

Perspectivas didácticas de una aproximación histórica a la medición y concepto de Temperatura



Justo R. Pérez

Departamento de Física Fundamental y Experimental Electrónica y Sistemas, Facultad de Física, Avenida Astrofísico Francisco Sánchez, 38205 La Laguna, Tenerife, España.

E-mail: juperez@ull.es

(Recibido el 10 de Junio de 2013, aceptado el 25 de Septiembre de 2013)

Resumen

En el presente trabajo se realiza una breve descripción de la evolución histórica de la termometría resaltando los experimentos que se realizaron en su momento para diseñar los instrumentos, establecer los puntos fijos o calibrar las escalas. La reproducción de los mismos en el entorno del aula o el trabajo en casa es sugerida como un buen elemento motivador de la Física Experimental tanto en la Educación Secundaria como en los primeros años de la formación Universitaria.

Palabras clave: Termodinámica, Historia de la Física, Física Educativa.

Abstract

In this work it is presented a brief description of the historical evolution of the thermometry focussing the attention in the experiments that were made in order to design the instruments, to state the fixed points as well as to calibrate the scales. The reproduction of those experiments in the classroom or homework is suggested as a good element of motivation about the Experimental Physics as well as in the Secondary School as in the first years of the University graduate studies.

Keywords: Thermodynamics, History of Physics, Physics Education.

PACS: 01.65.+g, 01.40.Fk, 05.70.-

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La historia de la termometría es una materia que está bastante bien documentada en la bibliografía, existiendo un amplio número de artículos y textos dedicados a la misma.

Así un detallado estudio de los primeros termoscopios desarrollados a finales del siglo XVI y primera parte del XVII es llevada a cabo por F. Sherwood Taylor [1] discutiendo las aportaciones de Galileo, Santorio, Fludd y Drebbel a quienes sitúa como candidatos al mérito de ser considerados como inventores del termómetro. Los detalles de los primeros termómetros de la escuela florentina así como un análisis de lo que podemos denominar la primera serie de medidas realizada por encargo de los Medici entre 1654 y 1750 es estudiada por D. Camufo et al. [2]. Por otra parte L. D. Patterson [3] estudia con detalle los termómetros y técnicas desarrolladas en el entorno de la Royal Society inglesa en el periodo 1663-1768 y en especial las contribuciones de Hooke, Halley y Römer entre otros. Un estudio global de las pioneras aportaciones desde finales del 1500 a 1750 es llevado a cabo en una detallada monografía por H. Carrington Bolton [4]. Las técnicas utilizadas por Newton son analizadas por U. Grigull [5] y A. French [6]. Las aportaciones de Fahrenheit comparativas a sus predecesores y a las posteriores de

Kelvin son tratadas por R. J. Soulen [7] y R. Romer [8]. Una detallada discusión de los puntos fijos y las técnicas de calibración es llevada a cabo por C. Boyer [9]. Las contribuciones de Celsius y sus sucesores en el observatorio de Upsala son descritas por O. Beckmann [10]. La evolución de las leyes de los gases, básicas en la termometría de gas, con las contribuciones de Amontons, Charles, Dalton y Gay Lussac, es revisada cuidadosamente por W. J. Lyons [11].

Una visión general de la evolución de la termometría es realizada por M. Barnett [12], D. Fenby [13] y J. Wisniak [14]. A su vez un amplio estudio de la evolución histórica de la termometría es llevado a cabo en las monografías de W. E. Knowles [15] y H. Chang [16]. Un repaso didáctico de los nombres propios que contribuyeron en algún sentido al desarrollo de la termometría, incluida la etapa más reciente, es llevado a cabo por S. Velasco *et al.* [17] y la evolución de las escalas termométricas hasta hoy día es discutida por J. Pellicer *et al.* [18].

En relación a la época más reciente, un detalle de los desarrollos del siglo XX así como de los distintos pasos llevados a cabo en la determinación de los puntos fijos de la escala práctica actual ha sido publicado por L. Guilder [19] y J. A. Hall [20].

Por otra parte, los pasos conceptuales llevados a cabo por Carnot, Joule, Thomson, y Clausius para el establecimiento de la temperatura termodinámica se encuentran discutidos con detalle en las monografías de D. S. L. Cardwell [21] y C. Truesdell [22], así como en los artículos de W. Crooper [23] y J. de Boer [24]. Una contextualización en el desarrollo de la Termodinámica con un enfoque de utilidad didáctica es llevado a cabo por J. Pérez [25].

La descripción de los instrumentos utilizados o la evolución de las escalas termométricas suelen ser los temas más recurrentes y mejor analizados. Sin embargo, en paralelo a esta evolución se desarrollaron una larga serie de experimentos, muchos de los cuales serían hoy día fácilmente reproducibles en un contexto docente, y que involucran aspectos no del todo bien tratados de la enseñanza de la Física y de la Termodinámica en particular.

Si bien el valor pedagógico de los experimentos en Física está fuera de toda duda, el tiempo necesario para la preparación y ejecución de los experimentos, el coste del material, y las dificultades de llevarlos a cabo en aulas con grupos numerosos de alumnos, hacen que, lamentablemente, en la mayoría de las ocasiones la Física Experimental sea relegada a un segundo plano.

Sin embargo, los experimentos en torno a la medida de la temperatura tienen la ventaja de que son familiares a los estudiantes, pueden ser realizados con un equipamiento de bajo coste y se prestan a ser organizados fácilmente en proyectos para ser encomendados como trabajo en casa.

Así pues, en el presente trabajo se hará un repaso histórico de la termometría, analizando tanto los instrumentos desarrollados como la evolución del concepto de temperatura con un énfasis especial en los experimentos o el descubrimiento de fenómenos relacionados con las variaciones termométricas que fueron realizados en su momento y que pudieran ser reproducibles hoy día en un contexto docente. En la discusión final se incorpora un amplio abanico de ideas que pudiera ser aprovechado por los docentes en casi todos los niveles educativos.

II. LOS PRIMEROS TERMOSCOPIOS

Si bien el concepto de frío y calor es tan antiguo como el ser humano, el crédito para la primera utilización de un instrumento para medir el “grado de frío o calor” de un cuerpo se atribuye a Galileo (1564-1642), si bien más que por sus propios escritos por las referencias al mismo realizadas entre otros por el veneciano Gianfrancesco Sagredo (1571-1620) discípulo suyo en Padua y con el que mantuvo una intensa correspondencia, honrándole, tras su muerte con uno de los personajes de sus famosos Diálogos.

El aparato utilizado en sus demostraciones por Galileo es descrito como una ampolla de vidrio como del tamaño de un huevo de gallina con un tubo fino y largo, la cual se pone en contacto con el cuerpo que se quiere medir y luego se invierte sobre un recipiente con agua. La mayor o menor

altura de la columna de agua en el tubo era tomada como una medida del mayor grado de calor o frío del cuerpo.

Con este instrumento, Sagredo comprueba sorprendido que en el invierno el aire puede estar más frío que la nieve misma, y de la misma manera una mezcla de sal y nieve puede estar mucho más fría que esta última.

Si bien estas observaciones son en primera instancia cualitativas, Sagredo cuantifica sus mediciones en una escala en la que asume que el instrumento inmerso en la nieve marca 100 grados, mientras que en el calor más alto del verano marca 360, lo cual es interpretado como la primera propuesta de utilizar una calibración con dos puntos fijos.

Si bien parece fuera de toda duda que Galileo realizara demostraciones con su instrumento incluso antes de 1600 no se tiene certeza de una fecha exacta que pudiéramos fijar como su invención.

Para muchos autores el mérito de la invención del termómetro debe ser atribuido (o al menos compartido) al italiano Santorio Santorio (1561-1636) el cual, utilizando el mismo diseño que Galileo pero posiblemente de forma independiente a éste, (Santorio atribuye haber tomado la idea de los experimentos de Herón de Alejandría realizados en el siglo I dc) interpreta para su instrumento un uso tanto meteorológico como médico estableciendo que:

...Disponemos de un instrumento con el cual no sólo puede medirse el calor y el frío del aire sino también los grados de calor y frío de todas las partes del cuerpo, como hemos mostrado a nuestros estudiantes de Padua enseñándoles su uso...

Santorio hace una descripción detallada del instrumento y su uso médico en la obra *Comentaria in artem medicinale Galenis* de 1612. Asimismo, también hace una propuesta de fijar dos extremos en el instrumento los cuales sitúa poniendo éste en contacto con nieve y con la llama de una vela respectivamente.

Hemos de señalar que ya en la antigüedad griega, Galeno (129-201) había reparado en la relación del estado de salud con el calor del cuerpo. De hecho para éste tanto el estado de salud o enfermedad como el propio carácter de una persona dependía de las distintas proporciones de las cuatro cualidades: calor, frío, humedad y sequedad. Nótese la similitud de los términos temperamento y temperatura, así como el significado de temperar como el de apaciguar o conseguir equilibrio. Así pues cada persona tenía un estado neutro, (ni frío ni caliente) como el estado normal, pero este estado era dependiente de la persona.

La medida de este estado neutro es sugerida por Galeno como la mezcla de iguales proporciones del cuerpo más caliente (agua hirviendo) con el más frío (nieve), lo cual parece más un razonamiento teórico que una medida realmente práctica.

Las sustancias que permiten curar a una persona están dotadas de estas cualidades, de calor y frío y por lo tanto sirven para restituir el estado normal de una persona. Galeno establece cuatro escalas por lo que una sustancia

Justo R. Pérez

puede tener calor o frío en primera, segunda tercera o cuarta escala.

Esta creencia permaneció durante muchos años y así en 1578 Johannes Haslerus en su *Logistica Medica* establece una tabla dividiendo cada etapa en la escala de Galeno en tres partes y relacionando la misma con los grados del cuadrante terrestre. Así, según Haslerus, una persona que vivía en las proximidades del trópico debía tener un estado neutro de calor mayor que una persona que vivía en el norte de Europa. Los medicamentos debían ser pues mezclados atendiendo a la latitud.

Un detalle interesante de la utilización del termómetro médico por Santorio es el de que éste medía la variación de la altura en la columna de agua durante un intervalo de tiempo fijado por diez oscilaciones de un péndulo (pulsilogium). Por tanto su medición no dependía sólo de la temperatura (en sentido actual) sino de la velocidad con que se alcanza la misma. Debido a que en un paciente con fiebre la circulación periférica aumenta, el método de Santorio resultaba particularmente eficaz para distinguirlo.

Otro experimento interesante realizado por Santorio es la comparación de la medida realizada con su termómetro cuando es sometido a la acción directa del sol, y cuando es sometido a la acción directa de la Luna. Lo curioso es que la relación entre ambos según Santorio es de 120 a 10. Si bien es verdad que la iluminación de la Luna tiene un efecto térmico, éste es muy pequeño como para ser detectado con el instrumental de Santorio, por lo que posiblemente debió estar observando, sin reparar en ello, la presencia de su propio cuerpo.

En lo que se refiere a la utilización del término termómetro, Giuseppe Biancani (1566-1624) utiliza el término termoscopio en su obra *Sphaera Mundi* de 1617, mientras que la palabra termómetro aparece registrada por primera vez en 1626 en la obra *Recreation mathématique* publicada en los países bajos por el Jesuita Jean Leurechon (c. 1591-1670), que escribía bajo el seudónimo de H. Van Etten.

Dispositivos similares a los utilizados por Galileo y Santorio fueron desarrollados por el galés Robert Fludd (1574-1637) quien se inspiró en los experimentos de Filón de Bizancio, y el holandés Cornelius Drebbel (1572-1633) quien centró más la atención en las oscilaciones diarias del "termoscopio" que él interpretó relacionadas con las mareas.

III. LOS INICIOS DE LA TERMOMETRÍA

Otto von Guericke (1602-1686), el inventor de la primera bomba de vacío, construyó en torno a 1660 un termómetro formado por una esfera de bronce a la que se acopla un tubo en forma de U. La dilatación del aire contenido en la esfera se visualiza insertando un líquido en el tubo, (se utilizó alcohol porque no se congela con la nieve) sobre el que flotaba un corcho atado a una cuerda la cual permitía acoplar un indicador.

El propósito de Guericke era el de determinar los días más calurosos y más fríos del año tratando de encontrar la

clave del ciclo que (según Guericke) debería regular las temperaturas de la superficie terrestre.

Hemos de mencionar que pronto se hizo notar que las lecturas del termoscopio de Galileo dependían asimismo de la presión atmosférica. El concepto de presión atmosférica iniciado con el experimento de Torricelli (1608-1647), está ya bien establecido por Blaise Pascal (1623-1662), para quien no resulta ajeno el hecho de que las lecturas del termoscopio dependen también de la lectura barométrica.

En los dispositivos mencionados, la variable termométrica o sensible con la temperatura es el volumen del aire encerrado en un recipiente. La invención del ampliamente utilizado posteriormente, termómetro de expansión de líquido es atribuida a Fernando II de Médici (1602-1686) Gran Duque de Toscana, y su desarrollo a la Academia del Cimento fundada por éste. Bajo su encargo se realizaron diversos diseños utilizando la dilatación del alcohol destilado (espíritu de vino) como sustancia termométrica.

Hemos de señalar que el termómetro de líquido, tal como hoy es conocido no fue el único instrumento realizado en el entorno de la Academia. Otra alternativa que puede aún encontrarse en algunas tiendas (y comúnmente conocido como termómetro de Galileo si bien algunos autores lo atribuyen a Torricelli) es la de un recipiente alargado lleno de alcohol en el que flotan varias bolas de vidrio sujetas a diversos pesos. Las diferentes bolas se hunden o flotan según la temperatura hace variar la densidad del líquido, por lo que regulando éstas convenientemente se puede tener una indicación cuantitativa de lo caluroso o fresco del día.

De igual manera una bola con un agujero en su parte inferior inmersa en el líquido flota a mayor o menor nivel según la temperatura dilate o contraiga el aire que contiene, en un experimento similar al buzo cartesiano descrito por René Descartes (1596-1650).

El primer registro documentado de temperatura utilizando un termómetro de líquido tal como hoy lo conocemos es de 1654 y numerosos experimentos utilizando el mismo así como la forma de construirlo aparecen descritos en la obra *Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento* publicada en 1666.

Si bien la escala utilizada puede considerarse arbitraria y depende del fabricante se establece que el termómetro no debe bajar de 20 grados cuando se introduce en nieve ni pasar de 80 cuando es expuesto al sol en mitad del verano.

El instrumento se divulga en poco tiempo por Italia y Europa, siendo utilizado en el Observatorio de Paris a partir de 1658 y en Inglaterra de la mano de Robert Boyle (1627-1691) en torno a 1661, el cual contó con la mano habilidosa de Robert Hooke (1635-1703) para su construcción sirviéndole de gran ayuda en la preparación de sus *New Experiments and Observations Touching Cold*. Es el propio Robert Hooke quien en su *Micrographia* (1664) propone tomar una escala en la que el punto de congelación del agua es tomado como cero y cada división de la misma corresponde a 1/1000 del volumen del bulbo el cual es elegido con unas dimensiones adecuadas a las del tubo.

Es de notar que Hooke tomaba como referencia el punto en el que comienza a formarse hielo en la superficie del agua asumiendo que la temperatura en el mismo es uniforme. William Croune (1647-1684) puso en discusión este hecho poniendo en evidencia la expansión anómala del agua que hace que la temperatura del fondo del recipiente sea unos grados mayor.

Una circunstancia señalada por Hooke es que la combinación de un termómetro de alcohol con uno de aire puede ser utilizado como barómetro, ya que las diferentes lecturas de este último debidas a la variación de la presión atmosférica pueden ser correlacionadas con el primero. Este diseño presenta una extraordinaria utilidad en el mar, por lo que es bautizado como barómetro marino. Edmond Halley (1656-1742) en su viaje a bordo de la *Paramore Pink*, por el Atlántico Sur cartografiando los cielos del hemisferio Austral, hace un uso sistemático del mismo constatando la correlación entre el descenso de la presión barométrica y los episodios de mal tiempo.

En París, Edmee Mariotte (1620-1684), colocando un termómetro en los sótanos del Observatorio, constata una observación ya realizada por el Gran Duque de Toscana de que la temperatura de una cavidad en el subsuelo es prácticamente uniforme a lo largo de todo el año, con apenas variaciones entre verano e invierno, una circunstancia que es utilizada durante un cierto tiempo como recomendación como punto fijo de los termómetros.

Durante la segunda mitad del siglo XVII el termómetro fue extendiendo su uso, y salvo algunas excepciones, como el utilizado por Isaac Newton (1643-1727) tomando aceite de linaza como sustancia termométrica, el alcohol fue la sustancia más utilizada.

Durante este tiempo, en lo que se refiere a las escalas, la única comparación con cierto grado de fiabilidad entre distintos instrumentos corresponde a aquellos realizados por el mismo fabricante y enviados a distintos lugares por lo que numerosos autores como por ejemplo Christiaan Huygens (1629-1695) argumentan que es necesario establecer una escala de uso general que sea independiente del fabricante del instrumento.

IV. EL TERMÓMETRO COMO INSTRUMENTO COMERCIAL

El uso de mercurio en lugar de alcohol ya había sido considerado en el observatorio de París, sin embargo fue descartado debido a la escasa dilatación del mismo. Sin embargo Hooke y otros ya habían hecho ver que el espíritu de vino no es una sustancia única y que sus propiedades pueden variar según la cantidad de agua que contenga por lo que el mercurio como sustancia más pura podía ser una alternativa al mismo.

El termómetro de mercurio comienza a ser fabricado de forma sistemática por Gabriel Daniel Fahrenheit (1686-1736), nacido en Danzig pero que vivió la mayor parte de su tiempo en Holanda. Fahrenheit fue un excelente fabricante de instrumentos y sus termómetros se distribuyeron ampliamente por Europa.

En lo que se refiere a la escala, Fahrenheit tomó del astrónomo danés Ole Römer (1644-1710) la idea de colocar el cero por debajo del punto de fusión del hielo, tomando para el mismo la temperatura de una mezcla de hielo y cloruro amónico y adoptando como 96 la temperatura del cuerpo humano. Si bien es el propio Fahrenheit el que describe su método en sus escritos a la Royal Society algunos autores señalan que es bastante probable que en el proceso práctico de calibración el punto de fusión del hielo, que en su escala toma el valor 32, fuera el realmente utilizado, proviniendo este número de sucesivas divisiones de una escala primitiva, posiblemente en 8 divisiones.

Römer originalmente había tomado la mezcla de hielo y sal y el punto de ebullición del agua estableciendo una escala dividida en 60 partes entre estos puntos y es él precisamente quien realiza uno de los registros termométricos de mayor interés de la época, llevado a cabo en Dinamarca durante el crudo invierno de 1708/09, sorprendiendo a muchos autores de que temperaturas tan bajas se sostuvieran durante tanto tiempo.

Un descubrimiento realizado por Fahrenheit es el del sobreenfriamiento del agua, observando como una muestra de agua líquida enfriada con la mezcla de hielo y sal puede marcar una temperatura inferior a la del hielo y pasar repentinamente a hielo al mover bruscamente el recipiente. Otros autores también reparan en este hecho y durante un tiempo se discute si es mejor tomar como referencia el hielo fundente o la congelación del agua, inclinándose la balanza por la utilización del primero.

Otro detalle de particular interés es la observación realizada a Fahrenheit por uno de sus más entusiastas clientes, el médico y naturalista holandés Hermann Boerhave (1668-1738) profesor de medicina en Leiden, quien reparó en que dos termómetros, uno de alcohol y otro de mercurio, calibrados de igual forma dan lecturas distintas cuando se aplican a un cuerpo a una temperatura intermedia. Fahrenheit atribuye este hecho a las distintas características del vidrio con el que están contruidos ambos termómetros.

Un método alternativo al de Fahrenheit es el propuesto por el polifacético naturalista francés René Antoine Ferchault de Reaumur (1683-1757). En 1730 Reaumur presenta a la Academia de Ciencias de París un trabajo titulado "*Regles pour construire des thermometres dont les degrés soient comparables*", en el que adopta la idea de establecer las divisiones de la escala según una fracción 1/1000 del volumen del bulbo del termómetro. Tomando una particular dilución de alcohol cuyo volumen varía en 80 milésimas desde el punto de fusión del hielo hasta el de ebullición del agua, establece una escala con el cero en el primero y 80 en el segundo la cual tuvo amplia difusión en Francia y en aquellos países bajo su influencia científica como Prusia y Rusia.

Hemos de hacer notar que Reaumur observa asimismo las diferencias en la lectura de un termómetro de alcohol y de mercurio ya observadas por Boerhave, dando la explicación, aceptada posteriormente, de que éste es un hecho asociado a las diferentes propiedades de dilatación

Justo R. Pérez

de ambos líquidos (diferente dependencia del coeficiente de dilatación con la temperatura)

Reaumur realiza meticulosas observaciones sobre el punto de fusión del hielo, tomando éste de diferentes precedencias, y en diferentes épocas del año estableciendo que

Estimo haber puesto el asunto fuera de toda duda, ya que he tomado hielo en diferentes épocas del año, en días luminosos o lluviosos, bajo la influencia de diferentes vientos, y con dichas muestras siempre el termómetro ha bajado al punto marcado para la congelación.

Reaumur no sólo propone una escala sino que ofrece un detallado método para llevar a cabo la preparación de la muestra de alcohol así como su calibración en cualquier lugar del mundo, estableciendo además que esta última es independiente del tamaño y la forma que tengan los termómetros.

Sin embargo el método de Reaumur, si bien conceptualmente simple, en la práctica no es tan sencillo y pronto otros métodos más directos fueron propuestos incluso por sus compatriotas como por ejemplo Joseph Nicholas Delisle (1688-1768) astrónomo francés que fue llamado por el zar Pedro El Grande para dirigir el observatorio astronómico de la Academia de San Petersburgo. Delisle que ya había utilizado en Francia termómetros de alcohol graduados con el cero en el punto de ebullición y 100 en los sótanos del Observatorio, diseñó en San Petersburgo una escala alternativa aplicada a los termómetros de mercurio en la que toma igualmente como cero el punto de ebullición del agua pero divide la escala según la fracción 1/10000 del volumen del mercurio. Una descripción de su método enviado a la Academia de París en 1734 bajo el título "*Les termometres de mercure rendus universels.*" no es publicada por ésta, apareciendo sólo en las obras de Delisle publicadas posteriormente en San Petersburgo.

Siguiendo las instrucciones de Delisle el anatomista Josias Weitbrecht (1702-1747) realizó cuidadosas medidas sobre la temperatura de congelación del río Neva, así como del agua que fluía por debajo del hielo, llegando a la sorprendente conclusión de que ésta era prácticamente constante a lo largo de todo el invierno. Sus mediciones le permitieron constatar que el mercurio se contrae en una fracción 150/10000 entre el punto de ebullición y el punto de congelación del agua, por lo que propone modificar la escala de Delisle tomando como cero el punto de ebullición y 150 el punto de congelación del agua. Esta escala estuvo en uso común en Rusia durante más de 100 años.

Es precisamente en la Academia de San Petersburgo donde su profesor de Física Joseph Adam Braun (1712-1768) observó en el invierno de 1759-1760 que el frío era tan intenso que era capaz de solidificar el mercurio del termómetro, una circunstancia que consiguió reproducir produciendo una temperatura menor aún, mezclando nieve con agua fuerte (disolución de ácido nítrico), si bien se tardó algún tiempo en dar una temperatura exacta a la cual

dicha solidificación tuviera lugar, comprobándose posteriormente en -38.4°C .

Como vemos, a lo largo de la primera mitad del siglo XVIII se desarrollaron diferentes métodos para graduar los termómetros. En muchas ocasiones estos métodos iban asociados al proceso de fabricación y en otras pretendían ser independientes del mismo. Una de las escalas, junto con la Fahrenheit que ha permanecido hasta nuestros días es la establecida por el astrónomo sueco Anders Celsius (1701-1744). Nacido en Uppsala, Celsius fue profesor de Astronomía en dicha Universidad y director de su observatorio, cuya construcción supervisó. En 1742 publicó "*Observaciones sobre dos bien definidos grados en un termómetro*" en el que analiza como el punto de fusión del hielo y el de ebullición del agua pueden ser tomados como puntos fijos de una escala termométrica.

Si bien ya otros autores, como por ejemplo Reaumur, habían mencionado que el punto de congelación del agua (o mejor el de fusión del hielo) era independiente de la estación del año y de la meteorología, Celsius prueba asimismo que, al contrario que el punto de ebullición, es también independiente de la presión barométrica, al tiempo que aprovecha su viaje a Laponia con la expedición de Maupertuis para medir el arco del meridiano terrestre, para comparar sus mediciones con las realizadas con Uppsala y París y establecer que este punto es asimismo independiente de la latitud, siempre y cuando se tome la precaución de poner el termómetro en contacto con el hielo cuando éste comience a fundirse y por tanto aparezca una mezcla de hielo y agua.

En lo que se refiere al punto de ebullición Celsius analiza que la temperatura del mismo es independiente del tiempo en que se sostenga la ebullición, así como que no depende de si el agua es obtenida de la fusión del hielo, del río o de un pozo. Sin embargo es consciente de que, tal como había observado Fahrenheit, dicha temperatura depende de la presión atmosférica por lo que realiza una serie de cuidadosas medidas anotando sistemáticamente la temperatura de ebullición y la presión atmosférica. De sus resultados llega a la conclusión de que un cambio de 1 pulgada en la columna de mercurio del barómetro produce una variación de 8 gran (un divisor de pulgada) en su escala termométrica. Traducido a unidades actuales ofrece un valor de 3.8 kPa K^{-1} , relativamente próximo al valor de 3.62 kPa K^{-1} actualmente tabulado.

Así pues, Celsius propone una escala en la que el punto de ebullición del agua a la presión de 25.3 pulgadas de mercurio (751.2 mm Hg) que él considera la presión atmosférica media, sea tomado como 0 mientras que el punto de fusión del hielo sea tomado como 100.

La escala Celsius sólo comenzó a ser utilizada de forma sistemática después de la muerte del mismo. El momento en el que la escala fue invertida dando lugar a la escala Celsius actual es un objeto de controversia. Los registros termométricos del observatorio de Upsala comenzaron a ser tomados en la escala original de Celsius en 1747 (tres años después de la muerte de éste) pero en las publicaciones del observatorio habían sido incorporados en la escala invertida actual desde 1746. En cualquier caso

parece claro que, si bien algunos autores señalan al naturalista Linneo como el autor, fueron sus sucesores en el observatorio de Upsala, (los mismos que comenzaron a utilizar de forma sistemática su escala), los que procedieron a la inversión de la misma.

Como curiosidad, hemos de señalar que aunque actualmente Celsius es universalmente conocido por la escala que lleva su nombre, tanto en su obituario como en el de sus sucesores no se hace ninguna referencia a la termometría ni a su escala termométrica, siendo otros méritos, como por ejemplo la relación de las auroras boreales con los fenómenos magnéticos, o la medición del arco del meridiano, los que aparecen descritos detalladamente.

La escala Celsius se generaliza al ser adoptada como unidad de pesos y medidas por la Academia Francesa durante la revolución. La prevalencia de ésta frente a las otras escalas como la Reaumur o Delisle se basa en su carácter centesimal, al igual que otras magnitudes como las de longitud y masa (aceptadas actualmente) o de tiempo (descartadas posteriormente).

V. LOS PROBLEMAS DE LA EBULLICIÓN

A pesar del cada vez más generalizado acuerdo sobre el establecimiento del punto de ebullición como referencia termométrica, esto no resolvió del todo el problema ya que la definición exacta de ebullición continuó siendo objeto de discusión durante algún tiempo. Así en 1776 la Royal Society inglesa constituyó un comité de siete miembros presidido por Henry Cavendish (1731-1810) para establecer las recomendaciones precisas para el calibrado de los termómetros. Uno de los miembros de este comité el genovés afincado en Londres Jean André De Luc (1727-1817), realizó exhaustivos experimentos con objeto de determinar de forma inequívoca dicho punto. En ellos pudo observar significativas diferencias dependiendo de las características del agua, de la forma del recipiente y del método de calentamiento. Así pudo comprobar cómo este punto de ebullición puede experimentar variaciones de hasta 10°C cuando el agua ha sido desprovista de aire (por ejemplo por una ebullición previa) a la vez que en este caso la ebullición, en lugar de producirse de forma paulatina se produce de forma violenta en forma de grandes burbujas.

Este fenómeno, conocido posteriormente como sobrecalentamiento, fue observado entre otros por el francés Joseph Louis Gay Lussac (1778-1850), quien hizo ver que el mismo es atenuado si la ebullición se produce en un recipiente metálico en vez de en un recipiente de vidrio, y que desaparece si se insertan en el mismo limaduras o pequeños trozos de metal, al tiempo que se acentúa si el recipiente de cristal no contiene imperfecciones y es lavado previamente con un ácido.

Las discusiones del comité de la Royal Society habían llegado a recomendar, principalmente bajo la opinión de Cavendish que el calibrado del termómetro se llevara a cabo con éste en contacto no con el agua, sino con el vapor que emana de la misma. Esta técnica, discutida entre otros

por De Luc, acabaría imponiéndose posteriormente principalmente en los detallados trabajos llevados a cabo ya en la mitad del siglo XIX por el francés Henri Victor Regnault (1810-1878).

VI. EL TERMÓMETRO DE GAS

Paralelamente al uso de los termómetros de dilatación de líquidos y las escalas termométricas introducidas merece la pena centrar la atención en el termómetro de gas. Robert Boyle había establecido la proporcionalidad inversa entre el volumen de un gas y la presión del mismo, como una demostración de que el aire, y en general los gases, no son materias sutiles que pueden moldearse de cualquier forma, sino que poseen una elasticidad que hace que cuando se encierran en un recipiente sean capaces de ejercer una fuerza (presión) considerable sobre sus alrededores.

El francés Guillaume Amontons (1663-1705), observó que el aire podría considerarse como sustancia termométrica, y estableció que la presión del mismo, cuando se mantiene a volumen constante es proporcional a la temperatura, disminuyendo aproximadamente en 1/3 de su valor entre el punto de ebullición y el punto de fusión del hielo. Con esta observación establece el razonamiento de que el valor mínimo de temperatura (o la ausencia total de calor) deberá producirse cuando el aire pierda toda su elasticidad (es decir a presión cero) por lo que es posible estimar esta temperatura a partir de los valores medidos en el rango de temperaturas accesibles desde la experimentación. La estimación de Amontons sitúa este cero en -248°C, un valor posteriormente refinado por Emile Clapeyron (1799-1864) a -263°C, y por William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) a -273. Ya iniciado el Siglo XX Kammerling Onnes (1853-1926) establece este valor en -273.10 °C hasta que posteriormente se obtiene el valor adaptado hoy de -273.15°C.

Los experimentos con el aire se continuaron realizando a finales del siglo XVIII, destacando los realizados por Johann Heinrich Lambert (1728-1777), (autor entre otros trabajos de la demostración de que el número π es irracional), quien en su obra *Pirometrie* publicada en 1779 estudia sistemáticamente las diferencias entre el termómetro de aire y el de alcohol argumentando que es el primero de ellos el que “muestra el verdadero grado de calor”.

Estos trabajos son continuados por el francés Joseph Louis Gay Lussac (1778-1860) quien publica en 1803 su obra *Recherches sur la dilatation des gaz* en la que prueba que las propiedades elásticas del aire son compartidas asimismo por otros gases. La cuantificación de sus experimentos le lleva a establecer la proporcionalidad entre el volumen y la temperatura, cuando la presión permanece constante, un resultado que ya había sido apuntado en torno a 1787 en una memoria no publicada por su compatriota Jacques Alexandre Cesar Charles (1746-1823), inventor del globo de hidrógeno y el primero en volar en el mismo.

Justo R. Pérez

Experimentos sobre la dilatación de los gases también fueron realizados por el inglés John Dalton (1766-1844) quien en su trabajo *“On the expansion of elastic fluids by heat”* publicado en 1802 llegó a la conclusión de que

“Todos los fluidos elásticos bajo la misma presión se expanden de igual forma por el calor”

Dalton trató de explicar sus resultados en términos de su recién formulada teoría atómica, estableciendo que la dilatación de los gases al suministrarles calor era debida a que éstos se rodeaban de una atmósfera de *calórico* que dotaba de propiedades repulsivas a los constituyentes de la materia.

El trabajo sistemático más preciso realizado en la primera mitad del siglo XIX es el llevado a cabo por el francés Henry Victor Regnault (1810-1878) quien en una extensa memoria presentada en 1847 realiza un exhaustivo estudio de las magnitudes involucradas en el funcionamiento de la máquina de vapor, y por extensión un cuidadoso análisis de las relaciones entre presión, volumen y temperatura para el mismo.

Regnault hace ver que se pueden obtener similares resultados del termómetro de gas a volumen constante y presión constante, si bien el primero presenta diversas ventajas relativas a su operabilidad. Otra cuestión analizada es la variación de la dependencia de la relación entre presión y volumen con la presión así como con el gas utilizado. El estudio permite concluir que estas diferencias se minimizan cuando la presión es pequeña, por lo que la extrapolación al límite de presión cero puede ser tomada como una referencia. Asimismo hace ver que el hidrógeno es el que presenta una menor dependencia de la presión inicial, por lo que recomienda su uso como sustancia termométrica.

En su reflexión sobre las medidas realizadas Regnault hace ver que

“Llamamos termómetros a instrumentos con los que se pretende determinar las variaciones de la cantidad de calor contenida en un medio. En general estos instrumentos están fundamentados en la expansión que esos cuerpos sufren como consecuencia de la acción del calor, o bien en los cambios de presión (fuerza elástica) que un volumen dado de gas experimenta en las circunstancias en las que se encuentra el medio.”

Un termómetro perfecto debería ser aquel en el que las indicaciones son siempre proporcionales a las cantidades de calor que éste ha absorbido; o en otras palabras aquel en el que el suministro de iguales cantidades de calor produce siempre iguales expansiones.”

Regnault advierte que esto no siempre ocurre y que por tanto, si bien podemos proveernos de instrumentos que nos den una escala suficiente desde el punto de vista práctico, la propia definición de temperatura y un método para

medirla eficientemente es un problema, en su tiempo, aún por resolver.

VII. TEMPERAR ES MEZCLAR

Era evidente que las discrepancias observadas desde Boherhaave entre los termómetros de mercurio y de alcohol abrían la puerta a la búsqueda de un elemento termométrico que fuera capaz de medir iguales variaciones en su escala para iguales suministros de calor. Sin embargo, lo que no estaba de ninguna manera claro, es qué son iguales variaciones de calor.

En el contexto de finales del siglo XVIII el calor es interpretado como un fluido capaz de impregnar la materia o bien de combinarse con ella. En este esquema tiene sentido preguntarse sobre el contenido absoluto de calor de un cuerpo y admitir que la temperatura es una medida de éste. Sin embargo era ampliamente conocido que en determinados procesos como la condensación o la fusión un cuerpo es capaz de absorber calor sin que se produzca variación en su temperatura. En este sentido se da al calor la interpretación de calor sensible (el cual produce variaciones en el termómetro) y calor latente, el cual permanece en los cuerpos pero no produce tales efectos.

Un experimento que merece la pena mencionar es el llevado a cabo por el inglés Brooke Taylor (1685-1731) más conocido por sus aportaciones al cálculo diferencial. En 1723 Taylor publica *“An experiment made to ascertain the proportion of the liquor in the thermometer with regard to the degrees of heat”* en el que propone encontrar el verdadero grado de calor, mezclando diferentes proporciones de agua helada con agua en ebullición.

La validez del método de las mezclas supone que la cantidad de calor de un cuerpo o al menos la variación de esta cantidad de calor por unidad de masa es proporcional a una magnitud denominada posteriormente por Joseph Black (1728-1799) capacidad calorífica (específica de cada sustancia) por la diferencia de temperatura. Si asumimos que esta capacidad calorífica es independiente de la temperatura el método es válido para representar una escala, pero a medida que la teoría del calor como fluido se va haciendo más elaborada sus mismos proponentes (como por ejemplo John Dalton) dudan de que esta hipótesis sea correcta por lo que la definición de temperatura, o mejor dicho su interpretación como una medida del contenido de calor de un cuerpo sigue siendo una materia abierta a discusión hasta bien avanzado el siglo XIX.

VIII. LAS ALTAS TEMPERATURAS

En la discusión de los apartados anteriores hemos podido ver que si bien desde un punto de vista intuitivo y para muchas aplicaciones prácticas no nos causa ningún problema el utilizar los términos temperatura y calor, el tema no es tan sencillo cuando tratamos de dar una definición precisa de ambos conceptos. Incluso tomando

una referencia (por ejemplo el alcohol o el mercurio) este sistema tiene un rango limitado, y si extrapolamos su comportamiento no tenemos garantías de que en distintos rangos ambos comportamientos tengan el mismo significado.

Un ejemplo significativo de estas dificultades lo tenemos analizando los pasos que fueron dados para definir una escala de temperatura que fuera más allá del punto de ebullición del mercurio (356.88°C).

Las altas temperaturas se venían utilizando desde muy antiguo en diferentes procesos, en la mayoría de las civilizaciones ya que el fuego no sólo sirvió para la cocción de los alimentos y para fabricar cerámicas de muy diverso tipo, sino para dominar los metales elemento fundamental en la construcción de instrumentos y sobre todo de armas.

En los métodos antiguos utilizados en metalurgia y alfarería, la medición de temperatura se realizaba visualmente según los distintos tonos de rojo que ofrecían los materiales sometidos al calor. Sin embargo, no existió una escala propiamente dicha hasta el trabajo del ceramista inglés Josiah Wedgwood (1730-1995) quien propuso en torno a 1780 una escala basándose en la contracción que experimenta una pieza de cerámica cuando es expuesta a alta temperatura durante un cierto tiempo. Tomando una mezcla como prototipo y unas piezas de un tamaño determinado, la medición en la escala Wedgwood podía llevarse a cabo midiendo el tamaño de la pieza una vez que se ha extraído del horno. Sin embargo, el propio Wedgwood reconoce que su escala es arbitraria y si bien puede ser útil para la estandarización de diversos procesos industriales, no puede ser interpretada como una escala de temperaturas propiamente dicha.

En un intento por validar su método Wedgwood utiliza la dilatación de la plata como elemento termométrico para definir una escala intermedia que puede compararse con la Fahrenheit en el rango en que ésta puede medirse con el termómetro de mercurio. Así pues, graduando las diferentes escalas en los rangos en que es posible medir con ambos instrumentos, Wedgwood es capaz de dar un primer intento de extensión de la escala Fahrenheit más allá del punto de ebullición del mercurio.

El trabajo de Wedgwood fue continuado entre otros por Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1816), colaborador de Lavoisier, quien utilizó la dilatación del platino, un elemento traído por los españoles (quienes le concedieron escaso valor) del Nuevo Mundo y que había comenzado a ser utilizado por el inglés William Hyde Wollaston (1766-1818) el cual había desarrollado una técnica para elaborar hilos muy finos (así como otras figuras) con el mismo.

Guyton, que entre otras observaciones mide la temperatura de combustión del diamante, establece una recalibración de la escala Wedgwood, obteniendo unos valores significativamente inferiores a los establecidos por éste para los puntos de fusión de algunos metales como el hierro, el oro y la plata.

Independientemente de Guyton el inglés John Fredrick Daniell (1790-1845), desarrolla asimismo una

recalibración de la escala Wedgwood utilizando la expansión del platino como elemento termométrico, mejorando algunas de las técnicas de éste. Sin embargo es consciente de que su escala sigue siendo arbitraria y que no existe ninguna garantía de que la dilatación del platino o de ningún otro elemento sea lineal con una escala de temperatura definida sin estar asociada a una técnica concreta de medición. Sus argumentos están basados en las mediciones realizadas por los franceses Pierre Louis Dulong (1785-1838) y Alexis Therese Petit (1791-1820) quienes compararon los resultados de la dilatación de los metales con el termómetro de gas en un rango hasta 300°C observando significativas discrepancias entre ambas técnicas.

Un procedimiento de particular interés utilizado ampliamente por Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794) y Pierre Simon de Laplace (1749-1827) es la calorimetría de hielo. Con esta técnica, una muestra tomada a alta temperatura se vierte en un calorímetro conteniendo hielo, evaluando la temperatura de la misma por la cantidad de hielo que se funde y que es recogido en un recipiente aparte. Si bien la misma presenta varias dificultades, como por ejemplo evaluar con precisión el agua formada, es citada por varios autores como una de las técnicas más fácilmente reproducibles.

El calorímetro de hielo es asimismo utilizado por los franceses Nicolas Clement (1779-1842) y Charles Desormes (1771-1862), quienes realizaron una exhaustiva comparación con el método de mezcla en agua, (sumergir la muestra en agua y evaluar su temperatura por el aumento que provoca en ésta) y con el termómetro de aire en el rango en que éste era aplicable.

Otra técnica que había sido desarrollada tiempo atrás por el propio Isaac Newton (1643-1727) es la de analizar el enfriamiento de la muestra y evaluar su temperatura inicial por la temperatura que tiene después de un cierto periodo de tiempo. Esta técnica en la que se encuentran involucradas las variables tiempo, temperatura inicial y final es similar a la utilizada actualmente por los forenses para estimar la hora de la muerte de un cadáver midiendo la temperatura de su hígado.

El rango de aplicabilidad del termómetro de gas es ampliado en torno a 1836 por el francés Claude Servais Mathias Pouillet (1790-1868) quien superó las dificultades técnicas para construir un termómetro de aire con un bulbo de platino lo que le permitió establecer otro criterio para extender la escala atmosférica sobre un rango más amplio de temperatura. Sin embargo, éste y otros desarrollos sólo sirvieron para poner en evidencia los dos problemas básicos de la termometría hasta dicha fecha: La dificultad de reproducir las medidas y la falta de una base conceptual sólida para la propia definición de temperatura.

IX. EL EFECTO SEEBECK

Un paso relevante en la medida de la temperatura es el descubrimiento en 1822 de la termoelectricidad por el estonio Thomas Johann Seebeck (1770-1831) cuando

experimentaba con el fenómeno recién descubierto por el danés Hans Christian Oersted (1777-1851) de que el paso de una corriente eléctrica por un conductor es capaz de mover la aguja magnética de una brújula.

De forma accidental, Seebeck comprobó que si tomaba un conductor formado por la unión de dos metales diferentes y acercaba el punto de unión a la llama de una vela, se producía una deflexión en la aguja de brújula, sin necesidad de que el conductor estuviera conectado a ninguna pila. Sus observaciones publicadas bajo el título de "*Ueber die magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz*" le llevaron a la conclusión de que había una conexión directa entre magnetismo y diferencia de temperatura, postulando que quizá la causa del magnetismo terrestre era la diferencia de temperatura existente entre los polos y las regiones tropicales.

Oersted no estuvo de acuerdo en esta interpretación, señalando que el fenómeno era similar al observado por él mismo, sólo que en este caso el paso de la corriente eléctrica era producido por la diferencia de temperatura. Este hecho fue confirmado al comprobarse en 1834 por parte del francés Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845) el efecto contrario, es decir que pasando una corriente eléctrica por dos metales diferentes, se producía una diferencia de temperatura entre sus extremos.

El efecto Seebeck proporciona un nuevo elemento para la medida de la temperatura, el termopar, construido con la unión de dos cables de metales diferentes, que proporciona la ventaja de su reducido tamaño y rápida respuesta, al tiempo que puede amplificarse su sensibilidad al montar varios de ellos en serie formando una termopila.

Con este instrumento el italiano Macedonio Melloni, (1798-1854) realizó una cuidadosa experimentación sobre el calor radiante, descubierto por Friedrich Wilhelm (William) Herschel (1738-1822) unos años antes. Herschel probó que al descomponer la luz solar con la ayuda de un prisma y medir la temperatura sobre cada uno de los colores en que se descompone, el máximo de la temperatura se encuentra, no sobre la parte iluminada, sino más allá del rojo en una región que nuestro ojo no detecta. A esta radiación calorífica que se transmite con la luz pero puede separarse de ésta (hoy conocida como radiación infrarroja) Herschel le dio el nombre de calor radiante.

Melloni fue capaz de comprobar que el calor radiante obedece a las mismas propiedades de reflexión, refracción y polarización que la luz ordinaria, por lo que es de suponer asimismo un carácter ondulatorio para éste.

Los termopares fueron utilizados entre otros por Antoine Cesar Becquerel (1788-1878), padre de Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891) descubridor del efecto fotovoltaico y abuelo de Henri Becquerel (1852-1845) descubridor de la radiactividad. El abuelo Becquerel utilizó largos termopares de hierro-cobre para medir la temperatura de lugares inaccesibles como la profundidad de los lagos (104 metros en el lago Ginebra en 1837) o cavidades en el interior de la tierra. Como el efecto termoeléctrico depende de la diferencia de temperatura entre ambas soldaduras de los cables de diferentes metales,

Becquerel tuvo la idea de calentar/enfriar la soldadura accesible hasta anular la lectura del galvanómetro y medir entonces la temperatura de esta última con un termómetro de mercurio.

Otra propiedad relacionada con la electricidad de gran importancia en el desarrollo de la termometría es la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Este efecto descubierto en 1821 por Humphrey Davy (1778-1829) comenzó a ser utilizado de forma sistemática por el ingeniero alemán Carl Wilhem Siemens quien en 1861 publicó un trabajo titulado "*On an electric resistance thermometer for observing temperatures at inaccessible locations*", proponiendo el uso del platino como la mejor elección para fabricar dicho instrumento.

El estudio más exhaustivo de los termómetros de resistencia que condujeron a su propuesta como termómetro estándar a efectos prácticos fue realizado en torno a 1887 por el inglés Hugh Longbourne Callendar (1863-1930), quien ajustó las medidas de la resistencia con las del termómetro de aire a través de una ecuación parabólica, consiguiendo una precisión de 0.1°C en el entorno de 1000°C.

La dependencia de la resistencia con la temperatura es particularmente evidente en algunos semiconductores. Es precisamente Michael Faraday (1791-1867) quien primero estudia de forma sistemática este efecto comprobando que la resistencia del sulfuro de plata Ag₂S disminuye al aumentar la temperatura. Sin embargo la fabricación comercial de semiconductores no se desarrollaría hasta la década de 1940.

Estos dispositivos llamados termistores (del inglés thermal resistors) proporcionan un elemento con una alta sensibilidad y rápida respuesta a los cambios de temperatura. Sin embargo la dependencia es no lineal si bien puede ser descrita con bastante aproximación con una forma exponencial con el inverso de la temperatura.

El desarrollo de la microelectrónica en los últimos años del Siglo XX ha puesto en el mercado una amplia gama de sensores que proporcionan una dependencia bastante lineal del potencial con la temperatura. En particular un simple diodo puede ser un elemento bastante práctico de sensor de temperatura.

X. LOS PIROMETROS

Sería precisamente el calor radiante el que proporcionaría la clave para la medida de las altas temperaturas. Desde muy antiguo, en distintos procesos que requerían el uso de hornos de diverso diseño, el color del interior de los mismos fue interpretado como un elemento de medición. Así algunas técnicas de metalurgia o cerámica requerían un rojo más intenso que otras, y el artesano aprendió pronto a guiarse por la vista para valorar cuando el hierro estaba preparado para ser trabajado. Sin embargo, de forma cuantitativa no sería hasta finales del siglo XIX e inicios del XX cuando se desarrollarían instrumentos para los cuales se puede dar una interpretación cuantitativa y por tanto pueden ser llamados termómetros.

Si bien, como ya hemos mencionado, el descubrimiento del calor radiante separado del espectro visible es debida a William Herschel, los experimentos con el mismo son muy antiguos. Un ejemplo es la idea de concentrar los rayos del sol de la cual había hecho uso Arquímedes cuando incendió las velas de la flota romana concentrando los rayos del sol con la ayuda de los escudos de los guerreros de Siracusa.

Un experimento asimismo representativo es el realizado en 1791 por el francés Marc Auguste Pictet (1752-1825). Este tomó dos espejos parabólicos metálicos separados a cierta distancia y colocó un termómetro en uno de los focos observando que la temperatura aumentaba de forma casi instantánea al colocar un objeto caliente (aunque no luminoso) en el otro foco en contraste con la lenta propagación del calor a través del aire.

Lo sorprendente del experimento fue que cuando colocó en vez de un objeto caliente un recipiente lleno de hielo en el foco el termómetro colocado en el otro foco experimentó un descenso, el cual se incrementó cuando vertió ácido nítrico sobre el hielo. Esto dio lugar a interesantes especulaciones sobre si el calor es una magnitud positiva y el frío es la ausencia de la misma, o si bien el frío es asimismo una magnitud positiva en sí.

Benjamin Thomson (Conde de Rumford) (1753-1814) más conocido posteriormente por su empecinamiento en que el calor no es un fluido, realizó diversos e interesantes experimentos relacionados con el enfriamiento y el abrigo de las personas. Una de sus conclusiones es que una superficie reflectante retarda el enfriamiento de su contenido, lo cual experimentó rodeando de superficies metálicas diversos objetos, y puso en práctica con su propia vestimenta luciendo un abrigo blanco (incluido sombrero) en pleno invierno parisino.

Ya en 1773 el inglés Richard Watson (1737-1816) había hecho constar que cuando el bulbo de un termómetro es pintado de negro y se deja al sol indica una temperatura más alta que cuando no está pintado. Basándose en esta observación se habían realizado diversos termómetros en los que el bulbo se encuentra aislado en un segundo recipiente en el que se ha hecho el vacío, los cuales fueron utilizados para medir la temperatura a ras del suelo en las noches heladas.

Esta idea se desarrollaría posteriormente llegando al pirómetro ideado por M. Fery en 1901 en el cual la radiación es concentrada por un espejo parabólico sobre un termopar siendo la lectura de éste una indicación de la temperatura medida.

Estos dispositivos que se denominan pirómetros de radiación total están basados en la ley establecida por el austríaco Josef Stefan (1835-1893) y deducida teóricamente por Ludwig Boltzmann (1844-1906) estableciendo que la energía emitida por unidad de tiempo y superficie por un cuerpo es proporcional a la potencia cuarta de su temperatura.

Es el propio Stefan el que, basándose en las medidas realizadas por Charles Soret (1854-1904) comparando la emisión del sol con la de una plancha caliente realizó la

primera medición fiable de la temperatura en la superficie del sol, estimándola en 5713K.

Entre los instrumentos diseñados merece mención el bolómetro, ideado en 1878 por el norteamericano Samuel Langley (1834-1906) el cual básicamente consistía en dos tiras de platino ennegrecidas, una de ellas protegida de la radiación y la otra no, formando las ramas de un puente de Wheatstone. Al incidir la radiación sobre la tira expuesta el cambio de temperatura provoca un cambio de resistencia que es medido con el puente.

Este instrumento permite medir la intensidad de la radiación en función de la longitud de onda (espectro) en regiones fuera de la región visible. Langley fue capaz de observar como las mismas rayas (regiones de menor emisión) presentes en el espectro visible del sol y descubiertas por Joseph Fraunhofer (1787-1826) se extienden a la parte correspondiente al calor radiante o radiación infrarroja.

El desarrollo de los pirómetros tuvo un avance significativo a lo largo del siglo XIX. Uno de esos diseños fue el realizado por el francés Henri Le Chatelier (1850-1936), más conocido por sus teorías sobre el equilibrio químico. En este diseño, un sistema de lentes permiten comparar sobre un filtro rojo la luminosidad de la fuente que se pretende medir con la de una lámpara de aceite tomada como referencia. Posteriormente se modificó sustituyendo la lámpara por una bombilla con un filamento, de manera que al regular la intensidad de corriente que circula por el mismo se pueda conseguir equiparar la luminosidad del filamento y el objeto de fondo dejado de verse el primero. Estos dispositivos denominados pirómetros de desaparición de filamento fueron incluso considerados instrumentos estandar durante bastante tiempo.

En 1900, Max Planck (1858-1947) dedujo la relación entre la energía emitida por un cuerpo por unidad de tiempo y superficie (emitancia), la longitud de onda y la temperatura. Esta ley reproduce dos resultados que habían sido obtenidos previamente. Su integración da lugar a la ley de Stefan Boltzmann (dando pues la energía total emitida por un cuerpo en función de la temperatura) y la ley de Wien que establece que el máximo de la radiación emitida es inversamente proporcional a la temperatura, desplazándose desde el rojo (a las temperaturas más bajas) hasta el violeta (a medida que la temperatura aumenta). Podemos decir que el ojo humano fue durante mucho tiempo un pirómetro basado en la ley de Wien.

La ley de Planck es el estandar actual para la medida de altas temperaturas. Pero no sólo altas, ya que la radiación de fondo del universo descubierta por Penzias y Wilson en 1965 es ajustada a la ley de Planck como la emisión de un cuerpo negro a 2.7 K.

En el siglo XX se desarrolló una amplia serie de fotodetectores, siendo el sulfuro de plomo uno de los primeramente utilizados. En estos la incidencia de radiación térmica provoca un potencial que puede ser medido. Disponiendo estos fotodetectores en matrices puede medirse la temperatura de amplias superficies,

siendo éste uno de los fundamentos de la termografía infrarroja.

XI. LA DEFINICION FORMAL DE TEMPERATURA

Hemos visto una revisión de las técnicas de medida de temperatura y los experimentos más relevantes asociados a la misma a lo largo de más de 500 años de nuestra historia. Sin embargo, en la misma sigue aún un aspecto pendiente el cual es la propia definición del concepto de temperatura.

La definición formal de temperatura y el concepto actual de Temperatura Termodinámica aparece en torno a 1850 de la mano de los trabajos de William Thomson, James Prescott Joule (1819-1889), Hermann Helmholtz (1821-1894) y Rudolf Clausius (1822-1888), quienes basaron su trabajo en las ideas sobre las máquinas térmicas desarrolladas unos años antes por el francés Sadi Carnot. El análisis de la evolución del concepto de temperatura presenta aspectos del máximo interés en la comprensión de las magnitudes físicas, sin embargo su extensión excede con creces el objetivo de este trabajo.

XII. DISCUSION

El desarrollo realizado en este trabajo relativo a la evolución de la termometría presenta una multitud de aspectos que pueden ser trabajados como iniciación a la Física Experimental en un laboratorio introductorio. Así por ejemplo, la construcción de un termoscopio de Galileo puede realizarse de forma sencilla con diversos materiales, y las observaciones de Sagredo pueden ser llevadas a cabo sin mayor dificultad.

La mezcla de hielo y sal es fácilmente accesible y una atmósfera más fría que el hielo puede encontrarse en el congelador de una nevera. El uso de la fotografía o el video (o ambos) puede servir de refuerzo a las observaciones a la vez que supone un elemento motivador adicional para los jóvenes.

Los experimentos de Santorio pueden ser asimismo repetidos utilizando el cuerpo humano, el sol, una lupa, una lámpara, o la presencia de una persona. La influencia de la Luna puede ser propuesta como elemento de discusión motivando por otra parte la observación sobre la misma. Otra idea de la medición en el aula es la construcción de un termoscopio y llevar un registro a lo largo de un día o de varios días.

La observación de Drebbel de relacionar las variaciones del termoscopio con las mareas permite introducir un nuevo elemento de discusión sobre el origen de las mismas. El uso de un termómetro clínico puede ser usado como elemento pedagógico realizando un registro sobre una clase, dando asimismo una idea sobre una distribución estadística de una serie de medidas.

Un termómetro de Guericke también puede ser diseñado y construido con facilidad en un aula. Su uso también permite discutir las variaciones sobre las

temperaturas máximas y mínimas y sobre la predictibilidad de las condiciones meteorológicas, y el cambio climático.

Si el centro dispone de un barómetro, las medidas del termoscopio pueden relacionarse con la presión. Otra alternativa es comparar los resultados de dos centros situados a distinta altitud.

El termómetro comúnmente denominado de Galileo [26] basado en la flotabilidad de un objeto, se puede encontrar como objeto decorativo a un precio no demasiado elevado. También puede construirse uno sin demasiado coste. De igual manera un buzo cartesiano también puede construirse con facilidad.

La comprobación de la constancia de la temperatura en los sótanos puede llevarse a cabo si el centro posee un garaje subterráneo, o bien por los alumnos en su propio domicilio.

Las diferentes propiedades de dilatación de distintos líquidos pueden ser comprobadas con un simple matraz un tapón y un tubo estrecho discutiendo las bases de la termometría de líquidos.

Este mismo dispositivo puede servir para poner en evidencia la dilatación anómala del agua. Dado que el proceso de enfriamiento puede ser lento, una cámara de video en la que se varía el tiempo de toma de cada fotograma puede ser ilustrativo del mismo, tanto para el registro como para su posterior exposición en clase.

Esta dilatación anómala del agua puede asimismo evidenciarse con la experiencia de Hope, en la que se registra la temperatura en la parte superior e inferior de un tubo largo lleno de agua que es enfriado por su parte central.

El sobreenfriamiento del agua puede ser asimismo observado con facilidad, así como el hecho de que el agua previamente calentada solidifica primero que el agua sin calentar, una observación ya realizada por Black y redescubierta en el contexto docente por un estudiante de secundaria de Zimbabwe, Erasto Mpemba (1950-) y cuya discusión ha dado lugar a diversas publicaciones recientes siendo conocida como efecto Mpemba [27].

Las diferentes propiedades volumétricas del alcohol (espíritu de vino) según pueden ser puestas en evidencia observando la flotación o no de diversos objetos según su composición de agua. Ello permite discutir la graduación de los licores y el por qué el alcohol de uso farmacéutico es de 96 grados.

Las mezclas frigoríficas de Römer y Fahrenheit pueden ser asimismo objeto de experimentación, observando que ocurre cuando el hielo se mezcla con sal común, cloruro amónico, alcohol u otras sustancias como azúcar o vinagre.

La observación del punto de fusión del agua puede llevarse a cabo comparando por ejemplo el proceso de fusión del hielo con el de un helado y discutiendo si para las sustancias puras o mezclas el punto de fusión es único.

La variación de la temperatura de ebullición con la presión puede ser un objeto de discusión (con las debidas precauciones con el fuego) en un día de excursión a la montaña. También aquí se pueden comparar los datos de centros situados a distinta altitud. Aquí también la

ebullición en distintos tipos de recipientes o matraces puede ser objeto de observación.

La discusión sobre la escala Celsius puede ser un punto de debate sobre el sistema métrico, y por qué han permanecido las escalas decimales y centesimales en unidades como la longitud y el peso, pero no en otras como el tiempo o los ángulos.

Un termómetro de gas también puede ser construido sin mucha dificultad permitiendo repetir las observaciones de Amontons, e introduciendo la discusión en las leyes de los gases.

Los experimentos de Taylor con las mezclas de agua helada y en ebullición también ofrecen un abanico amplio de experimentación que permite profundizar en la distinción de los conceptos de calor, temperatura y capacidad calorífica.

La experimentación con altas temperaturas debe hacerse con suma precaución, si bien realizar muestras con arcillas y cocerlas en un horno casero puede ser un experimento sencillo de realizar. Otra sugerencia es la construcción de un dilatómetro utilizando distintos materiales obtenidos del reciclaje.

Construir un calorímetro de hielo es una tarea sencilla, en este caso es necesario hacer notar que dicho calorímetro debe constar de un doble recipiente, recogiendo el hielo fundido sólo en el recipiente interior.

La Ley del enfriamiento de Newton ofrece también un abanico amplio de experimentos, tanto con sólidos como con líquidos.

El efecto Seebeck puede ser puesto en evidencia utilizando una brújula de bajo coste y materiales de reciclaje y la variación de la resistencia con la temperatura es también sencilla de medir sin más que disponer de un tester.

En definitiva, las posibilidades son muchas, pueden realizarse en distintos contextos, la gran mayoría de ellas son susceptibles de ser propuestas como tarea de observación en casa, y todas ellas están dotadas de un alto valor pedagógico y motivador, reforzando la necesaria atención a la Física Experimental en las primeras etapas de la enseñanza.

XIII. REFERENCIAS

[1] Sherwood Taylor, F. *The origin of the thermometer*. Annals of Science **5**, 129-156 (1942).
 [2] Camufo, B; Bertolin, C., *The earliest temperature observations in the world. The Medici network (1654-1670)*, Climate Change **111**, 335-363 (2012).
 [3] Patterson, L. D., *Thermometers of the Royal Society. 1663-1768*, Am. J. Phys. **19**, 523-535 (1951).
 [4] Carrington Bolton, H. *Evolution of the Thermometer 1592-1743*, (Kessinger Pub. Rep, Easton, 1900).
 [5] Grigull, U., *Newton's temperature scale and the law of cooling*, Wärme und Stoffübertragung **18**, 195-199 (1984)

[6] French, A. P., *Isaac Newton's thermometry*, The Physics Teacher **31**, 208-211 (1993).
 [7] Soulen Jr., R. J., *A brief history of the development of temperature scales: The contribution of Fahrenheit and Kelvin*, Supercond. Sci. Technol. **4**, 696-699 (1991)
 [8] Romer, R., *Temperature scales: Celsius, Fahrenheit, Kelvin, Reaumur, and Römer*, The physics teacher **20**, 450-454 (1982).
 [9] Boyer, C., *Early principles in the calibration of thermometers*, Am. J. Phys. **10**, 176-180 (1942)
 [10] Beckman, O., *Anders Celsius and the fixed points of the Celsius scale*, Eur. J. Phys. **18**, 169-175 (1997).
 [11] James Lyons, W., *Inaccuracies in the textbook discussions of the ordinary gas laws*, Am. J. Phys. **6**, 256-259 (1938).
 [12] Barnett, M., *The development of thermometry and the temperature concept*, Osiris. **12**, 269-341 (1956).
 [13] Fenby, D., *Heat: its measurement from Galileo to Lavoisier*, Pure and Applied Chemistry **59**, 91-100 (1987).
 [14] Wisniak, J., *The Thermometer. From the feeling to the instrument*, Chem. Educator **5**, 88-91 (2000).
 [15] Knowles Middleton, W. E., *A History of the Thermometer and its use in Meteorology*, (The Jonh Hopkins University Press., USA, 1966).
 [16] Chang, H., *Inventing Temperature. Measurement and Scientific progress*, (Oxford University Press., USA, 2004).
 [17] Velasco, S., Fernández, C., *Un paseo por la historia de la termometría*, Revista Española de Física 46-56 Julio-Septiembre (2005).
 [18] Pellicer, J., Guilabert, M., López Baeza, W., *The evolution of the Celsius and Kelvin temperature scales and the state of the art*. J. Chem. Education **76**, 911-913 (1999).
 [19] Guilder, L. A., *The measurement of thermodynamic temperature*, Phys. Today. 24-31, December (1982).
 [20] Hall, J. A., *Fifty years of temperature measurement*, J. Sci. Instrum. **43**, 541-547 (1966).
 [21] Cardwell, D. S. L., *From Watt to Clausius: The rise of the Thermodynamics in the early industrial age*. History of Science and Technology Reprint Series, (Iowa State University Press., USA, 1989).
 [22] Truesdell, C., *The Tragicomical History of Thermodynamics*, (Springer, Netherlands, 1980).
 [23] Cropper, W. H., *Carnot function: The origin of the thermodynamic concept of temperature*, Am. J. Phys. **55**, 120-129 (1987).
 [24] J. de Boer, *Temperature as a basic physics quantity*, Metrología **1**, 158-169 (1965).
 [25] Pérez, J., *La Termodinámica de Galileo a Gibbs*, Manuales para la Historia de la Ciencia Vol. 9, (Ed. Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, Tenerife, 2006).
 [26] Loyson, P., *Galilean thermometer is not so Galilean*, J. Chem. Ed. **89**, 1095-1096 (2008).
 [27] Mpemba, E. B., Osborne, D. G., *Cool?*, Physics Education **4**, 172 (1969).