

Clara Elvira Camargo y Eduardo Zalamea G.

DEL FRÍO Y DEL CALOR

¿Dónde está la frontera natural entre el calor y el frío?

La observación común de que podemos clasificar los cuerpos en fríos y calientes, de que entre los calientes hay unos que lo están más y otros que lo están menos, permite pensar en una cualidad de los cuerpos susceptible de ser metrizada, es decir, de encontrar una escala que asocie un número real, o sea un grado de dicha cualidad, a cada uno de los posibles estados de un cuerpo.

En 1701 publicó Newton un pequeño trabajo titulado *Heat*, en el cual establecía dos escalas de temperatura, con un rango más amplio que el que puede lograrse sólo con un termómetro de columna líquida, y a la vez proponía un modelo del enfriamiento, la llamada “ley de enfriamiento de Newton”. En este trabajo se puede ver a Newton tratando de metrizar, de geometrizar una cualidad que hasta entonces se manejaba cualitativamente. ¿Con qué dificultades se enfrentó?

El uso de columnas líquidas o gaseosas para comparar distintos “grados de calor” de los cuerpos ya era conocido. Newton cuenta que, para una misma variación de la temperatura, la expansión de la columna de aire es diez veces mayor que la de la columna de aceite, y ésta a su vez es quince veces mayor que la del alcohol. No cuestiona de modo explícito la validez de medir las variaciones de temperatura directamente como variaciones de la longitud de la columna; termómetros construidos con diferentes sustancias marcarían temperaturas diferentes de un mismo cuerpo, salvo en los dos puntos

de la escala usados como referencia. Lo curioso es que la frase final del artículo no es, como se esperaría, el establecimiento de la ley del enfriamiento, sino el de la linealidad de la dilatación.

Con respecto al término “grados de calor” se observa que a lo largo de todo el artículo Newton emplea esta expresión para referirse a lo que hoy día se llama temperatura. En cambio, unas veces emplea el término “calor” con la connotación que tiene este término en la física actual y otras veces como abreviatura de la expresión “grados de calor”, es decir, en la acepción de “temperatura”; sin embargo, no hay ninguna confusión conceptual: el pensamiento de Newton no parece menos claro que si dispusiera de la herramienta de un lenguaje técnico ya elaborado.

Por otra parte, hay en la expresión “grados de calor” una connotación interesante. Obsérvese que habla de “grados de calor” y no de “grados de frío”, pero atribuye al cero de la escala la calidad de ser la “frontera natural entre el calor y el frío”. La clasificación ingenua de los cuerpos en fríos y calientes que es la base sensorial de la que hay que partir por necesidad para pasar a la instrumentación, la matematización, la eliminación de la subjetividad, está todavía presente en la expresión.

¿Cómo construyó Newton su termómetro?

Lo primero que hizo Newton fue decidirse a trabajar con un termómetro de aceite de linaza. Luego asignó el valor cero al punto de fusión de la nieve. Con el objeto de fijar la unidad de la escala debía asignar valor a la temperatura de otro cuerpo. Y ya que “el hombre es la medida de todas las cosas”, ¿qué cosa más natural que tomar como referencia la temperatura del cuerpo humano? Entonces Newton asignó a esta temperatura el valor 12 en su escala aritmética:

En la primera columna están los grados de calor en progresión aritmética, calculados comenzando con el calor al cual el

agua comienza a congelarse, tomando este valor como el mínimo grado de calor o la frontera común del calor y el frío, y estableciendo el calor externo del cuerpo humano como 12 partes.

Newton da algunos datos sobre las dilataciones de columnas de aceite al ser calentadas a varias temperaturas y sobre las razones entre las dilataciones del aceite, del aire y del alcohol. Suponiendo la proporcionalidad entre las dilataciones y los cambios en la temperatura, procedió a marcar el termómetro y a establecer la escala aritmética. En esta escala, longitudes iguales corresponden a diferencias de temperatura iguales. Obsérvese que se está midiendo la temperatura con una regla.

¿Cuál es el calor de la sangre recientemente derramada?

Para Newton no basta con mencionar un número para caracterizar un cierto estado de equilibrio térmico. No basta decir, por ejemplo, que la temperatura es de diez grados. Cada valor de temperatura corresponde en realidad a la temperatura 0, en sus términos, al “calor” de algo. Es así como, para cada grado de calor en la escala, viene a la derecha la explicación de a qué corresponde dicho valor.

A continuación se presenta un extracto de la tabla:

Una escala de los grados de calor

Escala aritm.	Escala geom.	
0		El calor del aire en invierno para el cual el agua comienza a congelarse. Este calor se determina colocando el termómetro en nieve que se está derritiendo.
6		Calor del aire al medio día en el mes de julio.
12	1	El máximo calor que el termómetro puede tomar cuando está en contacto con el cuerpo humano. Éste es apro-

		ximadamente el mismo calor de un pájaro que empolla sus huevos.
14½	1¼	Aproximadamente el mayor calor que puede soportar una mano cuando se sumerge en una bañera y se mueve constantemente. Es aproximadamente el calor de la sangre recientemente derramada.
34	2½	El calor al cual el agua hierve violentamente, y al cual una mezcla de dos partes de plomo, tres partes de estaño y cinco partes de bismuto se endurece a medida que se enfría.
36		El hierro, a medida que se enfría, cesa de causar ebullición de las gotas que se vierten sobre él a un calor de 35 ó 36 partes si es agua tibia, y a 37 partes si es agua fría.
96	4	El mínimo calor al cual el plomo se derrite.
114	4½	El calor al cual cuerpos incandescentes, a medida que se enfrían, dejan de brillar en la oscuridad de la noche, y cuando se calientan comienzan a brillar en la misma oscuridad, pero con una luz muy débil.
161	4¾	El calor al cual cuerpos incandescentes brillan en la penumbra inmediatamente antes del amanecer o al crepúsculo, mas no lo hacen o lo hacen muy débilmente a la luz del día.
192	5	El calor de las brasas de carbón bituminoso en el fuego de una pequeña estufa soplada con un fuelle. Es también el calor del hierro en tal fuego cuando brilla al máximo.

¿Cómo medir la temperatura con la ayuda de un reloj?

En el termómetro ordinario se mide la temperatura con una regla. ¿Se puede usar un reloj para hacer lo mismo?

Newton pudo medir con el termómetro hasta la temperatura de fusión del plomo. Para temperaturas más altas debió buscar otro

método. ¿Cómo procedió? Cogió un bloque de hierro que había calentado al rojo y lo puso en un sitio donde soplaban el viento, con el objeto de que la temperatura del aire en contacto con el bloque fuera siempre la misma; además, es necesario suponer, si bien Newton no lo dice explícitamente, que “el grado de calor” de éste es el mínimo, es decir, cero. Sobre el bloque colocó pedacitos de cuerpos fundibles, como plomo, cera y aleaciones varias, de modo que, cuando éstos se solidificaban, suponía que el hierro ya había alcanzado la temperatura correspondiente al punto de fusión del material:

Calenté un pedazo de hierro suficientemente grande hasta que estuvo incandescente, y, retirándolo del fuego todavía con unas tenazas, lo coloqué aún incandescente en un lugar frío donde el viento soplaban constantemente, y colocando sobre él pequeñas piezas de varios metales y otros cuerpos licuables, anoté los tiempos de enfriamiento hasta que todos estos cuerpos perdieron su fluidez y se endurecieron, y hasta que el calor del hierro se hizo igual al calor del cuerpo humano. [...] Coloqué el hierro no en aire quieto sino en una corriente uniforme de aire, de manera que el aire calentado por el hierro era continuamente arrastrado por el viento y reemplazado por el aire frío en un movimiento uniforme. Así, partes iguales de aire eran calentadas en tiempos iguales y se llevaban un calor proporcional al calor del hierro.

Además, es probable que, para determinar el momento en que el hierro alcanzaba esa temperatura, Newton hiciera uso de la observación de que “el hierro que se enfría cesa de causar ebullición de las gotas que se vierten sobre él a un calor de 35 ó 36 partes, si es agua tibia, y a 37 partes si es agua fría”, números que encontramos en su tabla. Este método se asemeja al que utilizamos para averiguar si una plancha está suficientemente caliente.

El razonamiento que le permite determinar “los calores” con ayuda de la plancha de hierro es el siguiente:

Porque el calor que el hierro comunica en un tiempo dado a los cuerpos fríos que están cerca a él, esto es, el calor que el hierro pierde en un tiempo dado, es proporcional al calor total del hierro. Y de esta forma, si se toman tiempos de enfriamiento iguales, los calores estarán en progresión geométrica y, en consecuencia, pueden encontrarse fácilmente con una tabla de logaritmos.

Ésta es toda la explicación que da Newton sobre la manera como determina “los calores” con la plancha de hierro. El hecho de que la tabla da los valores de dos escalas, la aritmética y la geométrica, sugiere que, así como la primera escala es lineal con la longitud, la segunda lo es con el tiempo. La escala que él llama geométrica debió construirse así: Newton primeramente asigna el valor 1 a la temperatura del cuerpo humano y el valor 2 a la temperatura de fusión de la cera. El tiempo que tarda el bloque en enfriarse desde la temperatura 2 a la temperatura 1 es el lapso con que se va a medir la diferencia de 1 grado en esta escala. Ahora sólo basta medir los tiempos de enfriamiento desde cuando el hierro está al rojo vivo. En esta escala, si la diferencia de temperaturas entre dos estados del bloque es la misma que entre otro par de estados, los tiempos de enfriamiento de uno a otro estado, en ambos casos, serán iguales.

La postulación de la ley del enfriamiento parece basarse sólo en un razonamiento matemático que Newton no considera necesario aclarar. Hoy en día la representación corriente de la variación de una cantidad X , cuyo decrecimiento en determinado intervalo de tiempo es proporcional tanto a la cantidad total de X en ese momento como a la magnitud del intervalo de tiempo, es la de la curva exponencial que permite visualizar la variación continua de la cantidad en el tiempo. En la época de Newton, la representación usada para este mismo tipo de fenómenos era la de la progresión geométrica, donde la variación no ocurre de manera continua sino por pasos discretos. A medida que el tiempo aumenta en intervalos iguales, la cantidad que se está considerando disminuye por un mismo factor.

En una situación análoga a la planteada por Newton, podría procederse de la siguiente manera: supóngase que la temperatura ambiente es de cero grados y que entre el momento en que el bloque está a 96° –la temperatura de fusión del plomo– y el momento en que está a 24° –la temperatura de fusión de la cera– transcurren dos horas. Entonces, un factor de $24/96 = 1/4$ corresponde a un lapso de dos horas. De aquí se desprende que el factor correspondiente a un intervalo de tiempo de una hora será de $\sqrt[1/4]{1/4} = 1/2$. De este modo, marcamos los puntos sobre la escala. Con este procedimiento se amplía la tabla, pero se sigue trabajando con la escala aritmética de “grados de calor”.

Newton parece haber construido primero la escala geométrica, aunque no brinda detalles concretos de esta construcción. En la explicación de la tabla describe la escala geométrica:

En la primera columna están los grados de calor en progresión aritmética [...] en la segunda columna están los grados de calor en progresión geométrica, de manera que el segundo grado es dos veces mayor que el primero, el tercero dos veces mayor que el segundo, y el cuarto dos veces mayor que el tercero, y el primero es el calor externo del cuerpo humano que es sensiblemente constante.

Y en el párrafo final relaciona los datos de las dos escalas:

Los calores así encontrados están en la misma razón unos a otros que aquellos encontrados con el termómetro, y por lo tanto hemos supuesto correctamente que las expansiones del aceite eran proporcionales a los calores.

La representación matemática actual del fenómeno del enfriamiento es como sigue. Llamando $\theta(t)$ la temperatura en el instante t , y si suponemos que la temperatura ambiente es cero, tendremos:

$\Delta\theta = -k\theta\Delta t$, es decir, el descenso en la temperatura es proporcional a la temperatura misma y al intervalo de tiempo. Esto conduce a la ecuación diferencial: $d\theta/dt = -k\theta$, la cual tiene como solución: $\theta(t) = \theta_0 e^{-kt}$.

Es de anotar que en la representación anterior se ha empleado la escala de temperaturas que Newton llamó aritmética o cualquier transformación lineal de ella. Una escala métrica siempre puede ser transformada en otra equivalente. En el caso de las dos escalas de Newton, la transformación que relaciona θ_a (temperatura en la escala aritmética) y θ_g (temperatura en la escala geométrica) es la siguiente: $\theta_a = 2(\theta_g + 2,5849625)$ o bien $\theta_g = \lg_2 \theta_a - 2,5849625$.

La ley del enfriamiento es más simple si empleamos la temperatura en la escala geométrica: $\theta_g = C - kt$.

Al medir, como lo hizo Newton, la temperatura con reglas o relojes, surge la pregunta: ¿es reductible la unidad de temperatura, el “grado de calor”, a las unidades mecánicas fundamentales? Luego se hará referencia a este punto.

¿Qué es el calor?

En la postulación de la ley del enfriamiento, es claro que para Newton el calor es algo que está contenido en los cuerpos. Un cuerpo a cero grados no poseería nada de calor. Por otra parte, no formuló hipótesis respecto a la naturaleza del calor. Esta cuestión permaneció abierta a la discusión por mucho tiempo. Aunque ya desde la antigüedad hubo quienes relacionaron “el calor de los cuerpos” con el movimiento de las diminutas partículas que los componen, en el siglo XVIII la teoría predominante fue la del *calórico*. Éste se entendía como una sustancia imponderable que podía ser intercambiada por cuerpos que se hallaban a diferentes temperaturas. Se pensaba la temperatura como análoga a la presión en el caso de los fluidos. Actualmente el calor se entiende como la energía intercambiada por cuerpos cuyas moléculas tienen una energía cinética promedio di-

ferente. La última se asocia a la temperatura termodinámica o temperatura absoluta. Sin embargo, la cuestión no es tan simple; esta concepción mecánica de la temperatura tiene sus dificultades en el dominio de lo muy frío, en que la mecánica cuántica obliga a rechazarla. El físico A. G. Worthing afirma:

Actualmente no conocemos ninguna cantidad mecánica pura —es decir, que pueda expresarse sólo en términos de masa, longitud y tiempo— que pueda usarse, aunque sea incómoda, en vez de la temperatura. Nos inclinamos a sacar la conclusión de que probablemente la temperatura, en sí misma, es un concepto básico. [Citado por Hecht, 1980].

¿Y qué pasó con el frío?

En el siglo XVI Gianbattista della Porta señaló que un espejo cóncavo reflejaba el sonido, la luz, el calor y el frío. Notó que la luz y el calor de una vela que colocaba ante un espejo producían cada uno la sensación correspondiente en el ojo colocado en el foco conjugado y subrayó:

Es aún más maravilloso que, así como el calor, el frío también puede ser reflejado: si Ud. coloca nieve en ese lugar y coloca allí el ojo [en el otro foco], [...] el ojo sentirá en ese momento el frío. [Citado por Taylor, 1959].

Un efecto similar fue identificado por otros observadores posteriores. Estos hechos sustentaron durante algún tiempo la teoría de que existía también un fluido que transportaba los atributos del frío tal como el calórico transportaba el calor. La actual interpretación de las observaciones de Porta no implica que el hielo radie frío al ojo, sino que éste radia calor a la nieve. La interpretación mecánica del calor como una forma de energía no deja lugar alguno a la

teoría de la existencia del frío, ya que no pueden existir energías cinéticas negativas, el frío no existe (pero mejor cerremos la ventana para que no entre).

Conclusiones

En el artículo de Newton se destacan con claridad varios aspectos del proceso por el cual un científico construye representaciones de los fenómenos del mundo real.

En primer lugar se ve cómo se pasa de lo subjetivo, de lo sensible, al plano abstracto de las matemáticas. El establecimiento de un proceso de medición hace que los objetos se transformen en cifras y pierdan su particularidad. Si en la tabla que nos presenta Newton aún se caracteriza cada valor por un objeto, el resultado es que al final se puede hacer referencia a tal o cual “grado de calor” sin necesidad de ubicarlo en el universo perceptual. También se hace posible la superposición, en una misma tabla, de objetos que pertenecen al universo de “lo caliente” con otros que pertenecen al universo de “lo frío”.

La descripción que da Newton de su experimento está lejos de ser exhaustiva. Continuamente se mezclan consideraciones teóricas con observaciones y parece que sólo se hace referencia a aquellas que sustentan las hipótesis. Es notorio el afán de idealizar, de buscar la estructura matemática que sustenta el fenómeno observado.

Aunque este artículo se ha considerado como el primero que describe un termómetro con el cual se descubrió una ley empírica, la ley del enfriamiento, la idea de Newton del mismo es bien distinta. En primer lugar porque la ley del enfriamiento es deducida a partir de una consideración matemática, y es la confianza en esta postulación teórica la que permite diseñar la escala geométrica y el termómetro de plancha de hierro caliente. La consistencia entre las temperaturas medidas con los dos termómetros hacen concluir a

Newton no que su conjetura sobre la ley de enfriamiento era correcta, sino más bien que “hemos supuesto correctamente que las expansiones del aceite eran proporcionales a los calores”, es decir, que para él lo que se verifica no es la ley del enfriamiento sino la ley de la linealidad de la dilatación.

Esto es interesante porque se observa cómo un procedimiento empírico de medición, que ya llevaba mucho tiempo, no tiene para Newton la calidad de procedimiento válido, mientras no haya un razonamiento matemático que lo sustente o que, como en este caso, haya sido confirmado experimentalmente por comparación con otro procedimiento válido.

Finalmente, se ha intentado ilustrar cómo una construcción teórica evidencia la existencia de ciertos entes y desarticula la existencia de otros: el calor en el primer caso y el frío en el segundo.

Referencias

- Hecht, E. 1980. *Física en perspectiva*. Boston: Addison Wesley Iberoamericana.
- Newton, I. 1701. “Heat”. En: *The Philosophical Transactions. Abridged. Vol. II*. Tomado de: Maggie, W. F. *The Source Book in Physics*. Cambridge: Harvard University Press, pp. 125-128.
- Taylor, L. I. W. 1959. *Physics, the Pioneer Science*. New York: Dover.