

Cap. 5 – Temperatura, Física 2.

Matías Fernández y Paulo Valente,
Instituto de Física, Facultad de Ingeniería.

13 de junio de 2019

1. Introducción

“¿¿Qué es la temperatura? –preguntó uno. ¡Es aquello que se mide con un termómetro! –contestó el Físico”. A pesar del tono aparentemente jocoso, esta anécdota nos sirve para entender que una magnitud física muchas veces se confunde con su medida. Como otros ejemplos, podríamos decir que distancia es aquello que se mide con una regla; tiempo es lo que se mide con un reloj, etc. Este capítulo pretende dar el primer paso en el estudio de la *Termodinámica*, cuyo objetivo es el tratamiento de los problemas que involucran una nueva magnitud física, la temperatura. Estos efectos están frecuentemente asociados a transferencias de energía entre los cuerpos en forma de calor.

Para los organismos biológicos dichos efectos son percibidos por el propio cuerpo del individuo, en lo que habitualmente llamamos sensación térmica y que nos permite distinguir entre cuerpos calientes y fríos.

Para generar una visión intuitiva del origen de la temperatura debemos entender que una porción macroscópica de materia (sea en cualquier estado: sólido, líquido o gaseoso) está formada por un número absurdamente grande de partículas, típicamente del orden del número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$) las cuales llamaremos genéricamente de *moléculas*. En un fluido, estas moléculas se mueven en forma aleatoria en todas las direcciones posibles, colisionando entre sí y con las paredes del recipiente. Si intentáramos utilizar las leyes de Newton de la mecánica para intentar describir el movimiento del conjunto de moléculas, resultaría en un sistema con un número de ecuaciones igualmente grande, lo que sería absolutamente intratable. Además, la solución sería tan compleja que resultaría imposible de interpretar.

El tratamiento termodinámico consiste en no hacer suposiciones sobre la constitución del medio material, utilizando solamente variables macroscópicas, como la *presión*, el *volumen*, la *temperatura* y la *masa* de los cuerpos para describir los fenómenos, lo que resulta en un pequeño número de ecuaciones. El tratamiento termodinámico será abordado en tres grandes etapas.

1. Consiste en la definición de propiedad termométrica y el concepto de equilibrio térmico, consecuencia de la *Ley Cero de la termodinámica*.
2. Consiste en incluir el calor como una nueva forma de intercambio de energía. Así, la *Primera Ley de la Termodinámica* hace un replanteo del balance de energía, que incluirá las transferencias de calor.
3. La *Segunda Ley de la Termodinámica* hará la diferenciación entre los procesos físicos reversibles y los irreversibles, introduciendo el concepto de orden y desorden de un sistema, a través del concepto de Entropía.

2. Ley Cero de la termodinámica

La llamada Ley Cero está directamente relacionada con el concepto de *equilibrio térmico*. De forma general, el equilibrio se refiere a un balance entre dos partes de alguna propiedad física. Citando algunos ejemplos:

- Un líquido en reposo en un tubo en U. La situación hidrostática se da cuando existe un equilibrio de presiones entre las extremidades del fluido.
- Una cuerda extendida y levemente tensionada estará en equilibrio dinámico, ya que la tensión a lo largo de la cuerda es siempre la misma.
- En una balanza de comparación de masas (el símbolo comúnmente utilizado para la justicia) el punto 0 marca el equilibrio de torques entre los dos brazos de la balanza.

Así, podemos decir que dos cuerpos están en equilibrio térmico cuando tienen la misma temperatura.

Denotaremos por sistema termodinámico a una porción de materia que ocupa una región limitada del espacio y que puede intercambiar calor y trabajo con su entorno a través de sus fronteras. Para los cuerpos sólidos es natural que la superficie limítrofe del objeto se asocie con su volumen. Para líquidos y gases, los recipientes que los contienen definen las fronteras del sistema y ocupan un rol fundamental en los procesos que serán analizados. Vamos a considerar dos tipos de paredes: *diatérmicas* y *adiabáticas*,

- Las paredes **diatérmicas** son aquellas que permiten el intercambio de calor entre dos cuerpos.
- Las paredes **adiabáticas** son aquellas que NO permiten el intercambio de calor.

Estas paredes, simbolizadas en las figuras 1 y 2 representan idealizaciones. En la práctica, las paredes metálicas son buenas conductoras de calor y son consideradas diatérmicas, mientras que las cerámicas y algunos polímeros son malos conductores de calor y por lo tanto adecuados para la aislación térmica. Los procesos de transferencia de calor serán tratados en el Cap. 8.

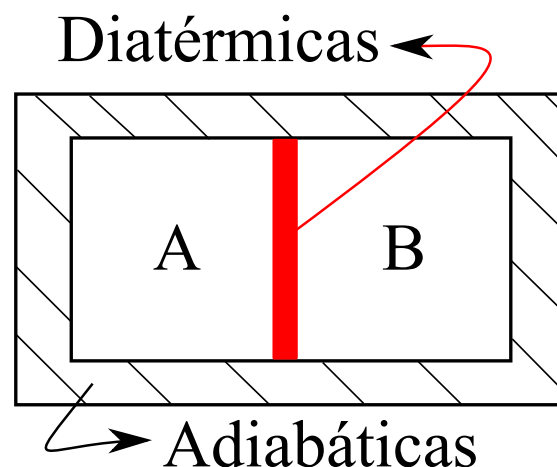


Figura 1: Representación gráfica de los dos tipos de fronteras a ser estudiadas. Los cuerpos A y B están en **contacto térmico**. El sistema formado por A+B está aislado del ambiente.

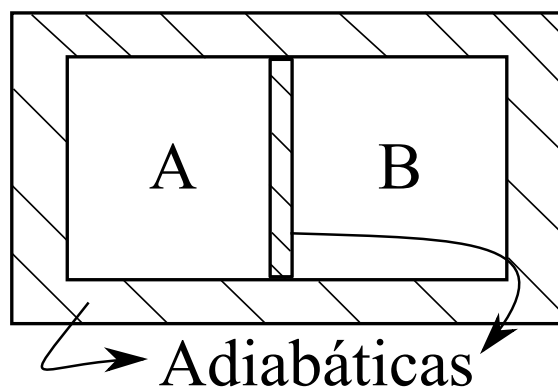


Figura 2: Representación gráfica de fronteras adiabáticas. Los cuerpos A y B están aislados uno del otro y ambos del ambiente.

La experiencia nos muestra que, dos cuerpos de temperaturas inicialmente distintas, una vez puestos en contacto térmico uno con el otro, alcanzarán una temperatura de equilibrio después de un tiempo suficientemente largo. Así, en la figura 1 se puede decir que una vez alcanzado el estado de equilibrio $T_A = T_B$ y en la figura 2 la temperatura del sistema A es independiente del sistema B.

Ahora analicemos la situación mostrada en la figura 3. La disposición de las paredes diatérmicas indican un estado de equilibrio térmico, donde $T_A = T_C$ y también $T_B = T_C \Leftrightarrow T_A = T_B$. Con eso, se puede enunciar la **Ley Cero**: *si dos cuerpos están en contacto térmico con un tercer cuerpo, también estarán en equilibrio térmico entre sí.*

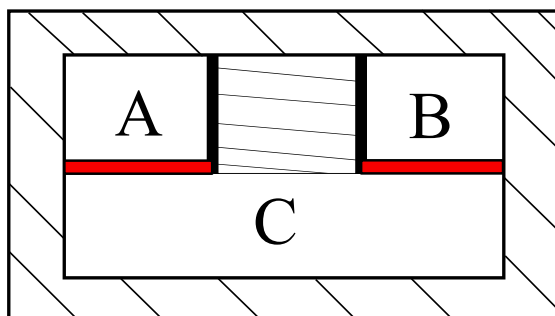


Figura 3: Dos cuerpos A y B separados por paredes adiabáticas, pero ambos en contacto térmico con un cuerpo C.

3. Propiedades termométricas. Termómetro

La principal consecuencia de la ley cero es que permite, a partir de un cuerpo de referencia C, comparar la temperatura de diferentes cuerpos. ¿Ahora bien, ¿cómo podemos cuantificar variaciones de temperatura? En primer lugar, debemos buscar alguna otra propiedad física del sistema C (por ejemplo su volumen o presión) que sufra cambios con la temperatura. A estas magnitudes se las conoce como *propiedades termométricas*. El problema en cuestión es el mismo con el que nos topamos cuando queremos definir un patrón de unidades. Para ello, se buscan en la naturaleza situaciones (o sistemas) que sean suficientemente estables y reproducibles. Propiedades termométricas comunes son: el volumen, la presión y la resistencia eléctrica, entre otras. En lo que sigue, vamos a analizar la variación de volumen de un líquido a causa de una variación en la temperatura para definir la escala de temperaturas Celsius.

Un termómetro de alcohol ¹ consiste en un bulbo cuyo volumen V_b es ocupado por un

¹También se utiliza mercurio, pero su uso actual es cada vez menor, ya que se desaconseja su mani-

líquido, cuyo volumen

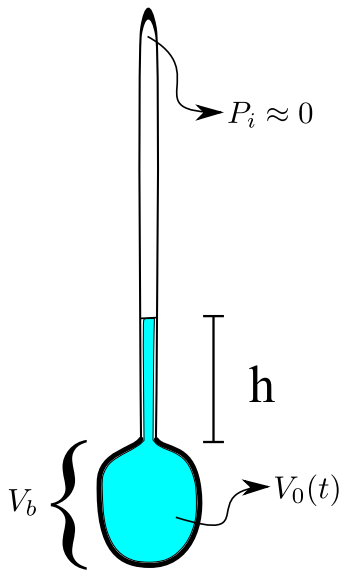


Figura 4: Esquema de un termómetro de mercurio (o alcohol).

V_0 cambia con la temperatura. El bulbo está conectado a una columna muy fina, de sección recta constante. Cuando el bulbo es sumergido en un cuerpo caliente el volumen V_0 comienza a aumentar ² y el líquido sube por la columna definiendo una altura h que deberá ser la medida final. En la práctica, el volumen de la columna es bastante menor que V_b , ya que la sección recta de la columna es muy fina.

El próximo paso será buscar en la naturaleza los sistemas que tengan propiedades térmicas estables y reproducibles que puedan ser usadas como referencias de altura. Típicamente, los sistemas de temperatura estable son obtenidos en los procesos de cambio de estado, o sea los puntos de fusión y ebullición de una sustancia dada.

En el caso de la escala Celsius se utilizaron los puntos de fusión y ebullición del agua como referencia de sistema físico estable. El paso siguiente es asociar valores numéricos (¡enteramente arbitrarios!) a estos puntos. Tomando $T_h = 0^\circ C$ para la fusión del agua y $T_v = 100^\circ C$ para la ebullición (en las mismas condiciones de presión, $P = 1 \text{ atm}$) y dividir tal intervalo en 100 unidades elementales

(intervalo también arbitrario) se define la escala Celsius.

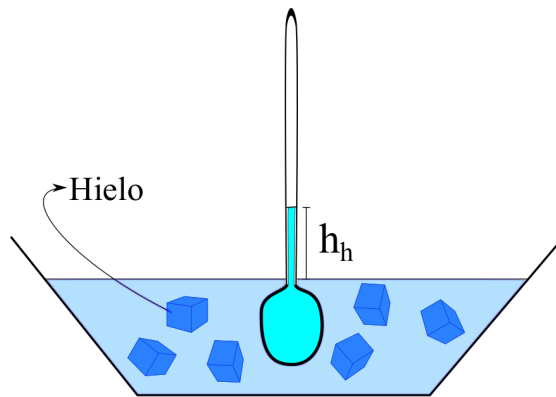


Figura 5: Agua + hielo en el punto de fusión del agua.

Así, cuando colocamos el termómetro en una sustancia que está a una temperatura intermedia obtenemos una altura intermedia. Precisamos entonces hacer suposiciones sobre la dependencia de h en función de la temperatura T . Si suponemos una dependencia lineal podemos ver que la temperatura T_m alcanzada por una medida intermedia debe valer $T_m = Xh_m + Y$ donde X e Y son dos constantes a determinar. Llamando $T_h = 0^\circ C$ la temperatura de fusión del agua y $T_v = 100^\circ C$ la de ebullición, encontramos que $X = \frac{100^\circ C}{h_v - h_h}$ e $Y = -\frac{100^\circ C}{h_v - h_h} h_h$, o sea

$$T_m = \frac{h_m - h_h}{h_v - h_h} 100^\circ C \quad (1)$$

A través de esa ecuación es posible relacionar una magnitud física visible y mensurable (la altura del líquido en la columna) con el estado térmico de la sustancia investigada.

pulación debido a su alta toxicidad.

²Vamos considerar que el volumen V_b prácticamente no cambia con la temperatura, como es el caso del vidrio.

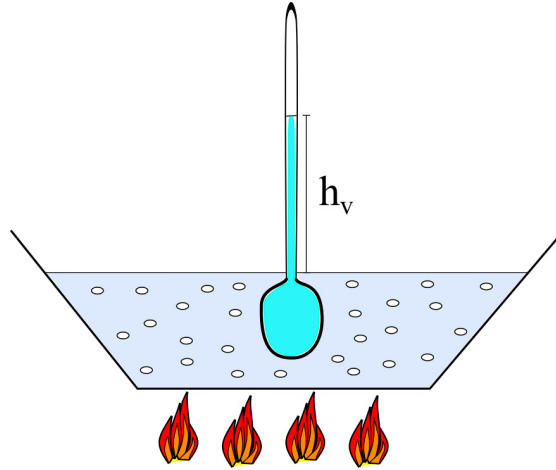


Figura 6: Agua en su punto de ebullición.

Notar que el hecho de que el termómetro haya sido calibrado utilizando el agua como sustancia de referencia no limita el uso del mismo aparato para otras sustancias. Además, podemos generalizar la última expresión para una propiedad termométrica X cualquiera, desde que $X \propto T$, o sea

$$\frac{X_m - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{T_m - T_1}{T_2 - T_1}, \quad (2)$$

donde T_1 y T_2 son números arbitrarios para los estados físicos 1 y 2, correspondiendo a los respectivos valores X_1 y X_2 (medidos) de la propiedad termométrica.

4. Termómetro de gas y escala absoluta de temperatura

Si utilizamos ahora un gas como sustancia termométrica, vemos que tanto la presión como el volumen pueden cambiar con la temperatura, una consecuencia directa de la evidente compresibilidad de los gases. La vida cotidiana está llena de ejemplos donde vemos la variación de volumen o presión a causa de cambios en la temperatura: al colocar una botella plástica vacía (digo, con aire) en el freezer, la temperatura del aire baja y la botella se dobla, reduciendo su volumen, lo que solo es posible porque el plástico es un material un poco elástico... Si, en cambio, una botella de vidrio, conteniendo una bebida gaseosa es colocada bajo el sol, el aumento de temperatura causa un incremento en la presión del gas, ya que el vidrio es un material muy poco elástico y por lo tanto no puede cambiar su volumen.

Una manera de relacionar la presión de un gas con los cambios de temperatura ha sido propuesta por Lord Kelvin, como un termómetro de gas a volumen constante y está mostrado en la figura 7. Un bulbo de paredes rígidas y diatérmicas (por ejemplo de vidrio) tiene una salida a través de un tubo de mismo material y contiene un gas, cuya cantidad de masa y la especie de gas puede ser cambiada a gusto del experimentador. La dirección del tubo es invertida para acoplarse con una manguera flexible, formando un tubo en U, el cual contiene un líquido (preferentemente de alta densidad, en el experimento original se utilizó Mercurio). El bulbo es sumergido en un recipiente de paredes adiabáticas, el cual contiene la sustancia cuya temperatura se pretende medir. Como la presión del gas no es necesariamente la atmosférica las superficies libres del mercurio no se equilibran a la misma altura. Por lo tanto, la presión del gas está directamente relacionada con la diferencia de alturas mostrada en la figura a través de la relaciones hidrostáticas, a saber

$$P_{gas} = P_N = P_{N'} = P_o + \rho_{(Hg)}gh. \quad (3)$$

Además, si el tubo en U es flexible, es posible variar la altura del tubo de salida de manera a mantener el punto N fijo para cualquier temperatura (adentro de los límites de largo del tubo en U), manteniendo el volumen del gas constante. Así la presión puede ser vista como una propiedad termométrica, que puede ser determinada por la medida de la altura h .

Como Celsius, Kelvin utilizó los mismos estados físicos de referencia: El punto de vapor y el punto de hielo del agua. Kelvin midió sucesivamente la presión del punto de vapor P_v y la presión del punto de hielo P_h para diferentes tipos de gas y diferentes cantidades del mismo gas.

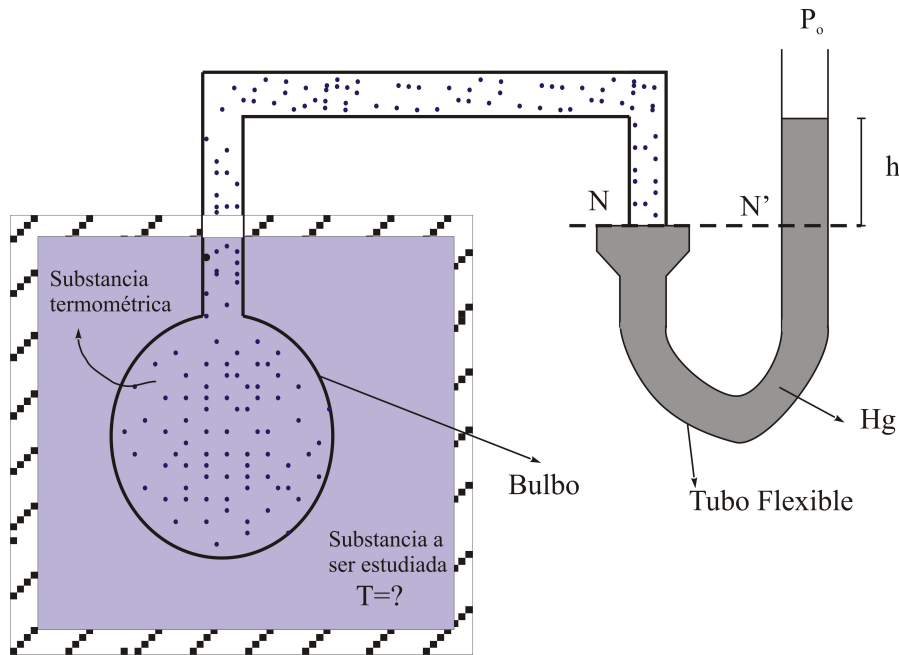


Figura 7: Experimento de Kelvin, siglo XIX.

Los resultados obtenidos por él pueden ser esquematizados en el gráfico de la figura 8. Vemos que al reducir la masa de gas, los valores se aproximan de una recta. Diferentes especies de gas generan diferentes pendientes, pero todas tienen el mismo valor límite, que puede ser empíricamente determinado, permitiendo obtener la expresión

$$\lim_{P_h \rightarrow 0} \frac{P_v}{P_h} = 1,3661 \quad (4)$$

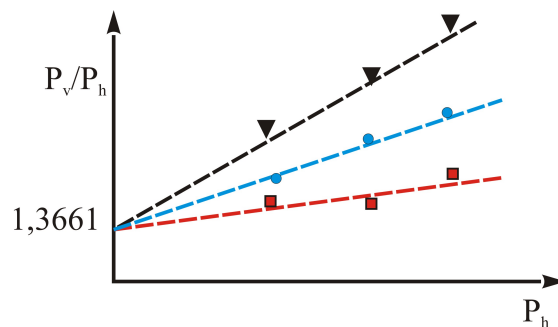


Figura 8: Resumen de los resultados de los experimentos de Kelvin. Triángulos negros, círculos azules y cuadrados rojos se refieren a diferentes tipos de gas. Los diferentes puntos en cada grupo se refieren a diferentes masas de gas utilizadas. Todos los gases muestran el mismo punto de extrapolación.

Si la presión es la propiedad termométrica,

$$\lim_{P_h \rightarrow 0} \frac{P_v}{P_h} = \frac{T_v}{T_h} = 1,3661. \quad (5)$$

La última expresión pone un vínculo entre los dos números T_v y T_h que serán los valores de temperaturas del punto de hielo y de vapor en la nueva escala. Como esa relación es consecuencia directa del experimento, es considerado una realidad de la física. Sin embargo, la inexistencia de otra información general, permite elegir arbitrariamente otra relación entre los números T_v y T_h , lo que ha sido tomado igual a la escala Celsius, es decir

$$T_v - T_h = 100. \quad (6)$$

Combinado esas dos ecuaciones, se pueden determinar unívocamente los números T_v y T_h , resultando

$$T_h = 273,15K \quad (7)$$

$$T_v = 373,15K \quad (8)$$

que representan las temperaturas del punto de hielo y vapor del agua (a presión atmosférica) tomados en la escala Kelvin (K). Como $T_h^C = 0^\circ C$ la transformación de una escala a la otra es

$$T^K = T^C + 273,15. \quad (9)$$

Notemos que el valor límite obtenido es independiente del tipo de gas, lo que permite decir que la escala Kelvin de temperaturas es una escala *absoluta*. Como se verá en el capítulo que sigue, la escala Kelvin no presenta valores negativos, siendo $T = 0$ K ($T^C = -273,15^\circ C$) la mínima temperatura físicamente admisible de un sistema.

5. Procesos termodinámicos

En el estudio de la mecánica, en general estamos interesados en la evolución temporal de los objetos. Conocer las funciones $\vec{r}(t)$ significa conocer su trayectoria, $d\vec{r}/dt$ su velocidad, etc.

Análogamente, en termodinámica vamos estudiar la evolución de las variables termométricas (típicamente la presión y el volumen) en función de la temperatura. Se puede definir un estado termodinámico a través de un conjunto de variables, por ejemplo, presión, volumen y temperatura (P, V, T) definiendo un espacio 3D. Los puntos en ese espacio representan los *estados* termodinámicos. Así, un *proceso* se refiere a una trayectoria en ese espacio, el cual lleva el sistema desde un estado (P_1, V_1, T_1) a un estado (P_2, V_2, T_2) . Para cada sistema físico de interés, vamos a analizar separadamente los procesos más habituales.

6. Dilatación

Empezaremos por el proceso de dilatación térmica, que analiza el cambio en las dimensiones de un objeto (volumen) debido a las variaciones de temperatura, como es el caso de una botella con agua que se expande al congelarse en el freezer. El propio termómetro de alcohol analizado anteriormente consiste en la variación de su volumen a causa de la temperatura. Es un efecto que ocurre en gases, líquidos y sólidos, pero en primer lugar restringiremos nuestra atención a los procesos que mantienen la presión constante. Los gases (ideales) serán tratados en detalle en el capítulo 6. Veamos los otros dos estados más comunes.

6.1. Sólidos

Un hecho experimental conocido desde el inicio de la era de los metales, es que son buenos conductores de calor y sus dimensiones dependen de la temperatura. Podemos citar algunos ejemplos comunes en el cotidiano. Los grandes bloques de hormigón que pavimentan algunas calles deben ser dispuestos manteniendo un espacio entre ellos (llamado "luz"), que es frecuentemente relleno por algún material blando. Cuando esa luz no es suficiente, la dilatación promueve el contacto directo entre dos placas, haciendo aumentar la presión interna entre ellas, causando el rompimiento de las mismas. Se sabe que en general los ferrocarriles son dispuestos sobre una sucesión de barras de madera (llamados *dormientes*), que por su turno reposan sobre un piso hecho de pedregullos. La dilatación de las barras de hierro producen movimientos de los *dormientes*; el piso de pedregullo es lo que permite que la barra se mueva sin perder capacidad de soportar el peso de los trenes.

Desde el punto de vista empírico, podemos comenzar observando el largo de una barra como función de la temperatura. Una barra se caracteriza por una sección recta de área A y de volumen $V_{barra} = A \times L$, cuyo largo L es mucho más grande que sus dimensiones transversales, o sea $L^2 \gg A$. Empíricamente, es posible entregar calor gradualmente a una barra de forma de variar progresivamente su temperatura y medir su largo, generando una serie de mediciones sucesivas que permiten construir una tabla $T \times L$. Se observa una relación de tipo lineal

$$L(T) = L_o + L_o\alpha(T - T_o) \quad (10)$$

En esta expresión L_o corresponde al largo de la barra para la temperatura T_o y α se denomina coeficiente de dilatación térmica lineal. Llamando $\Delta L = L - L_o$ y $\Delta T = T - T_o$, la última expresión puede ser reescrita de la siguiente forma

$$\frac{\Delta L}{L_o} = \alpha\Delta T \quad (11)$$

que muestra que el *cambio relativo* de largo es proporcional al cambio de temperatura.

Esta linealidad permite obtener las variaciones de área de una placa. Una placa es un objeto de simetría plana, donde el espesor es muy fino comparado con las otras dimensiones, o sea $e^2 \ll A$. Si tomamos una sección rectangular, $A = L_1L_2$. Así

$$\frac{\Delta A}{A_o} = \frac{\Delta(L_1L_2)}{L_1L_2}. \quad (12)$$

Aplicando la regla de derivada del producto,

$$\frac{\Delta A}{A_o} = \frac{\Delta L_1}{L_1} + \frac{\Delta L_2}{L_2} \quad (13)$$

y ambos términos son iguales a lo que ha sido obtenido para una barra,

$$\frac{\Delta A}{A_o} = 2\alpha\Delta T \quad (14)$$

O sea, el coeficiente de dilatación superficial es el doble del coeficiente lineal.

Si efectuamos el mismo razonamiento para un sólido, de volumen $V_o = L_1L_2L_3$, y buscamos la relación $\Delta V/V_o$ encontraremos

$$\frac{\Delta V}{V_o} = 3\alpha\Delta T. \quad (15)$$

Por lo tanto, el coeficiente de dilatación volumétrica es tres veces el coeficiente lineal.

6.2. Líquidos

Los líquidos también sufren una dilatación volumétrica que también puede ser considerada lineal en cierto intervalo de temperaturas, o sea

$$\frac{\Delta V}{V_o} = \beta \Delta T, \quad (16)$$

donde β es el coeficiente de dilatación volumétrico del líquido. Típicamente, $\beta \approx 10^{-4} / ^\circ C$, mientras que los coeficientes de dilatación lineal de los metales son del orden de $10^{-6} / ^\circ C$. Eso nos permite analizar el problema de un recipiente de aluminio completamente lleno de un líquido que se pretende calentar. Ambos volúmenes (inicialmente iguales) van a crecer debido al aumento de temperatura, pero el líquido tiene mayor coeficiente de dilatación, por lo tanto se expandirá más que el recipiente, llevando a un desborde. Se puede ver que el volumen desbordado estará dado por

$$V_{desb} = V_{Hg}(T) - V_{Recip}(T) = V_o (\beta - 3\alpha) \Delta T. \quad (17)$$

Se puede concluir que en los casos en que $\beta > 3\alpha$ ocurrirá el desborde y si $\beta < 3\alpha$ el recipiente se dilatará más que el líquido, pero en general no ocurre... En la práctica, para prevenir el efecto de desborde, nunca se debe llenar completamente un recipiente que será calentado.

6.3. Agua y la dilatación del hielo

Un caso muy común en nuestro día-a-día es el aumento de volumen del agua a causa de su congelamiento. Ese hecho parece ser contrario a la expresión obtenida arriba, que indica una contracción del líquido al descender la temperatura. Eso es correcto si $\beta > 0$, lo que no es siempre verdad. De hecho, el coeficiente de dilatación depende de la temperatura ($\beta = \beta(T)$). Para el caso del agua esa dependencia es más compleja cerca del punto de fusión, donde el coeficiente β cambia de signo cuando el agua llega a $4^\circ C$, y es negativo para $T < 4^\circ C$. Por lo tanto, el agua se contrae hasta llegar a un volumen mínimo a $4^\circ C$, y después se expande, alcanzando un volumen superior al inicial.

Ese hecho, conocido como “anomalía del agua” crea algunos problemas y soluciona otros... Como todos los seres vivos tienen grandes cantidades de agua en su composición, al congelar un alimento la expansión del agua tenderá a comprimir los tejidos biológicos, eventualmente rompiendo moléculas orgánicas muy grandes (por ejemplo, las vitaminas) y eliminando una parte del valor nutritivo del alimento, y por eso no debe ser repetido muchas veces. Las tecnologías industriales modernas consiguen efectuar reducciones graduales en la temperatura de materiales biológicos sin dañarlos demasiado hasta temperaturas muy bajas utilizando sucesivos procesos de deshidratación.

Por otro lado, es este hecho que posibilita la sobrevivencia de los seres vivos en un lago de una región de invierno riguroso. En general, cuando un lago se congela en el invierno se forma una pequeña capa de hielo en la superficie, mientras que abajo la vida sigue fluyendo en agua líquida, típicamente alrededor de $4^\circ C$ ¡una verdadera piscina termal comparados con los $-20^\circ C$ posibles en la superficie! Eso ocurre porque la atmósfera se enfría primero, a la medida que las capas superiores empiezan a congelarse, aumentan su volumen y comprime la masa de agua por debajo, elevando su presión. Ese aumento de presión termina por elevar su temperatura.