

De la temperatura y su medición

EDVCAATIO PHYSICORVM



Michel Picquart¹, Izayana Carrasco Morales²

¹*Departamento de física, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, San Rafael Atlixco 186, Colonia Vicentina, Ciudad de México 09340.*

²*Departamento de Atención a la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud, Ciudad de México 04960.*

E-mail: mp@xanum.uam.mx

(Recibido el 4 de marzo de 2017, aceptado el 31 de marzo de 2017)

Resumen

Los orígenes del termómetro, su nacimiento y sus modificaciones sucesivas han ido a la par de la comprensión de los principios fundamentales de la ciencia del calor y en particular la definición y la fundación de los dos conceptos diferentes de temperatura y cantidad de calor. Se necesitaron más de doscientos años de colaboración de las mentes más brillantes para realizar este instrumento que constituye hoy en día un parámetro importante de la observación clínica para el diagnóstico, la vigilancia de la evolución y el control de la eficacia de un tratamiento, entre otras aplicaciones.

Palabras clave: Termómetro, temperatura, calor.

Abstract

The origins of the thermometer, its birth and successive modifications have been developed with the understanding of the fundamental principles of heat science, particularly with the definition and construction of the two concepts of temperature and heat. More of two hundred years of collaboration of many brilliant spirits would be necessary to construct this instrument which is today an important parameter of the clinical observation for diagnosis, evolution survey and control of treatment efficiency, among others applications.

Keywords: Thermometer, temperature, heat.

PACS: 01.65.+g, 05.70.-a, 06.20.-f, 07.20.Dt

ISBN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La temperatura es una magnitud familiar sin ser muy fácilmente explicable. Todos tenemos una percepción intuitiva de esta noción: «¡Está caliente!» uno se exclama tomando una bebida hirviente... Y sabemos desde hace mucho tiempo que las propiedades físicas de la materia dependen de la temperatura: así, el agua líquida se transforma en hielo cuando hace suficientemente frío.

Pero esta percepción intuitiva, sensorial, de la temperatura es poco precisa, y a menudo engañosa: así, una temperatura externa de -5°C nos parecerá más agradable en la montaña, en pleno sol por un esplendoroso tiempo; al contrario, esta misma temperatura de -5°C nos parecerá helada a la sombra.

Por lo tanto, no se puede en ningún caso fiar de nuestros sentidos, de nuestra percepción, para definir la noción de temperatura. A la temperatura, están asociadas las sensaciones de caliente y frío pero para pasar de la sensación a la definición de una magnitud física medible, tuvieron que transcurrir históricamente varias etapas y varios siglos.

Para Aristóteles, en el siglo IV a. C. en Grecia, el fuego era uno de los cuatro constituyentes de la materia, con el agua, el aire y la tierra. La idea de medir algo, el fuego u otra

cosa, es decir de dar un valor numérico a una cantidad, le era totalmente ajeno ya que su física era esencialmente no matemática: sus teorías se basaban en observaciones cualitativas. La síntesis de las ideas de Aristóteles con el cristianismo, ha sido realizada en el siglo XII por Tomás de Aquino (1224 – 1274) y estas ideas han sido mucho tiempo dominantes en el mundo de los sabios europeos, hasta el principio del siglo XVII (Galileo, por ejemplo, se pronunció en contra de estas ideas).

Por tanto, hasta el siglo XVII, las descripciones del mundo se quedaron desafortunadamente cualitativas. La excepción presentada por los astrónomos es elocuente: para establecer su modelo heliocéntrico en los primeros años del siglo XVI, Copérnico (1473 – 1543) pudo apoyarse en medidas de la Antigüedad y en las de astrónomos árabes de la Edad Media. De la misma manera, son las mediciones notablemente rigurosas y precisas (menos de un minuto de ángulo) efectuadas en el “laboratorio” de Tycho Brahe (1546 – 1601) que han permitido el descubrimiento por Johannes Kepler (1571 – 1630) de sus tres leyes que constituyeron uno de los fundamentos de la dinámica de Isaac Newton (1642 – 1727). El principio del siglo XVII, es un periodo en el cual las antiguas tradiciones dejan lugar a espíritus científicos que

apoyan sus teorías sobre el experimento y que abren la puerta a la ciencia moderna.

En el caso de la termodinámica, el filósofo inglés Francis Bacon (1561 – 1626), colocando las bases del método del razonamiento inductivo al principio del siglo XVII, toma justamente el calor como ejemplo para destacar su propósito. Para estudiar su naturaleza, propone en *Novum Organum Scientiarum* [1], inventariar todas las observaciones de fenómenos en los cuales aparece el calor, de fenómenos en donde no aparece y en donde aparece “por grados”. Este método queda todavía cualitativo pero, casi en el mismo momento, una presencia una explosión de intentos de medición realmente cuantitativos de este “grado de calor”.

Hay que destacar aquí el papel de los médicos en estos intentos. Desde la antigüedad, los médicos empleaban unas escalas de temperaturas subjetivas. De hecho, Hipócrates (460 – 377 a.C.) utilizaba unos métodos empíricos para tratar de determinar las diferencias de temperatura en el cuerpo humano, indicación de enfermedad, como untar la parte del cuerpo de lodo húmedo donde se suponía que había una infección, para ver donde se secaba primero [2, 3]. Ya hacia la diferencia entre el “calor dulce” y la “fiebre ardiente”. Tres siglos más adelante Galeano de Pérgamo (129 – 216), discípulo de Hipócrates, hizo el mismo tipo de determinación y propuso que la sensación de “frio” o “calor” se midiera según una escala empírica de cuatro grados de calor, situados por encima o por debajo de un punto neutro y utilizó medicinas capaces de modificar este grado de calor [4, 5, 6]. Después, como lo veremos más adelante, otros médicos trataron de seguir las enseñanzas de estos pioneros para medir la temperatura de los pacientes de manera más fiable. Pero para llegar a este punto varios siglos pasaron. Se “mide” la temperatura con un termómetro. En realidad, lo que se hace es comparar una temperatura con un cambio en una propiedad física conocida.

Por tanto, en la segunda parte haremos una historia del termómetro, en la tercera mostraremos como se llegó a poder medir la temperatura, una de las siete magnitudes físicas en el sistema internacional de unidades [7], en la cuarta parte hablaremos de la escala absoluta de temperaturas, en la quinta de las variaciones de temperatura entre día y noche, en el suelo, en la atmósfera y en el cuerpo humano.

II. PEQUEÑA HISTORIA DEL TERMÓMETRO

Es a principio del siglo XVII que Galileo (1564 – 1642) entiende, durante un experimento sobre el calor, que el aire se dilata cuando se calienta y que se contracta cuando se enfría. Aunque frecuentemente, se considera a Galileo, por el descubrimiento anterior, como el inventor del primer aparato de medición de la temperatura, parece que la idea del termómetro de aire fue retomada por el médico Santorre Santorio (1561 – 1636), llamado Sanctorius, que fue el inventor del primer instrumento graduado sensible a la temperatura (Fig. 1), llamado termoscopio en 1612 y que lo usaba para seguir la evolución de la fiebre en sus pacientes. Este aparato posee únicamente tres graduaciones: la temperatura del aire enfriado por la nieve, la del aire

calentado por la llama de una vela y el punto medio. El inconveniente mayor de los termoscopios es que son sensibles a la presión atmosférica. No hay que olvidar que es solamente en 1644 que el físico y matemático italiano Evangelista Toricelli (1608 – 1647), estudiando la presión, construye el primer barómetro.

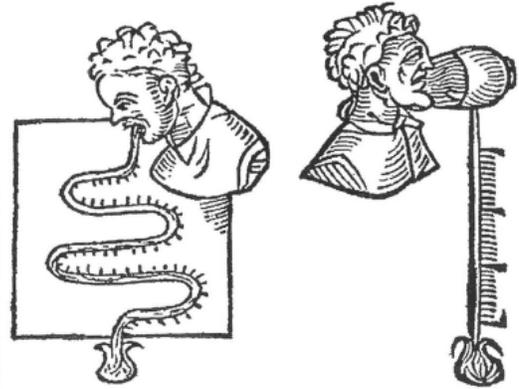


FIGURA 1. Termoscopio de Santorio. Ilustración del libro “Comentarios” de Avicena (1646) reproducida en [8].

En 1648, Florin Perrier (1605 – 1672), encargado por Blaise Pascal (1623 – 1662) muestra que la presión atmosférica varía con la altura [9]. Pascal señala inmediatamente el mayor defecto de los termoscopios, el de depender de la presión atmosférica. Esta fecha puede ser vista como el punto de partida de la construcción de nuevos termómetros.



FIGURA 2. Termoscopio llamado "de Galileo" de fabricación comercial actual (Universidad de Le Mans, Francia). Su tubo contiene objetos (de 5 a 8) que flotan, cada uno con una temperatura escrita. La temperatura ambiente está comprendida entre la del más alto y del más bajo objetos que flotan. La precisión

de este instrumento de medición es de 0.5 °C. No puede medir temperaturas ni demasiado bajas ni demasiado altas.

Hay que notar que Vincenzo Viviani (1622 – 1703), discípulo de Galileo, menciona en una carta, escrita en 1654, al príncipe Leopoldo de Toscana la invención del termómetro de vidrio, con agua y aire, para distinguir el frío del calor y las variaciones de temperatura de la región [10].

Uno de los termoscopios de la Historia, llamado “de Galileo” es un instrumento de medición basado en el empuje de Arquímedes y la dilatación de la materia (Fig. 2).

Sin embargo, es con este instrumento que los primeros principios y condiciones de medición de la temperatura fueron descubiertos. Esta invención puede ser considerada más importante que los mejoramientos posteriores, de una importancia capital, pero que no cambiaron nada al principio físico de base de la medición de una temperatura: la cuantificación de la variación del volumen de un fluido asociada a las variaciones de temperatura.

Pero en esta época, ni la palabra “termoscopio” ni la palabra “termómetro” existían. Esta última aparece en 1624, en el libro del jesuita francés Jean Leurechon (1591 – 1670), la *Récréation mathématique* [11]. En esta obra, el autor, en el problema setenta y seis, empieza por la frase “Del termómetro, o instrumento para medir los grados de calor o de frío, que están en el aire” como se puede observar en la Fig. 3.



FIGURA 3. Reproducción del problema setenta y seis de J. Leurechon donde aparece la palabra termómetro por la primera vez, reproducida de [11].

La historia del termómetro se puede dividir en tres partes. La primera corresponde a los intentos todavía imprecisos donde los experimentadores, buscando fijar con una medición el estado calorífico de los cuerpos, imaginaron aparatos sensibles a la acción de varios factores físicos y, por tanto, incapaces de dar indicaciones repetibles o comparables. Fueron los tiempos que separaron la invención del primer aparato termométrico, llamado posteriormente termobarómetro, y la mitad del siglo XVII, cuando apareció el termómetro cerrado de líquido en un tubo de vidrio [12, 13].

Por su parte, parece que el primer termo-barómetro que usaba líquido nació hacia 1605 en manos de un holandés nombrado Cornelius Drebbel (1572 – 1633): basado en ideas de los griegos Filón de Bizancio (siglo III a. C.) y Herón de Alejandría (siglo I a. C.), estaba constituido de una esfera hueca de vidrio prolongada de un tubo graduado orientado hacia abajo y hundido en un líquido colorado (Fig. 4). Si la esfera es calentada, el líquido es empujado hacia abajo por dilatación del aire, y al contrario, si es enfriada, el líquido sube en el tubo: por tanto, era un termómetro de aire. Este termómetro sirvió un poco más tarde para dar seguimiento a la fiebre de los enfermos, pero tenía el inconveniente de ser a la vez sensible a las variaciones de presión atmosférica y a la temperatura.

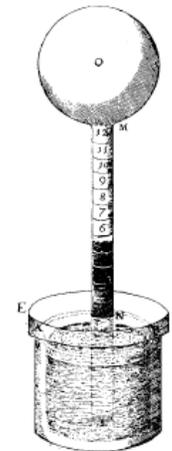


FIGURA 4. Termómetro de aire del principio del siglo XVII. La esfera está llena de gas cuyo volumen cambia con su temperatura y empuja el agua del reservorio de abajo cuya superficie está a la presión atmosférica. Grabado de Robert Fludd (1626). Reproducida de [14].

El uso de este instrumento, en diferentes formas, se encuentra mencionado por varios autores hasta el final del siglo XVII [15]. Parece que no hay duda que el médico y químico francés Jean Rey (1583 – 1645) usaba en 1630, la dilatación del agua contenida en un recipiente coronado por un tubo estrecho para estimar los estados caloríficos.

Hacia la mitad del siglo, los termómetros de líquido se hicieron mucho más fiables y también más fácil de empleo. En adelante, la esfera de vidrio se encontraba en la parte baja del dispositivo y era llenada de un líquido colorado que subía en un tubo graduado. Al principio, este tubo era abierto, pero se dieron cuenta que cerrándolo se evitaba la evaporación del líquido. Este último mejoramiento es atribuido a Giovanni Francesco Sagredo (1571 – 1620), amigo íntimo de Galileo, en 1615 [15]. Estos perfeccionamientos fueron sostenidos por el gran duque italiano Ferdinand II de Medici y estos dispositivos fueron llamados “termómetros de Florencia” (Fig. 5) y en 1641, se empezó la fabricación de los primeros termómetros de tubo sellado conteniendo un líquido [13].

En una pintura de Gasparo Martellini (1785 – 1857), pintada en 1838, se ilustra una reunión de la Academia del Cimiento que realiza experiencias espectaculares sobre la medición del calor (Fig. 6).

Esta obra hace referencia al termoscopio fabricado y experimentado por Galileo hacia 1597, cuando estuvo en Padua. Estos experimentos tratan de evidenciar por una parte, como la luz reflejada por un espejo actúa sobre el termoscopio y por otra parte, como el frío del hielo o el caliente del ámbar ardiente, actúan sobre él. Atrás de la mesa, se encuentran los tres académicos más conocidos: Giovanni Alfonso Borelli (1608 – 1679), Vincenzo Viviani (1622 – 1703) y Francesco Redi (1626 – 1697) quienes comentan el experimento:

1. El primero cubre el espejo para determinar sus efectos en el termoscopio;
2. El segundo anuncia los resultados del experimento a los otros;
3. Y el tercero enseña como el alcohol sube rápidamente en el tubo.



FIGURA 5. Termómetro de Florencia de la mitad del siglo XVII. El alcohol contenido en la bola inferior se contrae o se expande con la temperatura. Sus variaciones de volumen son tales que un largo tubo de vidrio en espiral con 50 graduaciones es necesario para medirlas. En invierno, bajaba a 7 grados y subía hasta 40 grados en verano.

El gran duque Ferdinand II, sentado delante de la mesa, observa el experimento. Como mecenas, participa frecuentemente en las reuniones de la academia.

Aun, si el termómetro de líquido en tubo cerrado se difundió ampliamente, después de la publicación de las investigaciones de la “Academia del Cimiento” de Florencia en 1666, quedaba el problema de las graduaciones. El número de graduaciones era bastante variable. Los artesanos intentaban reproducir lo que ellos mismos habían hecho: en el mejor de los casos, termómetros construidos por otra

persona indicaban más o menos el mismo resultado. Sin escala aceptada universalmente, era imposible realizar mediciones en lugares diversos con aparatos diferentes para compararlos.



FIGURA 6. Una reunión de la Academia del Cimiento. Pintura de Gaspero Martellini, 1838, Museo Galileo, Florencia, Italia.

Saber a ciencia cierta quién es el inventor del termómetro no es una tarea fácil. Cuatro nombres parecen haber participado en la misma época en su elaboración: Santorio, Galileo, Fludd y Drebbel. ¿Quién fue el primero? es difícil saberlo ya que en esta época los inventores o científicos no siempre publicaban sus trabajos inmediatamente [14].

Inclusive, Isaac Newton (1642 – 1727) propuso, alrededor del año 1700, una escala que iba de la temperatura del hielo a la de una herrería, proponiendo utilizar como cero la temperatura donde el agua empieza a solidificarse, 12 grados como temperatura del cuerpo humano, 24 grados la fusión de la cera, 34 grados la ebullición del agua, 48 grados la fusión de la aleación estaño – bismuto...etc., y 96 grados la fusión del plomo.

Posteriormente, los inventores no dejan de perfeccionar el termómetro a dilatación de líquido, con la elección del mercurio como líquido más adecuado, pero ahora prohibido por su toxicidad y reemplazado por diversos líquidos orgánicos.

Los primeros termómetros a mínimo y máximo son fabricados en la mitad del siglo XVIII, muy similar a los que se usan actualmente en los puestos meteorológicos no automatizados. Uno de los inventores fue el científico británico James Six (1731 – 1793) en 1780 [16]. A final de este mismo siglo, fueron inventados termómetros bimetalicos, que utilizan la deformación de los metales por el calor, y gracias al inventor francés Eugène Bourdon (1808 – 1884), termógrafos, instrumentos de medición compuestos de un cilindro y de un estilo que graba mecánicamente las variaciones de temperatura en un diagrama [17].

Con el progreso de la tecnología y de la adquisición numérica, el instrumento de medición de la temperatura que se usa actualmente en las estaciones automáticas meteorológicas; es la sonda termométrica con resistencia de platino.

III. DE LA SENSACIÓN A LA MEDICIÓN

En los primeros años del siglo XVIII, el físico francés Guillaume Amontons (1663 – 1705) construye un termómetro de aire basado en la medición de una diferencia de presión y no de volumen [18]. Había observado que si se seguía calentando el agua en estado de ebullición, su grado de calor no aumentaba y usó esta referencia como punto fijo. Evidentemente, había que corregir las mediciones con una evaluación simultánea de la presión atmosférica. Este sistema permite a Amontons hacer un descubrimiento mayor. Si la presión del gas aumenta cuando el grado de calor aumenta, al inverso, disminuye cuando el grado de calor disminuye. Al mínimo, esta presión debe ser cero como el grado de calor. Este mínimo extrapolado corresponde, en unidades modernas, a $-239.5\text{ }^{\circ}\text{C}$... ¡Una primera medición del cero absoluto!

Sin embargo, todos estos termómetros eran de un uso delicado que limita considerablemente su difusión. En 1702, el astrónomo danés Ole Römer (1644 – 1710) fabrica otro modelo con alcohol, marcando el agua hirviendo a 60° .

En 1714, en Danzig, el alemán Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736) describe un termómetro que utiliza la dilatación del mercurio con una nueva escala. Esta no tenía valores negativos ya que no se podían lograr en esa época, temperaturas por debajo de cero grados y era bastante precisa por la dilatación casi uniforme del mercurio en ese intervalo de temperaturas. Los puntos fijos de temperatura eran los siguientes:

1. El punto de congelación de una disolución saturada de sal común en agua, que es la temperatura más baja que se podía obtener en un laboratorio, mezclando hielo o nieve y sal.
2. La temperatura normal del cuerpo humano.

Con la fabricación de este termómetro, Fahrenheit consiguió medir la variación de la temperatura de ebullición del agua en condiciones de presión del ambiente y comprobó que el punto de ebullición es una característica propia para cada sustancia líquida. Utilizó una mezcla de cloruro de amonio con hielo y aunque la temperatura de la mejor proporción de hielo y sal es alrededor de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, Fahrenheit, finalmente, ajustó la escala para que el punto de congelación del agua fuera de $32\text{ }^{\circ}\text{F}$ y la temperatura de ebullición del agua de $212\text{ }^{\circ}\text{F}$.

El francés René Antoine Ferchault de Réaumur (1683 – 1757), en 1730, se interesa en la medición de la temperatura y fabrica un termómetro que utiliza una mezcla de agua y alcohol (llamado en francés en esta época, “esprit de vin”) en la cual el grado de alcohol está fijado con el fin de asegurar la reproducibilidad del instrumento. Lo gradúa escogiendo dos referencias (el hielo en fusión y el agua hirviendo) y divide este intervalo en 80 grados. Esta escala fue llamada “escala de Réaumur” y estuvo vigente hasta 1794. Como lo menciona Jaime Wisniak, el título de la primera publicación

de Réaumur en este tema se llama “Reglas para construir termómetros que dan lecturas comparables”, y refleja una de las principales dificultades de esa construcción [19, 20, 21].

Luego que el físico neerlandés Cristian Huygens (1629 – 1695) en 1665 diera origen al sistema centesimal y ya que en Suecia interesaba más medir el grado de frío que el de calor, se le asignó el 100 al punto de fusión del hielo y el 0 al del vapor del agua en la ebullición. Por esta razón, en 1741, el físico sueco Anders Celsius (1701 – 1744) retoma la escala de Réaumur pero la divide en 100 intervalos en lugar de 80. En esta época marcaba 100° para el punto de congelación del agua y 0° para el punto de ebullición, es decir en el sentido opuesto al actual. Es en 1743, después de la muerte de Celsius que el físico y matemático francés Jean Pierre Christin (1683 – 1755) propone invertir la escala de las temperaturas. Presenta a la Academia de Lyon un modelo que utiliza mercurio y que marca 0° para el punto de fusión del hielo y 100° para el punto de ebullición del agua. Dos años más tarde, Carl von Linneo (1707 – 1778) presenta la misma propuesta a la Academia sueca. La escala Celsius, se llamó centígrada en contraposición a la mayoría de las demás graduaciones, que eran de 60 grados según la tradición astronómica. El uso de esta escala se generalizó, utilizándose internacionalmente para todos los trabajos científicos.

Esta convención era bastante difundida en Francia y en 1794, en el momento de la adopción del sistema métrico por la Convención, es la escala Celsius que es adoptada como escala oficial: “el grado termométrico será la centésima parte de la distancia entre el final del hielo y del agua hirviendo”. Este sistema fue adoptado por la mayoría de los países a excepción de los Estados Unidos que siguen utilizando la escala Fahrenheit. El nombre de grado Celsius fue escogido por la IX^a Conferencia Internacional de Pesas y Medidas en octubre 1948.

En el siglo XVII, todavía la aplicación clínica del termómetro no se había generalizado, ya que la medición exacta de la fiebre no parecía tener demasiada relevancia en la práctica médica. Su uso fue popularizado por el médico neerlandés Hermann Boerhaave (1668 – 1738) quien con Fahrenheit hizo construir termómetros de alcohol y mercurio. Este médico y sus estudiantes: Gerard Van Swieten (1700 – 1772), fundador de la escuela vienesa de medicina, Antón de Haen (1704 – 1776) y George Martine (1700 – 1772) fueron quienes incorporaron el termómetro al examen clínico [22].

Pero quedaba el problema del tamaño de estos instrumentos y el tiempo de medición de la temperatura. En 1866, el médico inglés Thomas Clifford Allbutt (1836 – 1925) diseña un termómetro clínico portable de 15 cm que necesitaba solamente de 5 minutos para tomar la temperatura [23]. El médico alemán Karl Wunderlich (1815 – 1877) publica en 1868 un reporte de más de un millón de registros de temperatura; de más de 25 000 pacientes; realizados con un termómetro colocado debajo de la axila y establece por la primera vez un rango de temperaturas normales de entre 36.3 y $37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24]. Años más tarde, en 1884, el físico meteorólogo escocés, John Aitken (1839 – 1919), construye un instrumento de mercurio con un tubo más delgado encima

de un reservorio en forma de bulbo, para asegurar que no baje el nivel del mercurio después de la lectura [25]. A partir de ese momento la toma de la temperatura se transformó rápidamente en una práctica de rutina.

IV. HACIA UNA ESCALA UNIVERSAL

¿Qué significa para un físico, esta frase muy sencilla “Está caliente”?

Cuando se proporciona calor a la materia, o su temperatura aumenta, o ésta materia cambia de estado físico sin modificación de temperatura. El médico y químico escocés Joseph Black (1728 – 1799) fue el primero en hacer la diferencia entre los conceptos de calor y temperatura. Comentaba que varias sustancias conocidas registraban diferentes temperaturas cuando se les aplicaba la misma cantidad de calor. Había observado que elevar en un grado Celsius, la temperatura de un gramo de hierro, requería tres veces más calor que el calentar en la misma proporción un gramo de plomo. Fue al origen de la definición del calor específico y el calor latente [26, 27].

De manera extraña, para definir la temperatura de manera satisfactoria hay que interesarse muy de cerca a la estructura de la materia. Cualquier materia, sea sólida, líquida o gaseosa, está compuesta de átomos, o de moléculas que son ensambles de átomos. Estos átomos que componen la materia no son inmóviles, sino animados de un movimiento incesante llamado agitación térmica.

En un gas, la agitación térmica es grande, las moléculas se mueven rápidamente en todas las direcciones de una manera totalmente desordenada. En un líquido, la agitación de las moléculas es menor, empiezan a aparecer enlaces entre moléculas. En un sólido, las moléculas se quedan unidas las unas a las otras. No pueden cambiar de posición. Cada molécula tiene una posición promedio fija y solamente pueden vibrar alrededor de esta posición.

Los físicos, y en particular el austriaco Ludwig Boltzmann (1844 – 1906) han podido dar una definición satisfactoria de la temperatura de un cuerpo, como la energía cinética promedio de las moléculas o de los átomos que lo componen. Cuando se aumenta la temperatura, las moléculas o los átomos se mueven más rápidamente [28]. Esta definición permite entender por qué existe una temperatura límite por debajo de la cual es imposible bajar.

La escala Kelvin o absoluta, propuesta en 1848, se debe al trabajo intenso del físico y matemático escocés William Thomson, Lord Kelvin (1824 – 1907), quien realizó múltiples contribuciones al estudio del calor. En un artículo titulado “On an absolute thermometric scale” decía: “La teoría de la termometría está sin embargo lejos de ser satisfactoria. El principio que hay que seguir en la construcción de una escala termométrica puede parecer a primera vista evidente, ya que un termómetro perfecto, debería de indicar una misma elevación de temperatura, a una misma aportación de calor, estimada por las divisiones de la escala. Sin embargo, es ahora reconocido (por las variaciones en los cambios de calor específico de los cuerpos) como hecho experimentalmente demostrado; que la

termometría en estas condiciones es imposible, y que nos encontramos sin ningún principio en el cual construir una escala termométrica absoluta” [29].

Para llegar a esta escala absoluta, Thomson se va a apoyar en los trabajos del ingeniero y físico francés Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832) sobre el rendimiento de las máquinas de vapor [30]. La importancia de la escala propuesta por Thomson es que tiene un significado físico propio, pues no depende del comportamiento de un fluido en un tubo, ni de puntos fijos arbitrarios, sino de la visión de la temperatura como expresión de la cinética molecular y, para obtener el valor cero, extrapoló la temperatura a la cual teóricamente cesa el movimiento molecular. En esta escala, un Kelvin es igual a un grado Celsius.

Nos parece interesante citar al físico luxemburgués y francés Gabriel Lippmann (1845 - 1921) sobre la determinación de las temperaturas absolutas [31, 32]:

“Se sabe que los termómetros empleados frecuentemente se basan en la dilatación de una sustancia escogida adecuadamente, como el aire o el mercurio; se sabe también que las escalas construidas de esta manera varían con la naturaleza de la sustancia utilizada: así, el aire, el hidrógeno, el mercurio y el alcohol proporcionan cuatro escalas centígradas que no son idénticas.

Si se tomaría como fenómeno termométrico, una variación de presión, una tensión de disociación, una fuerza termo-eléctrica en lugar de la dilatación, se obtendrían nuevas escalas, tanto con la naturaleza del fenómeno como la naturaleza de las sustancias utilizadas.

Por tanto, se puede imaginar una infinidad de escalas termométricas todas diferentes: una misma temperatura se encuentra representada por números que no son idénticos, ni proporcionales entre sí.

Esta carencia de proporcionalidad se debe a que estos números no miden temperaturas: sirven solamente a designarlas, a señalarlas.

De hecho, ni las temperaturas ni los intervalos de temperaturas son magnitudes medibles en el sentido propio del término. Medir una temperatura, es encontrar su relación con una magnitud de la misma especie tomada como unidad. Podemos ver que sólo las magnitudes físicas susceptibles de medición son las que pueden hacer múltiplos: hay que poder tomar n ejemplares de la unidad escogida y poder sumarlas. Así se construye una regla dividida, una caja de pesas, una serie graduada de resistencias eléctricas. Pero no se sabe de la misma manera añadir un intervalo de temperatura a sí mismo.

Por tanto, parece a primera vista que cualquier escala termométrica debe de depender de las propiedades de una sustancia particular, que sirvió para construirla. [...] Sin embargo, tenemos gracias a Sadi Carnot, una escala termométrica llamada absoluta, que debe su nombre a que es independiente de la elección de la sustancia termométrica que sirvió a construirla. Esta escala absoluta se basa en la medición

del trabajo mecánico proporcionado por las máquinas térmicas. [...]

El trabajo de Sadi Carnot es de 1824; Sir W. Thomson propuso, en 1848, basarse en el principio de Carnot para definir la escala absoluta como lo acabamos de hacer, y modificó varias veces la forma de esta definición. Sin hacer todo el histórico de estas variantes, vamos nuevamente a definir la temperatura absoluta en una forma equivalente a la anterior, pero más práctica para algunas aplicaciones. [...]

En este sistema, el intervalo de dos temperaturas dadas está representado no por una diferencia, sino por un cociente, *el cociente de las cantidades de calor invertidas por una máquina térmica perfecta, funcionando en este intervalo de temperatura.* [...]

Se puede notar que esta definición no implica ni la hipótesis de un cero absoluto, ni la ficción de los gases ideales. [...]

Hemos dicho que cada intervalo de temperatura era representado en el sistema absoluto por el cociente de dos números, no por su diferencia. Igual que en acústica, cada intervalo musical se mide con un cociente. Los dos términos de este cociente son cantidades de calor, a saber, las cantidades de calor involucradas en una máquina térmica reversible que funciona entre las temperaturas, cuyo intervalo se quiere medir. Supongamos, para fijar las ideas, que una máquina térmica, funcionando entre dos temperaturas particulares, tome a la fuente caliente q calorías y restituya a la fuente fría q' calorías, y que se tiene $q/q' = 4/5$.

En este caso, el intervalo de temperatura en el cual la máquina funcionó tiene como valor $4/5$. Cual sea la naturaleza de la máquina térmica reversible empleada o la elección de la sustancia que se utiliza, todas las máquinas térmicas reversibles presentaran un cociente q/q' igual a $4/5$. Es por esta razón que se puede decir que el cociente $4/5$ proporciona una medida absoluta del intervalo de temperatura considerado absoluta, en el sentido que no es relativa a una sustancia termométrica particular.

Si se considera de la misma manera una serie de otros intervalos de temperatura, podrán ser medidos por una serie de números análogos a los números 4 y 5 que acabamos de mencionar; el conjunto de estos números forma la escala de las temperaturas absolutas. [...]"

En su artículo "Dynamical theory of heat" [33], Thomson discute sobre los cien grados de separación entre los puntos de congelación y de ebullición del agua. Estos dos puntos son considerados como dos puntos fijos sobre una escala absoluta; pero ¿cómo determinar la temperatura absoluta de estos dos puntos? La respuesta dada por Thomson fue "*La determinación de la temperatura absoluta de los puntos fijos, se tiene que hacer por medio de observaciones que determinan el rendimiento de una máquina perfecta*

termodinámica, con la mayor y la menor como temperaturas de la fuente caliente y fría, respectivamente."

El artículo sigue con el punto fijo de referencia de 273.7. Valor corregido posteriormente por la Xª Conferencia Internacional de Pesas y Medidas, en 1954, como el valor del punto triple del agua (punto en el cual coexisten los tres estados: líquido, sólido y gas), 273.16 K.

La XIIIª Conferencia Internacional de Pesas y Medidas, en 1967, adopta el nombre *kelvin*, de símbolo K, en lugar de *grado Kelvin* y define la unidad de temperatura como: "*El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción $1/273.16$ de la temperatura termodinámica del punto triple del agua*" [34].

De la manera en que se definen habitualmente las escalas de temperaturas, se acostumbra en expresar la temperatura termodinámica, de símbolo T , en función de su diferencia con la temperatura de referencia $T_0 = 273.15$ K, el punto de congelación del agua. Esta diferencia de temperatura es llamada temperatura Celsius, de símbolo t , cuya unidad el grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y está definida por la ecuación (1):

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15. \quad (1)$$

Por esta razón, este valor se denomina cero absoluto. Cualquier cuerpo tiene una temperatura igual o mayor que el cero absoluto y por lo tanto puede emitir energía térmica o calor.

V. LA VARIABILIDAD DE LA TEMPERATURA

El paso de la sensación subjetiva de lo caliente y de lo frío a la medición objetiva de la temperatura; con instrumentos fiables y una escala universal, llevó a un gran número de observaciones que no eran evidentes: la temperatura de un sótano no es más elevada en verano que en invierno, el hierro no es "más frío" que la madera, etc. Todos estos descubrimientos son bastante recientes.

En la Antigüedad, los fenómenos atmosféricos eran frecuentemente considerados como la expresión del humor de los dioses. Sin embargo, los griegos empezaron a sacar los grandes principios que gobernaban estas manifestaciones. Cinco siglos antes de nuestra era, existían informaciones meteorológicas para los navegadores por parte de los servicios oficiales griegos [35].

A. Variaciones diurnas y nocturnas de la temperatura

Si un planeta no tiene atmósfera, toda la luz del sol llega en su superficie y habitualmente 90% o más es absorbida y 10% o menos se refleja de regreso hacia el espacio. Sin embargo, si el planeta posee una atmósfera, en particular bastante espesa y con nubes, parte de la luz solar será reflejada al espacio antes de llegar al suelo. El porcentaje de luz reflejado por un planeta se llama el albedo y cuando se

sustraer este valor del 100%, se puede saber cuánta energía está absorbida para calentar el planeta.

Por ejemplo, la Tierra y la Luna se encuentran a la misma distancia del Sol y reciben la misma cantidad de luz solar pero la Luna que no tiene atmósfera absorbe 90% de ella y la Tierra, por su atmósfera, absorbe solamente 70% de la luz que recibe.

Los valores de temperatura varían ya que dependen de la topografía local. Por ejemplo, en la Luna las montañas son más claras y reflejan más luz mientras que los mares son más oscuros y reflejan menos luz. Pero, en promedio, por estas diferencias de absorción, la Tierra recibe los dos tercios de luz solar que recibe la Luna, y la Luna se vuelve más caliente, llegando a temperaturas de más de 120 °C.

Pero las nubes no son el único factor que determina la temperatura de un planeta. En los años setenta, se pensaba que Venus y la Tierra tenían temperaturas no tan diferentes ya que el albedo de Venus es del 65% y se encuentra a una distancia del Sol del orden del 70% de la distancia Sol-Tierra. En la realidad, Venus tiene temperaturas de 800 grados mayores que las de la Tierra. Hay algo más.

Durante el día, la luz solar llega a la superficie de un planeta, calentándola. Ya que la superficie se vuelve más caliente, emite radiación infrarroja hacia la atmósfera y el espacio, hasta llegar a un equilibrio térmico: lo que está radiado es igual a lo que es absorbido. Pero, cuando se acuesta el Sol, la luz solar no llega pero sigue radiando calor hacia el espacio por el calor acumulado durante el día: lo que se llama, enfriamiento radiativo.

En la Tierra y en los planetas que tienen atmósfera, los gases a efecto invernadero pueden absorber parte de la radiación infrarroja que viene de la superficie. Es en particular el caso de las moléculas poli atómicas como el vapor de agua y el dióxido de carbono que hacen que parte de la radiación infrarroja no se escape [36, 37, 38].

La temperatura del aire varía principalmente con la exposición al sol. En un lindo día de verano, la temperatura alcanza su máximo a las 15 h solar. Después decrece, al principio rápidamente y luego más lentamente. Es mínima poco después de la salida del sol. Por tiempo cubierto, el ciclo es el mismo pero la amplitud (diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima) es menor.

En Francia metropolitana, por ejemplo, los vientos del sur llevan aire caliente y los vientos del norte aire frío, una variación importante de la dirección del viento puede perturbar este ciclo día-noche. Es frecuente este fenómeno en invierno.

Para caracterizar la temperatura del aire, los boletines meteorológicos anuncian siempre la temperatura máxima y la temperatura mínima.

B. Temperatura en altura

Desde que los primeros termómetros fueron inventados, los físicos los utilizaron para medir la temperatura de la atmósfera. La observación de la atmósfera antes del establecimiento de una red de observación meteorológica en

el siglo XIX fue el objeto de diversos episodios efímeros, bajo los auspicios de sociedades de sabios.

Fue el caso en Francia entre 1776 y 1792, donde la Sociedad Real de Medicina de París organiza una red de más de doscientos médicos, para medir la temperatura cotidiana, con reglas para efectuar las observaciones. El clima de Francia fue por lo tanto mejor conocido gracias a médicos [38]. La motivación de los médicos era muy fuerte ya que habían entendido dos principios fundamentales:

1. La noción de continuidad en los eventos meteorológicos, independientemente del calendario ficticio;
2. Conocer el clima de su región y sus fluctuaciones;

ya que la teoría de los climas (en francés “*théorie aériste*”) fue dominante en Francia en este periodo [39].

La temperatura del aire disminuye con la altura: en promedio 6.5 °C cada 1000 m. Pero esa tasa de decrecimiento puede ser más o menos pronunciada; sucede también que el aire se recalienta con la altura en un cierto espesor: es una «inversión de temperatura». Tiene numerosas consecuencias en la forma de las nubes, la presencia de neblina, la disipación del humo y de la contaminación atmosférica... Globos equipados de sonda permiten conocer el perfil de temperaturas en altura.

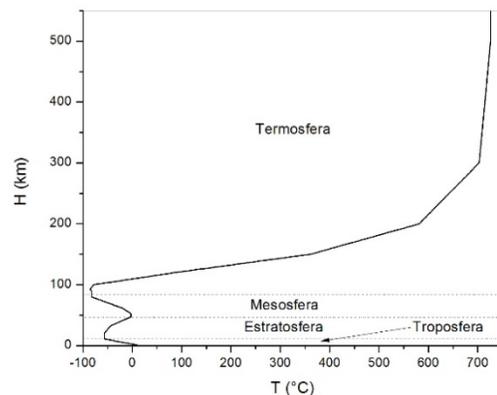


FIGURA 7. Variación de la temperatura en función de la altitud en la atmósfera terrestre.

El enfriamiento con la altura se entiende si se admiten dos resultados:

1. La presión disminuye cuando se sube, ya que depende de la columna de aire que se tiene encima;
2. Un gas se enfría cuando baja su presión P , a volumen V constante, uno sabe que $PV = nRT$, donde n es la cantidad de materia (en moles), R la constante de los gases ideales y T la temperatura.

Sin embargo, este proceso es dinámico y este modelo simplista, da un buen orden de magnitud en la atmósfera baja. Cuando uno se eleva suficientemente alto, el enfriamiento se detiene y las capas externas de la atmósfera pueden estar bastante calientes, del orden de 400 °C hacia 200 km de altura, donde el calentamiento solar se hace más sentir como se puede observar en la Fig. 7.

La temperatura más alta medida en el mundo fue de 57.8 °C en El Azizia (Libia) el 13 de septiembre 1922 y la más baja de -89.2 °C fue medida en Vostok (Siberia) el 21 de julio 1983. El valor promedio en la Tierra es de 15 °C.

C. Temperatura en el suelo

Los meteorólogos miden también las temperaturas en el suelo y a diversas alturas arriba del suelo. Ya que el suelo capta la radiación del sol en el día y emite radiación hacia el espacio en la noche, es generalmente a nivel del suelo que se encuentran las temperaturas más altas de día, y las más bajas la noche.

Ya que la tierra es perfectamente aislada de la atmósfera, en el suelo la temperatura ya no cambia. Las bodegas más profundas aparecen frescas en verano y calientes en invierno. Su temperatura esta cercana a la temperatura promedio anual del lugar. En los países productores de vino, estas bodegas sirven a su almacenamiento y conservación.

Para liberarse del efecto del suelo y poder comparar las medidas entre sí, la medición de la temperatura del aire se efectúa a 1.5 m de altura. El termómetro (o la sonda en el caso de un instrumento electrónico) debe de estar colocado en un refugio que lo protege de la radiación directa del sol y del cielo. El refugio tiene que ser calado para dejar una circulación de aire. El suelo de concreto (que almacena el calor durante el día) es prohibido.

D. La sensación térmica

Cada uno sabe que la sensación de frío es mayor por viento fuerte que por tiempo tranquilo. Es el enfriamiento eólico. Se debe a dos factores. El viento barre constantemente la pequeña capa de aire caliente aislante en contacto con la piel, provocando una sensación de frío. Además, provoca la evaporación de la humedad de la piel aumentando todavía más ésta pérdida de calor. La sensación térmica es una temperatura ficticia. Se debe a una fórmula matemática empírica, función de la temperatura del aire y de la velocidad del viento, establecida a partir de ensayos clínicos [40].

Así, esta magnitud meteorológica puede transformar en un frío espectacular un - 10 °C en un - 18 °C cuando el viento sopla a 20 km/h, o en verano, una fuerte humedad transforma un banal 30 °C en un agobiador 45 °C como lo pueden sentir los que viajan a los trópicos.

La temperatura del aire medida por los termómetros, es solamente uno de los parámetros que determinan nuestra sensación de calor. Desde luego, mientras los termómetros están en equilibrio con el aire ambiente, nuestro cuerpo

mantiene una temperatura interna cercana a los 37 °C. Por tanto, nuestra sensación de calor depende del detalle de los intercambios de calor entre nuestro cuerpo y la atmósfera. Estos intercambios se ven afectados por factores meteorológicos como son la velocidad del viento, el grado de humedad, la radiación solar, el calor emitido por el suelo, etc. y fisiológicos como la conductancia térmica del cuerpo, que depende del porcentaje de tejido adiposo, del tipo de actividad... Así, en época de frío, un viento fuerte lleva rápidamente el calor emitido por el cuerpo, lo que incrementa la sensación de frío.

En los noventas, los biometeorólogos afinaron los métodos de simulación de la fisiología humana, en particular la del rostro, la parte más expuesta al frío. Para cada valor de la temperatura del aire y de velocidad del viento, la simulación da la cantidad de calor perdida por el cuerpo virtual y para cada par de valores, se define una temperatura de sensación térmica como la que llevará a la misma pérdida de calor sin viento. Pero esto es solamente una aproximación ya que la fisiología en particular cambia con la edad, la corpulencia o el sexo [41, 42].

E. Temperatura del cuerpo humano

La temperatura del cuerpo humano es una variable compleja, no lineal sujeta a variaciones internas y externas. La temperatura normal del cuerpo humano (llamada normotermia o eutermia) depende del lugar donde se toma la medición, del momento en el día, nivel de actividad de la persona. Esto significa que la temperatura está sujeta a las circunstancias de su toma. Diferentes partes del cuerpo tienen diferentes temperaturas. La temperatura promedio generalmente aceptada es de 37 °C. Pero se han medido en el adulto una gran variedad de rangos: de 33.2 a 38.2 en toma oral, de 34.4 a 37.8 en toma rectal, de 35.4 a 37.8 en la cavidad del tímpano y de 35.5 a 37 °C en la axila [43].

Esta temperatura de 37 °C tiene su origen en dos investigaciones aparentemente independientes en el siglo XIX, por una parte, el físico Antoine-César Becquerel (1788 – 1878) y el médico Gilbert Breschet (1784 – 1845) y por otra parte, treinta y tres años más tarde por Wunderlich [44, 45, 46].

La temperatura corporal de un individuo presenta valores más bajos en la segunda mitad del ciclo del sueño al cual se le denomina “nadir” y es uno de los marcadores primarios del ritmo circadiano. La temperatura corporal puede cambiar cuando la persona tiene hambre, sueño o frío. Depende de cada momento del día, siendo controlada por el ritmo circadiano de cada persona, baja alrededor de las 2 a. m. y sube por las tardes entre 4 y 7 p. m. (Fig. 8). Es sensible también a varias hormonas. Por ejemplo, en la mujer, la temperatura varía con el ciclo menstrual llamado ciclo circamensual. Se eleva repentinamente después de la ovulación, cuando disminuyen los estrógenos y aumenta la progesterona. Los anticonceptivos hormonales suprimen el ritmo circadiano y disminuyen la temperatura corporal de aproximadamente unos ~0.6 °C.

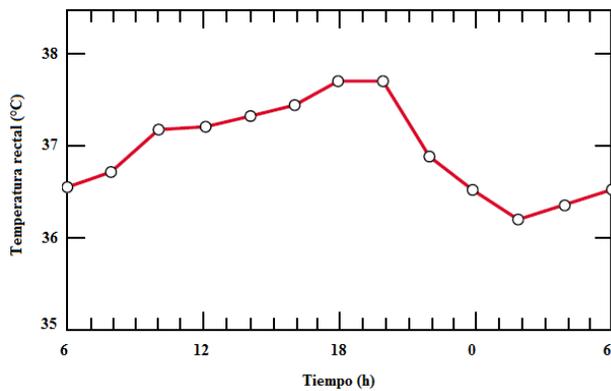


FIGURA 8. Variaciones promedio de la temperatura rectal de un humano sobre un periodo de 24 horas. Adaptada de [47].

Factores psicológicos influyen también en la temperatura corporal: una persona muy excitada tiene frecuentemente una temperatura elevada. Perturbaciones del sueño pueden también afectarla.

La temperatura de los tejidos profundos del cuerpo es muy constante y varía menos de un grado centígrado (~ 0.6 °C), excepto cuando una persona tiene fiebre. Aun si una persona desnuda se queda expuesta a temperaturas externas de entre 13 a 55 °C, en aire seco, mantiene una temperatura corporal constante, lo que significa que el cuerpo humano tiene una notable capacidad a regular su temperatura corporal [48].

Sabemos que los mecanismos de transferencia de calor son la radiación, la conducción y la convección. Pero para los humanos hay que añadir la transpiración que es un fenómeno de evaporación.

En el caso del cuerpo humano, el proceso de regulación no es solamente la suma de estos diferentes mecanismos pasivos de transferencia, sino que el cuerpo juega un papel activo en la regulación de la temperatura ya que existe un mecanismo de retroacción neuronal a través del hipotálamo [48].

El hipotálamo contiene no sólo los mecanismos de control, sino también los sensores de temperatura clave. Bajo el control de estos mecanismos, la sudoración comienza casi exactamente a una temperatura cutánea de 37 °C y aumenta rápidamente a medida que la temperatura de la piel pasa por encima de este valor. La producción de calor del cuerpo en estas condiciones permanece casi constante cuando se eleva la temperatura de la piel.

Si la temperatura de la piel cae por debajo de 37 °C una variedad de respuestas fisiológicas empiezan para conservar el calor en el cuerpo y aumentar la producción de calor. Se trata de

1. Vasoconstricción para disminuir el flujo de calor hacia la piel;
2. Temblor para aumentar la producción de calor en los músculos;

3. Secreción de ciertas hormonas para aumentar el metabolismo y la producción de calor;
4. Erección de los pelos para atrapar una capa de aire y aumentar el aislamiento con el medio externo.

El umbral de 37 °C puede ser alterado en circunstancias especiales como fiebre o hibernación [48].

VI. CONCLUSIONES

La temperatura se define como la magnitud física que permite medir el grado de calor. Esta noción es bastante intuitiva ya que se refiere a nuestras sensaciones de caliente y frío. Sin embargo, el concepto físico llegó muy tarde ya que nuestros sentidos mezclan los efectos de la temperatura y los de la transferencia de calor.

Por mucho tiempo estos dos conceptos fueron confundidos y es solamente cuando aparece la termodinámica como disciplina en sí, que se pudo definir más claramente la temperatura.

La medición precisa y reproducible de la temperatura con instrumentos adecuados tomó muchísimos años. Este objetivo fue el resultado de las necesidades de los físicos y médicos. Los primeros para poder medir una de las unidades importantes de la física, los segundos cuando entendieron que la fiebre era la consecuencia de una enfermedad.

La aplicación del termómetro para medir temperaturas tanto atmosféricas como corporales; ha sido estudiada y cada vez mejorada, para dar respuestas a innumerables inquietudes de científicos en diversos lugares del planeta.

Hoy, gracias a esos descubrimientos podemos realizar mediciones de temperatura en diferentes puntos de la tierra, del cuerpo humano y de otros planetas, fuera o no de nuestro sistema solar. Así como saber la temperatura de solidificación o de ebullición, no solamente del agua sino de todos los cuerpos químicos.

Es gracias a muchos científicos, de todas las disciplinas, a lo largo de muchos siglos, que han logrado, lo que hoy día podemos tan fácilmente obtener: la toma de la temperatura, esencial en la medicina y en la meteorología.

REFERENCIAS

- [1] Bacon, F., *Novum Organum*, Thomas Fowler [editor], (McMillan and Co., Clarendon Press, Oxford, 1878).
- [2] Hippocrate, *Œuvres complètes*, T. 7 [Trad. E. Littré], (Baillièrre, J. B., Paris, 1839-1861).
- [3] Otsuka, K. and Togawa T., *Hippocratic thermography*, *Physiol. Meas.* **18**, 227 (1997).
- [4] Daremberg, C., *Œuvres anatomiques, physiologiques et médicales de Galien*, T. 1, (Baillièrre, J. B., Paris, 1854).
- [5] Romero y Huesca, A., Ramírez Bollas, J., López Schietekat, R., Cuevas Velasco, G., De la Orta Rementeria, J. F., Trejo Guzmán, L. F., Vorhauer Ramírez, S. and García Navarrete, S. I., *Galeno de Pérgamo: Pionero en la historia de la ciencia que introduce los fundamentos científicos de la medicina*, *An. Med. [Mex]* **56**, 218 (2011).

- [6] Boudon-Millot, V., *Galien de Pergame, médecin des corps et médecin des âmes*, Sciences-Croisées **7-8**, 1 (2011).
- [7] Velasco Maillo, S., and Fernández Pineda, C., *Un paseo por la historia de la termometría*, Rev. Esp. Fis. **Julio-Septiembre**, 46-56 (2005), <<http://www.rsef.org>>, <http://gtfe.usal.es/pdfs/ensenanza/santi_rsef_termometria_05.pdf>, consultado el 1 de febrero de 2017.
- [8] Beaurepaire, M., *Le médecin italien Sanctorius invente le thermomètre à air*, La Météorologie **8**, 71-77 (avril, 1995).
- [9] Massain, R., *Physique et physiciens*, (Magnard, Paris, 1979).
- [10] Viviani, V., *Racconto istorico della vita del Sig.r Galileo Galilei*, (1718), <<http://www.intratext.com/ixt/ITA1686/>>, consultado el 1 de febrero de 2017.
- [11] Mydorge, C., *Examen du livre des récréations mathématiques et de ses problèmes en géométrie, mécanique, optique & catoptrique, où sont aussi discutées et restablies plusieurs expériences physiques y proposées*, (Antoine Robinet, Paris, 1630).
- [12] Lagrange, E., *Ole Römer et le thermomètre Fahrenheit I*, Ciel et Terre **30**, 560 (1909).
- [13] Lagrange, E., *Ole Römer et le thermomètre Fahrenheit 2*, Ciel et Terre **30**, 573 (1909).
- [14] Sherwood Taylor, F., *The origin of the thermometer*, Ann. Sci. **5**, 129 (1942).
- [15] Benedict, R. P., *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, (John Wiley & Sons, New York, 1984).
- [16] Austin, J. F. and McConnell, A., *James Six F.R.S. Two Hundred Years of the Six's Self-Registering Thermometer*, Notes and Records of the Royal Society of London **35**, 49 (1980), <http://www.jstor.org/stable/531601?seq=1#page_scan_tab_contents>, consultado el 1 de febrero de 2017.
- [17] Tissandier, G., *Eugène Bourdon*, La Nature **593**, 19 (1884).
- [18] Wisniak, J., *Guillaume Amontons*, Revista CENIC, Ciencias Químicas **36**, 187 (2005).
- [19] Wisniak, J., *René Antoine Ferchault de Réaumur. Desde las abejas hasta los grados*, Revista CENIC, Ciencias Químicas **32**, 105 (2001).
- [20] Réaumur, R. A., *Règles pour construire des thermomètres dont les degrés soient comparables*, Histoire de l'Académie Royale des Sciences, (l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1730), <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k3591k/f646.image.r>>, consultado el 1 de febrero de 2017.
- [21] Birembaut, A., *La contribution de Réaumur à la thermométrie*, Revue d'histoire des sciences et de leurs applications **11**, 302 (1958), <http://www.persee.fr/doc/rhs_0048-7996_1958_num_11_4_3668>, consultado el 1 de febrero de 2017.
- [22] Vázquez, F. J., *Fiebre: aspectos históricos desde la percepción subjetiva e interpretación de sus causas hasta el desarrollo del termómetro*, Rev. Hosp. Ital. B. Aires **26**, 152 (2006).
- [23] Allbutt, T. C., *Medical thermometry*, Brit. Med. Chir. Rev. **45**, 429 (1870).
- [24] Wunderlich, K. R. A., *Das Verhalten der Eigenwärme in Krankheiten*, (Wigand, O., Leipzig, 1868).
- [25] Aitken, J., *4. Thermometer screens*, Proc. Royal Soc. Edinburgh **12**, 661 (1884).
- [26] Guerlac, H., *Joseph Black and Fixed Air. Part I*, Isis **48**, 124 (1957).
- [27] Guerlac, H., *Joseph Black and Fixed Air. Part II*, Isis **48**, 433 (1957).
- [28] Garcia-Colin Scherer, L., Goldstein, P., Del Rio, J. L., *Ludwig Boltzmann. A cien años de su muerte*, (El Colegio Nacional, México, 2007).
- [29] Thomson, W. [Lord Kelvin], *On an absolute thermometric scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's Observations*, Mathematical and Physical Papers **1**, (Cambridge University Press, Cambridge, 1882).
- [30] Sadi Carnot, N. L., *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, (Ed. Bachelier, Paris, 1824).
- [31] Lippmann, G. J., *Définition physique et détermination des températures absolues*, J. Phys. Théor. Appl. **3**, 53 (1884), <<http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:01884003005300>>, consultado el 2 de febrero de 2017.
- [32] Lippmann, G. J., *Sur l'expression analytique de la température absolue et de la fonction de Carnot*, J. Phys. Théor. Appl. **3**, 277 (1884), <<http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:018840030027700>>, consultado el 2 de febrero de 2017.
- [33] Thomson, W. [Lord Kelvin], *On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam By Lord Kelvin (William Thomson)*, Trans. Roy. Soc. Edinburgh, (March, 1851), & Philosophical Magazine **4**, (1852), from Mathematical and Physical Papers **1**, (Cambridge University Press, Cambridge, 1882), <http://zapatopi.net/kelvin/papers/on_the_dynamical_theory_of_heat.html>, <<https://archive.org/details/mathematicaland01kelvgoog>>, consultado el 2 de febrero de 2017.
- [34] Procès-verbal de la XIII Conférence Internationale des Poids et mesures 1967, <<http://www.bipm.org/utls/common/pdf/CIPM-PV-OCR/CIPM1967.pdf>>, consultado el 2 de febrero de 2017.
- [35] Eggenberger, J., *L'épopée du thermomètre*, L'irrégulier **5**, 14 (2003).
- [36] Arrhenius, S., *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*, Phil. Mag. **41**, 237 (1896).
- [37] Lindzen, R. S., *Can increasing atmospheric CO₂ affect global climate?*, Proc. Nat. Acad. Sci. **94**, 8335 (1997).
- [38] Goody, R. M. and Yung, Y. L., *Atmospheric radiation: Theoretical Basis* (Oxford University Press, New York, 1989).
- [39] Beaurepaire, M., *L'observation thermique de l'atmosphère en France et dans les pays proches au dix-septième et dix-huitième siècles : L'invention du*

Michel Picquart, Izayana Carrasco Morales

thermomètre. Le traitement des données anciennes, Thèse de l'Université Paris Sorbonne – (Sorbone, Paris IV, Francia, 1994), <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00962194>>, consultado el 2 de febrero de 2017.

[40] Hamdi, M., Lachiver, G. and Michaud, F., *A new predictive thermal sensation index of human response*, *Energy and Buildings* **29**, 167 (1999).

[41] McGregor, G. R., *Human biometeorology*, *Prog. Phys. Geo.* **36**, 93 (2011).

[42] Parent, T., *Etude du confort ressenti dans espaces intérieurs et extérieurs*, Proyecto terminal INSA, Stuttgart (2012), <http://eprints2.insa-strasbourg.fr/1239/2/Annexes_PFE_PARENT_Thiebaut.pdf>, consultado el 2 de febrero de 2017.

[43] Elert, G., *Temperature of a healthy human (body temperature)*, *The Physics Factbook* (2005), <<http://hypertextbook.com/facts/LenaWong.shtml>>, consultado el 2 de febrero de 2017.

[44] Becquerel, C. A. & Breschet, G., *Recherches expérimentales physico-physiologiques sur la température des tissus et des liquides animaux*, *Comptes-Rendus Acad.*

Sci. [Paris] **3**, 771 (1836), <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2962t.r=>>>, consultado el 2 de febrero de 2017.

[45] Breschet, G. & Becquerel, C. A., *Recherches sur la chaleur animale, au moyen des appareils thermo-électriques*, *Comptes-Rendus Acad. Sci.* [Paris] **6**, 429 (1838), <<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2965r/f430.image.r=>>>, consultado el 3 de febrero de 2017.

[46] Kelly, G., *Body temperature variability (part 1): a review of the history of body temperature and its variability due to site selection, biological rhythms, fitness, and aging*, *Alt. Med. Rev.* **11**, 278 (2006).

[47] Porth, C. M., Gaspard, K. J., *Temperature regulation and fever in Essentials of Pathophysiology*, Chap. 9 (Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2003).

[48] Guyton, A. C., *Body temperature, temperature regulation and fever in Basic Human Physiology: Normal Function and Mechanisms of Disease*, (W. B. Saunders Co., Philadelphia, 1971), p. 889.