de Fourier

Consideremos una barra de un material conductor del calor que tiene longitud L y sección A , aislada térmicamente del entorno salvo por sus extremos. Si los extremos de la barra se ponen en contacto con sendas fuentes térmicas^[4] existe un flujo de energía dirigido de la fuente más caliente T_C a la más fría T_F . Luego de transcurrido el tiempo suficiente, se observa que el fenómeno de la conducción ocurre en *régimen estacionario*. En este caso, el flujo de calor a través de cualquier sección transversal es el mismo, en consecuencia, la temperatura en todos los puntos intermedios de la barra tampoco cambian en el tiempo. En la figura a continuación, se muestra que la temperatura, constante en el tiempo, disminuye linealmente con la posición a lo largo de la barra de longitud L .



Barra conductora
aislada lateralmente

Material	k [W / (m °C)]
Plata	420
Cobre	400
Aluminio	240
Acero	50
Hielo	1,7
Hormigón	1,16
Vidrio	0,84
Arena	0,8
Agua	0,59
Grasa animal	0,2
Madera	0,15
Fibra de vidrio	0,05
Amianto	0,04
Aire	0,024

Conductividades térmicas

Se comprueba experimentalmente que el flujo de calor ($\Delta Q / \Delta t$) es directamente proporcional al área de la sección transversal A y a la diferencia de temperatura entre las fuentes ($\Delta T = T_C - T_F$), e inversamente proporcional a la distancia entre las fuentes ($\Delta x = L$). Esto está expresado en la *ley de Fourier para la conducción en régimen estacionario*.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

En esta expresión ΔQ es el calor que fluye en el lapso de tiempo Δt . La constante k recibe el nombre de *conductividad térmica* y es distinta para cada tipo de sustancia. Las unidades de la conductividad térmica son: $[k] = [\text{potencia}] [\text{longitud}]^{-1} [\text{temperatura}]^{-1}$

El área A que aparece en la ecuación anterior es el área transversal al flujo de calor por conducción. ¡Atención! que supusimos que no hay intercambios de calor de la barra por los lados laterales de la misma o por otros mecanismos.

La ley de Fourier para la conducción térmica estacionaria es muy parecida a la ley de Fick para la difusión estacionaria, pues ambas son de naturaleza estadística.

$$\Phi = \frac{m}{\Delta t} = D \cdot A \cdot \frac{\Delta c}{L}$$

[4] Llamamos **fente térmica** a un sistema capaz de intercambiar calor sin variar apreciablemente su temperatura. Puede tratarse de un sistema cuya capacidad calorífica es muy grande (el aire del ambiente, el agua de un río), de un sistema en el que está produciéndose un cambio de fase, mientras dure tal proceso, o de un sistema en el que se renueva permanentemente la masa que absorbe calor (el agua que circula alrededor del motor del auto para refrigerarlo).

La ley de Fourier descripta para el caso estacionario se puede escribir en una forma más general usando las siguientes magnitudes:

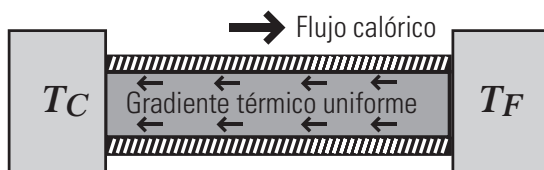
1) el cociente entre el flujo calórico y el área A , denominado *densidad de flujo de calor* $\vec{F}$, medida en $\text{cal}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ó $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$

2) el *gradiente térmico*, un vector que apunta en la dirección y sentido en la que más aumenta la temperatura por unidad de longitud; su módulo representa el grado de aumento de la temperatura con la distancia en dicha dirección. La componente escalar del gradiente térmico es igual a dT/dx (derivada $T'(x)$), medida en $^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Entonces:

$$\vec{F} = -k \cdot \text{grad } T$$

La ley de Fourier establece que la densidad de flujo de calor en la conducción es proporcional al gradiente térmico. El signo menos indica que el sentido del flujo de calor es opuesto al sentido del vector del gradiente térmico. En la mayor parte de las aplicaciones de este curso, consideraremos la ecuación sin el signo negativo que sólo indica que el calor fluye de temperaturas mayores a menores.



En la conducción estacionaria la temperatura en cada punto se mantiene constante en el tiempo. El gradiente a lo largo de la barra a través de la cual se conduce el calor es el mismo en todos los puntos; o sea, la variación de temperatura por unidad de longitud es en todos lados igual: yendo de izquierda a derecha la temperatura disminuye linealmente con la posición.

Cuanto mayor es la conductividad térmica, mejor conductor de calor es el material, lo cual implica que trasmite mucho calor en poco tiempo. Los metales son buenos conductores de calor, con k entre mil y diez mil veces mayor que la de los buenos aislantes, como el amianto o lana mineral. El aire quieto es un buen aislante. Ello explica la eficacia en evitar la transmisión de calor por conducción que tiene la ropa de lana y las ventanas con doble vidrio y aire en el medio. En ambos casos el aire atrapado e imposibilitado de moverse actúa como aislante.

Cuando una persona en un baño a una temperatura ambiente de 20°C se para descalza sobre el piso de baldosa, siente más frío que al pisar sobre la alfombrita. En realidad, baldosa y alfombra están a la misma temperatura ambiente de 20°C (menor que los 34°C de nuestra piel) pero como la conductividad térmica de una baldosa es cerca de 20 veces la de la fibra de lana, en cada segundo, entonces el pie pierde unas 20 veces más calor cuando pisa la baldosa que cuando pisa la alfombra.

Ejemplo

El interior del cuerpo humano se mantiene a una temperatura constante de 37°C mientras que la piel suele tener unos 34°C . Considerando que el espesor de la piel es de aproximadamente 2 cm (incluyendo la capa adiposa profunda, la hipodermis) y el área de la piel de un adulto puede estimarse en $1,70\text{ m}^2$, ¿cuál sería la potencia con que se disiparía energía por conducción?

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = 0,2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot 1,7\text{ m}^2 \cdot \frac{3^{\circ}\text{C}}{0,02\text{ m}} = 51\text{ W}.$$

Analizamos estos resultados comparándolos con la tasa metabólica en reposo en el apartado de la derecha (ver, en la columna lateral, **Termorregulación y conducción**).

Termorregulación y conducción.

El calor producto del metabolismo de una persona adulta en reposo es, aproximadamente, de una kilocaloría por cada hora, por cada kilogramo de masa. Para una persona de unos 70 kg, la potencia es de unos 81 W. (¡Calcúlela!)

El calor producido en el interior debe ser transferido al mismo ritmo a la superficie corporal para disiparse al entorno y así mantener la temperatura estable. Los cálculos hechos ilustran que, como los tejidos humanos son malos conductores, la conducción sola resulta insuficiente para eliminar el calor generado en el interior del cuerpo. La mayor parte del calor producido en las células de los órganos más activos se transmite por conducción hacia los capilares sanguíneos relativamente rápido, pues las distancias involucradas son muy pequeñas. Luego el sistema circulatorio lleva la energía térmica hacia la superficie, donde el calor se conduce hacia la epidermis. Los animales han desarrollado diversas técnicas para termorregularse. Una de ellas consiste en la vasoconstricción y vasodilatación que regula el flujo sanguíneo en la piel según la rapidez con que se necesite disipar calor. Otro recurso es la transpiración: el calor generado por las reacciones químicas metabólicas se transmite por conducción al agua transpirada por la piel y permite evaporar el sudor. Cuando el frío es extremo se nos pone la "piel de gallina" en un ineficaz intento de atrapar entre los vellos erizados una capa de aire fija aislante más gruesa. Analizaremos más adelante otros mecanismos de transferencia del calor: la convección y la radiación.

Resistencia térmica

Resulta útil definir el concepto de *resistencia térmica* R a partir de la expresión del flujo de calor ($\Delta Q / \Delta t$). Cuando el calor fluye a través de una barra homogénea de longitud L y área transversal A (transversal a la dirección en la que fluye el calor), aislada térmicamente salvo en sus extremos, que mantienen sus temperaturas constantes, la ley de Fourier se puede reescribir:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k \cdot A \cdot \frac{(T_C - T_F)}{L} = \frac{(T_C - T_F)}{R},$$

donde $R = \rho \cdot \frac{L}{A}$ y la resistividad térmica: $\rho = \frac{1}{k}$,

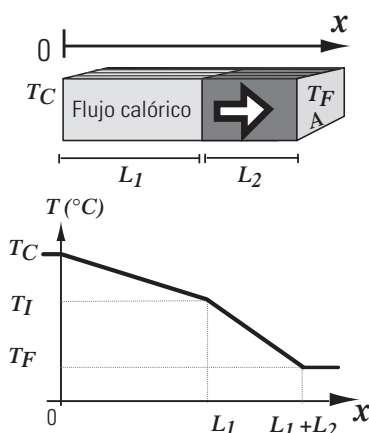
entonces :

$$(T_C - T_F) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot R$$

El signo negativo se ha obviado, asumiendo que el calor fluye desde el extremo que se mantiene a la temperatura más elevada T_C hacia el extremo que se mantiene a la temperatura menor T_F . La resistencia térmica R es análoga a la resistencia eléctrica y a la resistencia hidrodinámica y es útil para resolver casos de paredes compuestas donde se superponen materiales distintos.

Conexión en serie.

Veamos el caso de dos barras de igual área transversal A pero de conductividades térmicas k_1 y k_2 , y longitudes L_1 y L_2 colocadas como se muestra en la figura de la izquierda. Si las temperaturas T_C y T_F se mantienen constantes y no hay intercambio de calor con el medio salvo por los extremos, se puede afirmar que el flujo de calor es el mismo en cualquier punto, pues suponemos que no hay acumulación ni pérdida de calor en ninguna parte del recorrido del flujo. Entonces, la temperatura se mantiene constante en el tiempo y es función de la posición como indica el gráfico de la izquierda.



Conexión en serie. ¿Cuál de las dos barras conductoras de igual sección conectadas en serie está hecha con un material mejor conductor?

Teniendo en cuenta que el flujo de calor en ambas barras es el mismo se puede despejar de esta ecuación la temperatura en la interfaz T_i entre las dos barras que es:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = k_1 \cdot A \cdot \frac{(T_C - T_i)}{L_1} = k_2 \cdot A \cdot \frac{(T_i - T_F)}{L_2}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(T_C - T_i)}{R_1} = \frac{(T_i - T_F)}{R_2}$$

$$\Rightarrow T_i = \frac{(R_2 T_C + R_1 T_F)}{R_1 + R_2}.$$

Esta conexión se denomina *en serie* y de igual forma que en el caso de varias tuberías por las que circula un mismo fluido real, o en los circuitos eléctricos cuando en varios resistores en serie circula la misma corriente; se puede reemplazar el conjunto por una *resistencia equivalente* que es la suma de todas las resistencias en serie.

Partiendo de que el salto térmico entre las fuentes es la suma de los saltos térmicos respectivos de ambas barras y de que el conjunto tiene igual flujo que cada una de las barras:

$$\Delta T_{total} = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

$$y \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Big|_1 = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Big|_2 = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot R_{eq} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot R_1 + \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot R_2 \Rightarrow R_{eq} = R_1 + R_2$$

Conexión en paralelo.

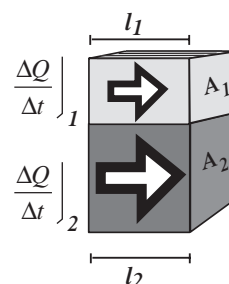
También existen conexiones *en paralelo* cuando, por ejemplo, interesa la velocidad con que se pierde calor a través de una pared, cuya mitad inferior es de ladrillo y la superior de madera.

En este caso, si en la habitación se mantiene la temperatura interior T_C y la exterior T_F no se modifica, donde $T_C > T_F$, el flujo de calor que sale de la habitación es la suma del que fluye por el medio 1 y del que fluye por el medio 2:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Big|_1 + \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Big|_2$$

$$\frac{(T_C - T_F)}{R_{eq}} = \frac{(T_C - T_F)}{R_1} + \frac{(T_C - T_F)}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



Conexión en paralelo

En resumen, de igual manera que para las resistencias hidrodinámicas y eléctricas, un sistema de paredes compuestas en serie o en paralelo se puede reemplazar por otro equivalente de manera que el flujo total de calor a través de la pared es:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{(T_C - T_F)}{R_{eq}} \quad \text{donde} \quad \begin{cases} \text{en serie: } R_{eq} = R_1 + R_2 \\ \text{en paralelo: } \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \end{cases}$$

A continuación se presenta un cuadro que resume la analogía en la aplicación de la "ley de Ohm" en los diversos capítulos de la Física.

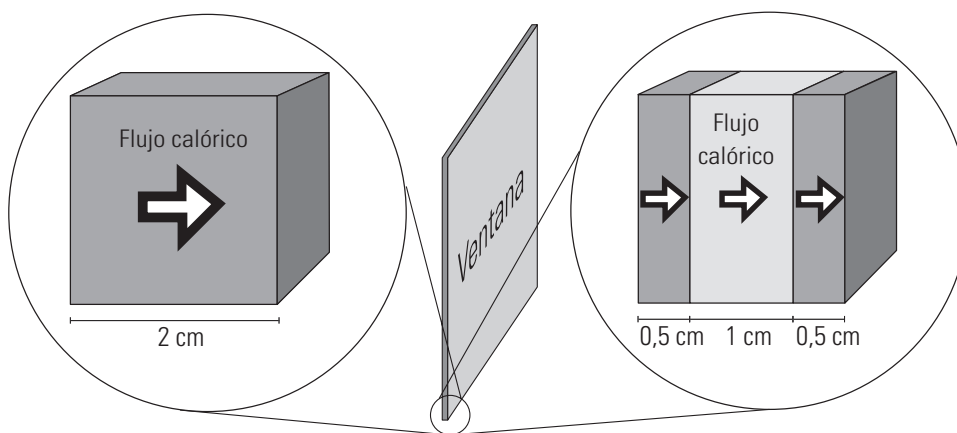
							LEY
FLUIDOS	el flujo de	fluido: $\frac{\Delta V}{\Delta t}$	es directamente proporcional a	Δp	la constante de proporcionalidad es la resistencia R	$R = 8\eta \cdot \frac{L}{\pi \cdot r^4}$	$(p_A - p_B) = Q \cdot R = \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot R$
ELECTRICIDAD		carga: $\frac{\Delta q}{\Delta t}$		ΔV		$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$	$(V_A - V_B) = i \cdot R = \frac{\Delta q}{\Delta t} \cdot R$
CALOR		energía: $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$		ΔT		$R = \frac{1}{k} \cdot \frac{L}{A} = \rho \cdot \frac{L}{A}$	$(T_C - T_F) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \cdot R$

Cuadro de analogías. "Ley de Ohm" en Fluidos, Electricidad y Calor

Atención: en el cuadro se usan las mismas letras para nombrar magnitudes distintas pues se ponen las que se usaron en el desarrollo de las distintas unidades durante el curso.

Ejemplo

¿Cuál es la mejor opción, la **a** o la **b**, para una ventana de 1 m^2 de superficie colocada en una habitación cuya superficie interior se mantiene a una temperatura de 20°C y su superficie exterior está a una temperatura de 5°C ?



a) Un grueso vidrio de 2 cm de espesor.

b) Un panel formado por dos vidrios de 0,5 cm de espesor separados por una capa de aire de 1 cm.

En la opción **a**) tenemos una única placa de vidrio de 2 cm de espesor y 1 m^2 de sección. A continuación calculamos la resistencia térmica:

$$R_a = \frac{0,02\text{m}}{1\text{m}^2 \cdot 0,84\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$R_a = 0,024 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}.$$

En la opción **b**), tenemos tres capas conectadas en serie y la resistencia térmica de la ventana es la suma de ellas:

$$R_{eq_b} = R_{\text{vidrio}} + R_{\text{capa aire}} + R_{\text{vidrio}}$$

$$R_{eq_b} = 2 \cdot R_{\text{vidrio}} + R_{\text{capa aire}}$$

$$R_{eq_b} = 2 \frac{0,005\text{m}}{1\text{m}^2 \cdot 0,84\text{Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}} + \frac{0,01\text{m}}{1\text{m}^2 \cdot 0,024\text{Wm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}}$$

$$R_{eq_b} = 0,0119 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0,4167 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{eq_b} = 0,428 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}.$$

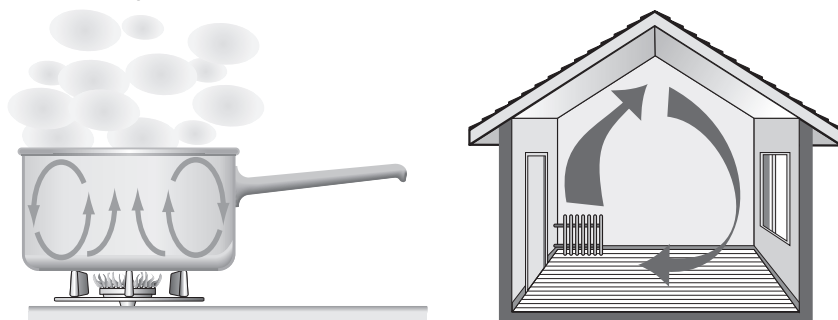
La velocidad con que se pierde calor es inversamente proporcional a la resistencia térmica (a igualdad de salto térmico).

La resistencia en el segundo caso es mayor que en el primero, por lo tanto la mejor opción para resguardar el calor es la segunda.

2.b - Convección

Aunque los líquidos y los gases no suelen ser muy buenos conductores de calor, pueden transmitirlo eficientemente por *convección*. Mientras que la conducción implica moléculas y/o electrones que se mueven pequeñas distancias, en la convección interviene el movimiento de masas de fluido compuestas de muchas moléculas y a lo largo de distancias macroscópicas.

En la *convección natural*, el calor se transfiere cuando el fluido se mueve a causa de las diferencias de densidad generadas por las distintas temperaturas existentes en el medio.

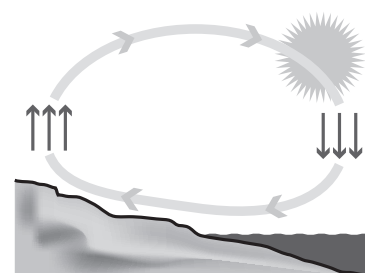


Corrientes de convección

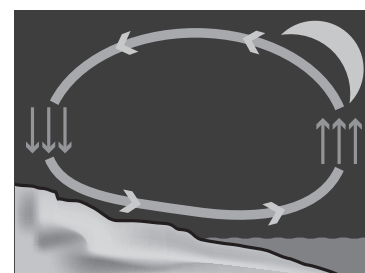
¿Cuál es el mecanismo? El fluido próximo a una fuente de calor se calienta por conducción y se dilata ligeramente, haciéndose menos denso que el fluido más frío de las capas superiores. Luego, el fluido caliente sube y es reemplazado por fluido más frío y más denso; el ciclo se repite y toda la masa de fluido va aumentando su temperatura. La convección es un fenómeno complejo que asocia a la conducción el movimiento de fluido en las llamadas *corrientes de convección*. En el ejemplo de la olla de la figura, el agua adyacente a la base de metal se calienta por conducción y lo mismo ocurre con el aire próximo al radiador en la figura de la derecha, la transmisión del calor a todo el fluido se hace más eficiente con las corrientes convectivas que no existirían si la estufa estuviera cerca del techo en lugar de en el piso. La convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, del tiro de las chimeneas, de las corrientes marinas, etc.

Otro ejemplo de convección natural es la formación de corrientes de aire o brisas en las vecindades de las costas de los mares o grandes espejos de agua (ver ilustración de la derecha). Los rayos del Sol calientan más fácilmente el suelo que la superficie del agua debido a que la capacidad calorífica del agua es mayor que la del suelo. Entonces, durante el día la temperatura que alcanza el suelo es mayor que la del agua por lo que el aire caliente próximo a la superficie del suelo se eleva. Lo reemplaza el aire más frío que estaba sobre la superficie del agua, dando lugar a una brisa que sopla desde el agua hacia la superficie terrestre. Durante la noche el agua se mantiene caliente por más tiempo, entonces el aire que está sobre su superficie se eleva y entra en su lugar el aire más frío que estaba sobre el suelo: la dirección de la brisa se invierte. Estas brisas sólo se observan cuando no existen otros vientos.

En la convección natural el movimiento del fluido se produce sólo por las diferencias de densidades en el medio; en cambio, en la *convección forzada* el fluido se mueve mediante una acción mecánica exterior, por ejemplo, un agitador, un ventilador o una bomba. Existe convección forzada en el sistema de refrigeración de un coche donde una bomba fuerza a circular agua fría alrededor del motor, luego el agua ya caliente cede el calor en el radiador donde se enfría por la acción de un ventilador que le manda aire frío. El transporte de calor del interior del cuerpo humano a la piel, nuestro radiador, se realiza por convección forzada por la acción de bombeo del corazón.



Brisa diurna



Brisa nocturna

Ley de enfriamiento de Newton

En rigor, la transferencia de calor en la convección se debe a la superposición de dos transportes de energía: uno por el movimiento aleatorio de las moléculas (conducción) y el otro por el movimiento global del fluido. Cuando un fluido en movimiento contacta una superficie sólida de mayor temperatura siempre se forma junto a la pared una película de fluido, fija por efecto viscoso, llamada *capa límite*, más o menos delgada según varios factores determinantes. La transmisión de calor de la pared al fluido se realiza por conducción a través de la película y, a la vez, por el movimiento convectivo del fluido. El flujo de calor por unidad de área es directamente proporcional a la diferencia entre la temperatura de la superficie (T_s) y la temperatura del fluido fuera de la capa límite (T_f). Esto se modela matemáticamente mediante la *ley de enfriamiento de Newton* para un sistema en régimen estacionario (con T_s y T_f constantes):

$$\frac{1}{A} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = h \cdot (T_s - T_f)$$

En conjunto el fenómeno es complejo porque la constante de proporcionalidad h , llamada *constante de convección térmica*, depende de varios factores, como por ejemplo: la naturaleza y estado del fluido (densidad, viscosidad, calor específico y conductibilidad térmica); la velocidad y el tipo de movimiento del fluido (laminar o turbulento); de la forma del sólido (pared plana o curva, vertical u horizontal); de la naturaleza de la superficie (rugosa o lisa), etc. Este coeficiente está tabulado para algunos casos típicos de interés práctico.

Ejemplo

Calculemos el flujo de calor por convección para una persona parada desnuda en una habitación a 25 °C donde el aire está en reposo. Supongamos que la epidermis tiene una temperatura promedio de 33 °C, consideramos que si la persona está erguida la superficie expuesta es de 1,4 m². Se ha determinado experimentalmente que h en este caso vale 7 W·m⁻²·°C⁻¹. Entonces:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) = 7 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 1,4 m^2 \cdot (33^\circ C - 25^\circ C) = 78,4 W.$$

Si el aire alrededor de nosotros se mueve por algún motivo la pérdida de calor es más rápida (la constante h aumenta con la velocidad del fluido en movimiento) dando lugar a que la *sensación térmica*, o sensación de temperatura ambiente, sea menor que la real. Es el justificativo físico del uso de abanicos y ventiladores que no hacen disminuir la temperatura del ambiente pero sí la velocidad con que perdemos calor. La humedad relativa también determina la sensación térmica, un día húmedo en que el sudor no se evapora, la transpiración no disipa calor eficientemente. La siguiente tabla muestra algunos valores indicativos de la *temperatura efectiva* (ver recuadro) que percibimos cuando nos exponemos a corrientes de aire.

Temperatura efectiva. Es aquella que debe tener el entorno para que, con un 50% de humedad relativa y con la velocidad del aire de 0,20 m/s, la pérdida de calor por unidad de tiempo sea la misma que la que se tiene con la temperatura, humedad relativa y el viento realmente existentes.

Rapidez viento (km/h)	Temperatura real (°C)								
	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
	Temperatura efectiva (°C)								
10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55
20	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60
30	-25	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65
40	-30	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70
50	-35	-40	-45	-50	-55	-60	-65	-70	-75

Un esquiador moviéndose a 30 km/h con una temperatura ambiente de -10 °C, siente que la piel del rostro se le enfría como si, sin movimiento relativo del aire, la temperatura fuera de -25 °C. (tabla tomada de Kane y Sternheim)

2.c -Radiación

En la conducción y la convección es necesaria la presencia de la materia. Sin embargo, la vida sobre la Tierra depende de la transferencia de energía solar, y ésta llega a nuestro planeta atravesando el espacio vacío. Esta forma de transferencia de energía se denomina *radiación*, se produce sin que sea necesario que exista un medio material aunque también puede ocurrir a través de un medio material como el aire. El calor se transmite sin transporte de materia, la energía radiante se presenta en forma de *ondas electromagnéticas*.

La emisión de radiación es una característica de todos los cuerpos materiales cualquiera sea su composición y características. Es una propiedad fundamental de la materia que está relacionada con el movimiento de las partículas elementales que la componen. Todos los cuerpos, siempre que su temperatura sea superior a 0 K (¡no se conocen temperaturas menores!) emiten radiación. La radiación emitida, asociada al movimiento de cargas eléctricas que constituyen cualquier material, se conoce como *radiación electromagnética*. La Física ha estudiado intensamente esta propiedad de la materia y muchos de los espectaculares avances del siglo XX ligados a la *Física Cuántica* se han iniciado por tratar de responder a la pregunta de cómo y por qué los cuerpos irradian.

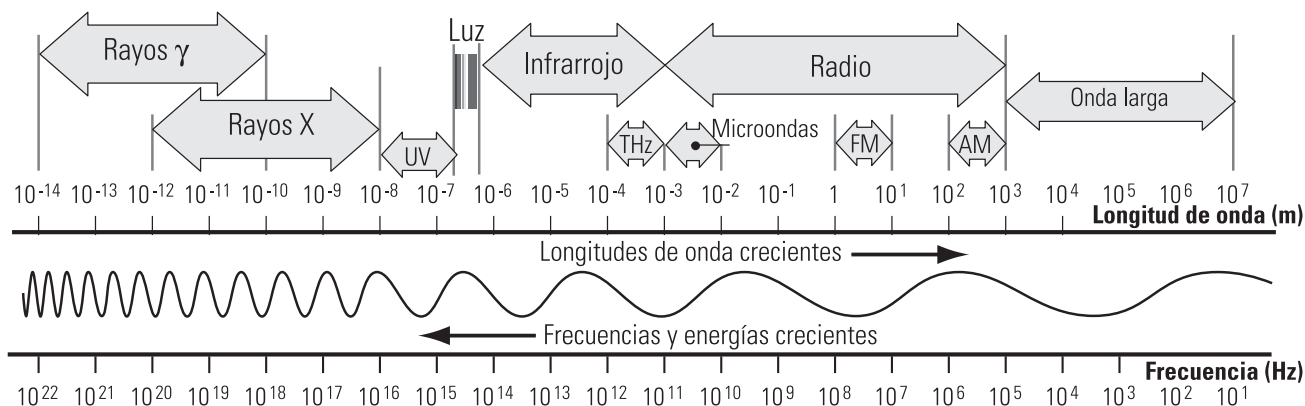
Espectro electromagnético

La radiación electromagnética transporta energía y viaja en el vacío a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s (en rigor: $c = 299.792.458$ m/s, la velocidad de la luz). La luz, las ondas de radio y la radiación infrarroja, que parecen tan disímiles, son de naturaleza similar. En general, todas estas radiaciones son campos electromagnéticos que se originan en el movimiento de los electrones que forman parte de la materia y que se propagan fuera de su fuente. Las ondas electromagnéticas, a semejanza de las ondas acústicas, se caracterizan por su *longitud de onda* (mínima distancia entre dos valores iguales de la perturbación) o la *frecuencia* que es inversamente proporcional a la longitud de onda.

Las ondas de radio, las microondas, el infrarrojo, la luz, el ultravioleta, los rayos X y los rayos γ (gamma) son los nombres distintos con que se conocen las ondas electromagnéticas por orden decreciente de longitud de onda. La energía que transporta la onda es inversamente proporcional a su longitud de onda. El conjunto de toda la gama de energía radiante ordenada y clasificada según su frecuencia conforma el *espectro electromagnético*.



¿Cómo nos calentamos con una fogata? La radiación infrarroja emitida por las brasas incide sobre nuestra piel y es absorbida, pues la frecuencia del infrarrojo coincide con la de vibración de las moléculas de agua de la piel. Las manos de la derecha se calientan, casi exclusivamente, por radiación. Las que sostienen el atizador metálico se calientan, también, por conducción. En cambio, las manos que están por encima de la fogata se calientan, principalmente, por convección.



Espectro electromagnético (el dibujo de la onda no está en escala)

Ley de Stefan - Boltzmann

El ritmo con que irradia energía un cuerpo, en todas las longitudes de onda del espectro, depende de la temperatura absoluta del mismo (en kelvin). La potencia (energía por unidad de tiempo) con que se emite energía radiante se puede evaluar mediante la *ley de Stefan - Boltzmann* cuya expresión es la que sigue:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

e es la *emisividad*, depende de las características del cuerpo. Sus valores van desde 0 (cuerpo reflector perfecto) a 1 para el llamado "cuerpo negro"

A es el área de la superficie emisora

σ es la *constante de Stefan - Boltzmann* $= 5,670400 \times 10^{-8} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T es la temperatura de la superficie emisora en kelvin (K)

Comparemos la potencia radiante por unidad de área del Sol, cuya temperatura exterior es de unos 6.000 K, con la de una taza negra de loza a 300 K (27 °C). La dependencia de la potencia radiante con la cuarta potencia de la temperatura magnifica sus diferencias: el Sol tiene una temperatura apenas 20 veces mayor, pero la energía que irradia por unidad de superficie es 160 000 veces superior (20 a la cuarta), considerando que ambos se comportan como cuerpo negro.

Un cuerpo que emite radiación está cediendo energía y, por lo tanto, si su temperatura no cambia es porque a la vez genera energía (como el Sol por reacción nuclear), o bien la está recibiendo de su entorno (como una estufa eléctrica). Todos los cuerpos, aparte de emitir, están expuestos a recibir energía radiante del entorno. Cuando un cuerpo recibe la radiación que le viene de otro lado, absorbe una parte y refleja otra. Cuánto refleja y cuánto absorbe depende de sus características. Hay cuerpos que absorben toda la energía radiante que les llega y no reflejan nada y se los denomina *cuerpos negros* y otros que prácticamente no absorben nada y reflejan casi todo (espejos).

Los cuerpos absorben preferencialmente aquellas longitudes de onda que resuenan con sus propios movimientos internos (molecular y atómico). Suponiendo que el cuerpo sea opaco a la radiación incidente, es decir, no la transmita, entonces:

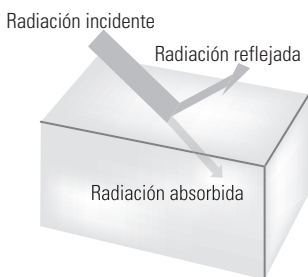
$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{reflejada}}$$

Si un cuerpo llega al equilibrio térmico puramente radiativo con su entorno, al mantener estable su temperatura, debe estar absorbiendo energía incidente al mismo ritmo con que emite. Por lo tanto un buen emisor tiene que ser también un buen absorbente.

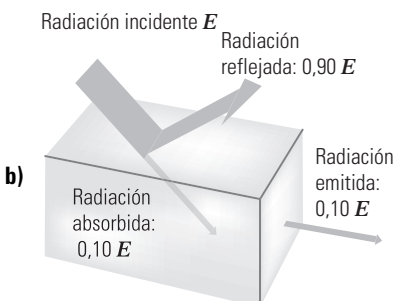
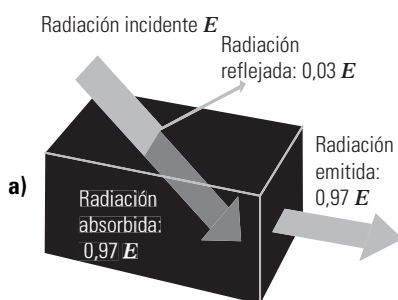
Un cuerpo a una temperatura T_C , en un entorno a una temperatura T_E , radiará energía según la expresión de Stefan-Boltzmann con una potencia por unidad de área de: $e \cdot \sigma \cdot T_C^4$ y absorberá energía con una potencia por unidad de área de: $e \cdot \sigma \cdot T_E^4$. El *coeficiente de absorción o absorbancia es idéntico a la emisividad* y se sustituye la temperatura del cuerpo por la del entorno. La potencia neta será:

$$P_{\text{neta}} = \frac{\Delta E}{\Delta t} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_C^4 - T_E^4)$$

Se han mencionado cuerpos aislados que emiten energía aunque no absorban. Por ejemplo, el Sol prácticamente no recibe energía desde el espacio que lo rodea pues está muy lejos de otros soles, pero está continuamente emitiendo radiación. Esto se debe a que en su interior suceden procesos (reacciones nucleares) que generan energía (y la producirán por muchos años todavía...) y esta energía es emitida finalmente como radiación. La vida en nuestro planeta no existiría sin este aporte continuo de energía.



$$E_{\text{incidente}} = E_{\text{absorbida}} + E_{\text{reflejada}}$$



Los cuerpos pueden estar en equilibrio térmico puramente radiativo con el entorno porque emiten en la misma medida en que absorben (a y b). Un cuerpo buen absorbente es también un buen emisor (a); un cuerpo buen reflector emite poco (b).

Ejemplo

¿Cuánta energía emite por radiación el cuerpo humano desnudo en una habitación que está a una temperatura de 25 °C? La emisividad de la piel es $e = 0,98$ (y la absorbancia tiene el mismo valor).

El cuerpo humano genera energía internamente y en parte la irradia. Puede mantener una temperatura constante independientemente de las condiciones exteriores (dentro de ciertos límites). Además, recibe energía radiante del entorno que lo rodea.

Según la expresión de Stefan-Boltzmann, la piel humana a $T_p = 33\text{ °C} = 306\text{ K}$, emite energía radiante con una potencia :

$$P_{\text{rad}} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T_p^4 = 0,98 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{W}{m^2 K^4} \cdot A \cdot (306 K)^4 = A \cdot 487,18 \frac{W}{m^2}$$

Sin embargo, si esta persona está en una habitación rodeada por superficies a una temperatura media T_A (es la temperatura ambiente de la habitación) entonces también absorbe la radiación que el conjunto de los objetos que la rodean están emitiendo. Considerando que la superficie expuesta de una persona erguida es de unos $1,4\text{ m}^2$, el balance neto es, entonces:

$$P_{\text{neto}} = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_p^4 - T_A^4) \\ = 0,98 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot 1,4 m^2 \cdot [(306 K)^4 - (298 K)^4] = 68,47 W$$

La potencia con que se pierde calor es parecida a la de convección.

Temperatura	Cuerpo
307 K	Cuerpo humano
770 K	Metales al "rojo"
1400 K	Brasas de carbón, tostadora eléctrica
1900 K	Llama de una vela
2800 K	Lamparita encendida de 75 W
2900 K	Lamparita encendida de 100 W
6000 K	Emisión solar

La tabla da ejemplos de cuerpos que alcanzan temperaturas constantes y distintas del medio exterior mediante mecanismos tales como el metabolismo, pasaje de corriente eléctrica, combustión química, reacciones nucleares, etc. El cuerpo irradia energía en función de la temperatura de su superficie.

La ley de desplazamiento de Wien

No sólo la potencia total de radiación por unidad de superficie depende de la temperatura del emisor. Los cuerpos condensados, sólidos o líquidos, emiten radiación de todas las longitudes de onda (espectro continuo característico de la radiación térmica) pero cuánto mayor es la temperatura de emisión, la radiación se concentra en longitudes de onda cada vez más cortas. Es decir, la energía total irradiada está compuesta por todas las longitudes de onda, pero sólo en algunas de ellas se concentra la mayor parte.

La *ley de desplazamiento de Wien* dice que la longitud de onda λ_m , a la cual le corresponde la máxima potencia radiante por unidad de área, es inversamente proporcional a la temperatura absoluta.

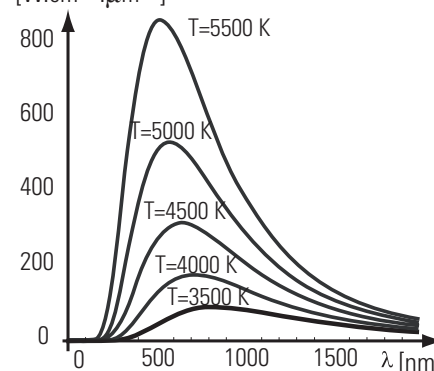
$$\lambda_m = \frac{2946 \cdot \mu m \cdot K}{T}$$

Esta expresión permite obtener λ_m en micrones ($1\mu = 10^{-6}\text{ m}$) si T es expresado en kelvin (K). En el gráfico de la derecha observamos:

- Cuanto mayor es la temperatura, la longitud de onda correspondiente al máximo de la curva se desplaza más hacia las longitudes de onda más cortas.
- La potencia radiante total por unidad de área, proporcional al área bajo la curva, crece rápidamente con la temperatura.

El Sol, nuestra fuente energética, tiene una temperatura exterior de aproximadamente 6000 K y emite mayoritariamente en la zona del espectro que conocemos como la zona de la luz visible, entre $0,4\text{ }\mu\text{m}$ y $0,7\text{ }\mu\text{m}$. Lo hace como un emisor perfecto (cuerpo negro) a esa altísima temperatura. No es casualidad que evolutivamente nuestro ojo sea sensible justamente al rango de longitudes de onda en que el Sol emite preferentemente, de esa manera se optimiza la detección de la luz solar. La materia que nos rodea, con temperaturas de unas pocas decenas de grados centígrados, emite mayoritariamente en el infrarrojo que no es visible para nuestros ojos. Por eso nuestros ojos ven los cuerpos que no están muy calientes por la luz que reflejan y no por la radiación que emiten.

Potencia por unidad de área por unidad de longitud de onda [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]



Distribución espectral de la radiación

Termorregulación y cambio de escala

Casi todo el calor de los procesos metabólicos en el cuerpo humano se produce en los órganos profundos. El circuito sanguíneo lo transfiere por convección forzada hacia la piel, donde el calor fluye al entorno por los tres mecanismos de transmisión mencionados. Cedemos calor por conducción cuando tocamos otros cuerpos más fríos. Habitualmente estamos a mayor temperatura que el ambiente, por eso cedemos calor por convección al aire y también perdemos energía por radiación.

La piel está muy vascularizada y somos capaces de regular el flujo sanguíneo cutáneo para ajustar convenientemente el flujo calorífico hacia el ambiente. Si en un día caluroso hacemos ejercicio físico, tenemos el recurso de aumentar el flujo sanguíneo cutáneo mediante la *vasodilatación*. Esto aumenta la temperatura superficial de la piel de manera que también aumenta la radiación y la convección. Otro buen recurso para la refrigeración es la *evaporación* de la transpiración. El calor latente de vaporización a la temperatura de la piel es de 580 cal/g, o sea que el cuerpo cede 580 kilocalorías por cada litro de sudor evaporado. Sólo el sudor que se evapora es efectivo: un día muy húmedo y sin viento la *transpiración* puede caernos a chorros sin lograr refrigerarnos. También existe disipación de calor por evaporación en la *respiración*: el aire entra más o menos seco y en los pulmones se satura de humedad.

Si la temperatura ambiente es muy baja disminuimos el flujo sanguíneo cutáneo mediante la *vasoconstricción* para bajar la temperatura de la piel y así disminuir la pérdida por radiación y convección. Si el recurso no es suficiente aumentamos la producción del calor: hacemos ejercicio físico voluntario o *tiritamos*.

La energía que entregamos al medio ambiente por los mecanismos de conducción, convección y radiación dependen del área de nuestra piel. Por otra parte, producimos energía por mecanismos que se desarrollan en el interior de nuestras células. La energía que generamos es proporcional, entonces, a nuestra masa total y por lo tanto a nuestro volumen. Generamos en función de nuestro volumen y perdemos de acuerdo a nuestra superficie. *¿Quién necesita comer más por kilogramo de peso corporal, un niño o un adulto?*

Se dice que los niños comen, proporcionalmente, más que los adultos porque están creciendo, pero existe otra razón relevante: la diferencia de tamaño establece diferencias considerables en la termorregulación.

Cuestión de escala.

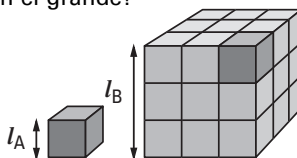
La semejanza geométrica de dos cuerpos de diferente tamaño no implica la semejanza de sus comportamientos físicos.

Esta diferencia de conducta entre cuerpos de igual material y forma que difieren en tamaño ocurre en todos los procesos físicos que involucren, al mismo tiempo, magnitudes dependientes del volumen y magnitudes dependientes del área de la superficie exterior del cuerpo. El estudio atento de la relación entre el área y el volumen en el cambio de escala nos permite entender, entre otros muchos fenómenos, las diferencias en la termorregulación en animales de distinto tamaño.

La cuestión geométrica.

Tomemos como modelo un cuerpo de forma simple: un cubo. Queremos ver cómo afecta el cambio de escala en la relación entre el área de la superficie exterior del cubo y su volumen, así que compararemos dichas magnitudes para un cubo chico *A* cuya lado mide l_A y otro cubo grande *B* cuya lado l_B es tres veces l_A . Si observamos a la figura podemos responder:

- 1) ¿cuál es la relación entre el área total del cubo chico y el grande?,
- 2) ¿cuántas veces entra el cubo chico en el grande?



A partir de las fórmulas del área y el volumen en función del lado :

$$1) \quad A_A = 6 \cdot l_A^2 \text{ y } A_B = 6 \cdot l_B^2$$

$$\text{pero como } l_B = 3 \cdot l_A$$

$$A_B = 6 (3 \cdot l_A)^2 = 9 \cdot 6 \cdot l_A^2 = 9 \cdot A_A$$

Como se aprecia en la figura, el área de la superficie exterior del cubo grande es nueve veces la del cubo chico.

$$2) \quad V_A = l_A^3 \text{ y } V_B = l_B^3$$

$$\text{pero como } l_B = 3 \cdot l_A$$

$$V_B = (3 \cdot l_A)^3 = 27 \cdot l_A^3 = 27 \cdot V_A$$

Como vemos, el volumen del cubo grande es 27 veces el del cubo chico.

En general, cuando cambia el lado, el cambio porcentual del área es menor que el del volumen. Cuanto

menor sea un cubo, más centímetros cuadrados de superficie tendrá por cada centímetro cúbico, y tendrá expuesta mayor proporción de materia. Esto también ocurre con cuerpos irregulares cualesquiera, suponiendo que al cambiar su tamaño conserven su forma.

Cuanto menor es el cuerpo, mayor es la proporción área-volumen.

La cuestión física.

Ahora estamos listos para responder a la pregunta inicial. El cuerpo humano es un dispositivo que opera a temperatura constante, que libera energía originada de la combinación de su combustible (los alimentos) con el oxígeno en forma de calor y trabajo. El metabolismo químico de la comida convierte continuamente energía química en energía térmica interna; si el cuerpo no disipara calor se recalentaría. Como normalmente el ambiente está a menor temperatura que 37 °C, existe un flujo continuo de calor desde el cuerpo hacia el medio. Si dejaran de ocurrir las reacciones químicas en las células, el cuerpo (ya cadáver) alcanzaría el equilibrio térmico con el medio más o menos rápido según sus dimensiones. *El secreto de la termorregulación es lograr un sutil equilibrio entre ambos procesos: la generación de energía térmica interna y su disipación.*

Ahora bien, la velocidad de entrega de calor al ambiente es directamente proporcional al área de nuestra piel mientras que la producción de calor es proporcional al volumen. Dado que cuánto menor es el cuerpo, mayor es la proporción área-volumen, (el niño tiene más piel por centímetro cúbico corporal) se puede inferir que, en un cierto tiempo, el calor disipado por unidad de masa es mayor en el niño que en el adulto. Por lo tanto, en compensación, el niño genera más energía térmica por unidad de tiempo y de masa que el adulto: *la tasa metabólica basal específica es mayor para un niño que para un adulto.* Para un hombre de 70 kg es de 24 kcal/(día x kg) mientras que para un bebé de 3 kg la tasa metabólica específica es de 53 kcal/(día x kg).

En general, a semejanza de otros factores, un animal chico necesita tener un metabolismo más rápido (y un mayor consumo de oxígeno por kilogramo de peso) que uno grande para reemplazar la energía que, por unidad de masa, se le escapa con mayor rapidez. La tasa metabólica específica de un elefante es de sólo 8,2 kcal/(día x kg) mientras que para un ratón es de 185 kcal/(día x kg)