

resultado previo se demuestra que el campo magnético generado en el eje de un solenoide de perfil cuadrado sigue una dependencia lineal con la corriente de alimentación, al igual que ocurre con un solenoide de perfil circular. En segundo lugar, se demuestra que la fuerza que ejerce el campo generado por el solenoide sobre el imán permanente, colocado en su interior, es proporcional al producto del momento magnético del imán y el campo magnético producido por la bobina, e inversamente proporcional al espesor del imán, siendo este cilíndrico. De esta manera, colocando el imán sobre una báscula de precisión, se puede establecer una correlación entre la fuerza magnética y la lectura de la báscula de forma que es posible obtener el momento magnético del imán. Para corroborarlo, se ha medido por otra vía, a partir del campo magnético generado por él mismo en función de la distancia en eje, resultando un valor muy similar al obtenido por el método propuesto con la báscula y validando el procedimiento.

Agradecimientos

A mis compañeros Carlos Sánchez Azqueta y Claudio Carretero Chamarro, por las conversaciones que hemos tenido entorno a este trabajo, y a los dos revisores, por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Referencias

- [1] R. S. ELLIOT, *Electromagnetics: History, Theory, and Applications* (IEEE Press, Piscataway, 1993).
- [2] J. A. MOLINA-BOLIVAR y A. J. ABELLA-PALACIOS, "A Simple and Accurate Balance Measures Magnetic Field", *Physics Education* **46**, 517-518 (2011)
- [3] Ch. T. CHIA y Y. T. WANG, "The Magnetic Field Along the Axis of a Long Finite Solenoid", *Physics Teacher* **40**, 288-289 (2002).
- [4] J. M. CAMACHO y V. SOSA, "Alternative Method to Calculate the Magnetic Field of Permanent Magnets with Azimuthal Symmetry", *Revista Mexicana de Física E* **59**, 8-17 (2013).

Enseñanza del concepto de temperatura en ESO y Bachillerato. ¿Qué miden los termómetros?

Manuel Alonso Orts

Institute of Solid State Physics, University of Bremen,
28359, Bremen (Alemania)



Manuel Alonso Sánchez

Sección Local de Alicante de la RSEF



Se presenta una propuesta didáctica para desarrollar el concepto de temperatura en ESO y Bachillerato. En ella se incluyen varios experimentos que pueden ayudar a que el alumnado reflexione sobre el principio cero de la termodinámica, el concepto de calor específico, el cero absoluto, etc. En el transcurso de estas actividades se utilizan distintos termómetros, sobre cuyo principio físico de medida y relación con la temperatura no se suele reflexionar en clase. En el presente artículo se explican tres de esos termómetros (de líquido, pirómetro y termistor), con experimentos adicionales para comprender mejor su uso. Yendo un paso más allá de esos termómetros ya establecidos, el artículo finaliza enlazando con la investigación actual en el área de nanotermometría luminiscente, donde se estudian materiales de tamaño nanométrico cuya emisión de luz (luminiscencia) depende de la temperatura y, por tanto, se pueden calibrar como termómetros a esa ínfima escala, con relevantes aplicaciones médicas e industriales.

1. Introducción

La temperatura es una magnitud escalar fundamental de la Física con la que se trabaja desde los niveles más tempranos en la enseñanza. Sin embargo, en estos niveles es habitual que apenas se entre en clase en detalles sobre su significado físico. Los materiales de enseñanza de la ESO y el Bachillerato (como libros de texto, guías de prácticas, etc.) tampoco suelen dedicar apenas espacio a interpretar este concepto.

La parte inicial de este artículo mostrará que se puede mejorar esta situación incorporando, en varios momentos en los que se estudian hechos donde la interviene la temperatura, desarrollos básicos sobre su significado e interpretación. Al hacerlo surgen en clase preguntas (por ejemplo: ¿qué miden realmente los termómetros?), cuyo abordaje resulta muy instructivo y en algún caso conecta con aspectos de la investigación y del desarrollo científico-tecnológico.

Una vez el alumnado es más consciente del concepto de temperatura y conoce el fundamento de algunos termómetros de su alrededor, cabe plantear la cuestión de si podemos desarrollar algún sistema para medir temperaturas de entidades muy pequeñas, como, por ejemplo, células humanas. En respuesta a ella, en la parte final del artículo se introducirá someramente un área de investigación actual de mucho interés: la nanotermometría luminiscente.

2. Desarrollos muy básicos que conviene hacer en clase sobre el concepto de temperatura

2.1. Motivación inicial

Antes de empezar a trabajar sobre el concepto de temperatura se puede preguntar en clase (en 2.º/3.º ESO) cómo se cree que evolucionará la de un cuerpo, como, por ejemplo, una *pizza*, que se ha sacado de un horno caliente y se deja enfriar encima de un plato. Para tener una mayor concreción en la respuesta se pide dibujar una posible gráfica de la evolución de la temperatura de esa *pizza* con respecto al tiempo.

El alumnado de estas edades sabe perfectamente que fuera del horno la temperatura de la *pizza* disminuye, pero carece de bastantes conocimientos que son necesarios para hacer una previsión correcta de cómo se produce esa disminución. La mayoría dibuja una gráfica errónea que plantea un decreci-

miento lineal y que no tiene en cuenta que el enfriamiento ocurre en un lugar cuya temperatura ambiente está bastante por encima de 0 °C. Esta gráfica errónea (figura 1) es muy útil para propiciar más adelante una situación de conflicto cognoscitivo comparándola con una gráfica real obtenida empíricamente.

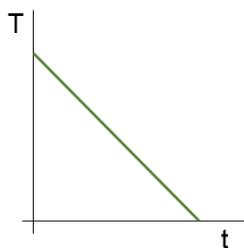


Fig. 1. Hipótesis (errónea) del alumnado de ESO sobre la evolución de la temperatura en el proceso de enfriamiento de una *pizza* salida del horno.

2.2. Temperatura de varios objetos en un recinto cerrado

Se puede comenzar a introducir el concepto de temperatura planteando el problema de cómo medir la de varios objetos del laboratorio, estando este con las ventanas y puertas cerradas. Por ejemplo: la temperatura de una cierta cantidad de agua vertida en un recipiente, la de una de las mesas del laboratorio, la del “propio laboratorio” (del aire contenido en él), etc. Los estudiantes se dan cuenta de que para hacer estas mediciones necesitan usar diferentes tipos de termómetro, que se les proporciona a medida que lo solicitan: un termómetro de inmersión (de líquido) o un sensor de temperatura sumergible para medir la temperatura del agua; un termómetro de infrarrojos (existen aplicaciones descargables, como *Oblumi tapp termómetro*) para medir la temperatura de las mesas y la de las paredes; el termómetro de líquido que cuelga en la pared para medir la temperatura del aire, etc. En este momento los termómetros se usan acríticamente; habrá que esperar a que se hayan adquirido conocimientos básicos sobre la temperatura para poder describir su funcionamiento y hablar también sobre su importancia, tanto para la sociedad, como en la investigación científica.

Tras hacer mediciones y compartir resultados, produce sorpresa en clase el hecho de que (dentro del margen de imprecisión de las medidas) la temperatura de todos los objetos sea la misma, siempre que se den unas determinadas condiciones que se han de controlar, como, por ejemplo, que ninguno haya estado expuesto al sol, o esté cerca de un radiador encendido, etc.

Dicha igualdad de temperaturas entre los objetos anteriores es un hecho fundamental que ayuda a introducir el concepto de equilibrio térmico, para lo cual se empieza poniendo en evidencia que todos ellos están en contacto entre sí (las paredes están en contacto con el aire, este con la mesa y con la superficie superior de la masa de agua, el agua está en contacto con recipiente que la contiene y él con la mesa, etc.). Seguidamente, se plantea el principio cero de la termodinámica: Si dos sistemas A y B están en equilibrio térmico con un tercer sistema C, entonces los sistemas A y B estarán en equilibrio térmico entre sí. De él se deriva lo anteriormente medido en el laboratorio y, en términos más generales, el concepto de que cuando varios objetos tienen contacto durante un tiempo suficientemente prolongado y, al mismo

tiempo, están aislados del exterior terminan alcanzando un estado de equilibrio térmico en el que comparten el valor de una propiedad a la que llamamos temperatura.

2.3. Carácter intensivo de la temperatura

Después de haber comprobado que varios objetos en equilibrio térmico tienen la misma temperatura, se plantea si esa temperatura depende de la masa del objeto en cuestión. Para comprobarlo se puede repartir la cantidad inicial de agua en varios recipientes y medir la temperatura de cada porción. Se constata así que esta propiedad es intensiva, es decir, su valor no depende ni del material del que estén formados los objetos ni tampoco del tamaño o la cantidad de estos.

Es entonces un buen momento para introducir el concepto de sistema y señalar que se puede adoptar como tal, por ejemplo, a toda el agua del recipiente, o, si resulta más conveniente, a diferentes porciones de ella, etc. Se aclara que un sistema puede estar o no aislado y se ilustra viendo que en este experimento el agua no lo está y que el laboratorio, en cambio, se ha cerrado para considerarlo aislado, aunque esta es una aproximación razonable que conviene hacer, pero no es estrictamente cierta (obviamente el cerramiento de puerta y ventanas, la bajada de persianas, etc., no se traduce en un verdadero aislamiento térmico).

2.4. Evolución de sistemas en contacto hacia el equilibrio térmico

Tras las disquisiciones anteriores conviene realizar algunas actividades prácticas, estudiando la evolución de la temperatura de sistemas aislados, en contacto con el ambiente, en contacto unos con otros, etc.

Se plantea, en primer lugar, cómo se podría tener a un sistema aislado con una temperatura constante, distinta de la de su entorno. Los estudiantes suelen proponer que se caliente o enfríe agua y se guarde en un recipiente adecuado (un termo, una cantimplora, etc.). Entonces, se les insta a comprobar que la temperatura de una masa de agua “fría” o “caliente”, depositada en el interior de un calorímetro, permanece inalterada durante mucho tiempo.

Una segunda actividad práctica que conviene realizar es el estudio de la evolución de las temperaturas, inicialmente distintas, de dos masas de agua, caliente y fría, también dentro del calorímetro. Se pueden usar termómetros de inmersión ordinarios o sensores conectados a un ordenador para medirlas a intervalos regulares de tiempo y construir las correspondientes gráficas, que muestran que tales temperaturas van confluyendo hacia una temperatura de equilibrio, diferente a la del laboratorio (figura 2).

En el primer ciclo de ESO este trabajo práctico tiene un desarrollo muy cualitativo, pero no por ello es menos útil para plantear varias cuestiones importantes, como, por ejemplo: ¿de qué factores depende la temperatura de equilibrio térmico, y el tiempo que tarda en alcanzarse, entre las dos masas de agua? ¿cómo influye cada uno de ellos?, ¿qué proceso ocurre entre dichas masas de agua cuando, teniendo contacto, evolucionan hacia el equilibrio térmico? Ir trabajando sobre ellas permite profundizar en el concepto de temperatura, contribuyendo a que se vaya asimilando la idea de que si dos partes de un sistema entran en contacto térmico es probable que ocurran cambios en las propiedades de am-

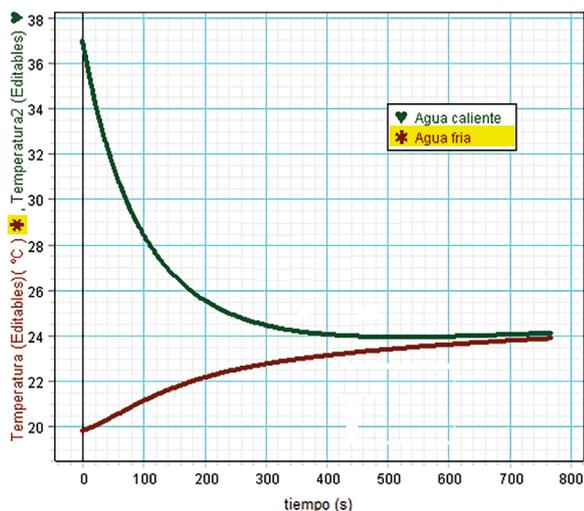


Fig. 2. Gráficas empíricas de la evolución de las temperaturas de dos masas de agua caliente y fría obtenidas por estudiantes en el IES Leonardo da Vinci de Alicante. La temperatura de equilibrio resultó ser 24 °C, mientras el termómetro del laboratorio registraba 20 °C.

bas. Estos cambios se deben a la transferencia de energía en forma de calor entre las partes y el sistema estará finalmente en equilibrio térmico cuando ya no haya intercambio neto de energía en forma de calor entre sus partes.

En Bachillerato a estos aspectos se les añaden algunos desarrollos formales, llegando a aplicar las leyes matemáticas del calentamiento y del enfriamiento.

2.5. Evolución de un sistema hacia la temperatura ambiente

En este momento ya se tienen los conocimientos requeridos para tratar la cuestión que se preguntó al inicio e interpretar el enfriamiento de la *pizza* como un caso particular de evolución hacia el equilibrio térmico de dos sistemas en contacto: la *pizza* y el aire de la habitación. Dicho aire también está en contacto con otros muchos sistemas (las paredes, el mobiliario) y, por ello, es razonable despreciar su calentamiento frente al enfriamiento de la *pizza* o, lo que es equivalente, plantear, a modo de hipótesis, que la temperatura de la *pizza*, al enfriarse, tenderá hacia la de la habitación.

Para contrastar esta hipótesis conviene estudiar experimentalmente un ejemplo análogo y fácilmente realizable en clase, por ejemplo, el enfriamiento de una masa de “agua caliente” en el laboratorio (figura 3).

Cuando se realiza el experimento anterior interesa observar que el enfriamiento del agua es un proceso muy lento. Vemos en el ejemplo mostrado que pasaron unas 3 horas hasta que la masa de agua, que apenas llenaba medio matraz, alcanzó la temperatura del laboratorio.

Sabiéndolo se puede enriquecer el experimento y analizar simultáneamente la curva de enfriamiento de un sensor que se deja sumergido en el agua y la de otro sensor calentado en la propia agua, pero dejado al aire (figura 4). El sensor al aire (curva de color verde) se enfría muy rápidamente y el sensor en el agua (curva de color rojo) lo hace mucho más lentamente. Nótese que en la curva verde se observa también que el aire del laboratorio (y el sensor, que enseguida alcanza el equilibrio térmico con él) se fue calentando poco a poco, confirmando que el laboratorio entero (estuvo vacío durante la mayor parte de ese tiempo) no es un sistema perfectamente aislado.

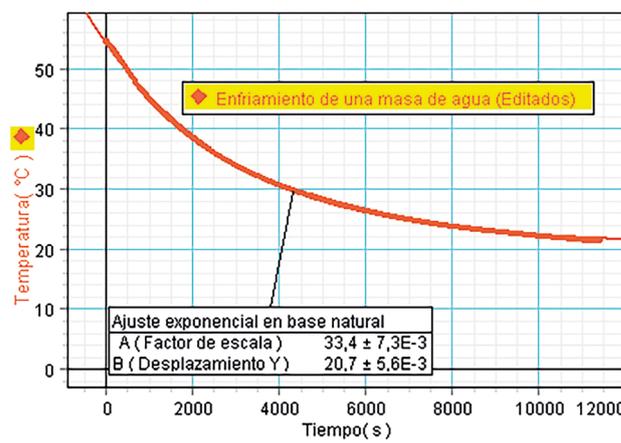


Fig. 3. Gráfica del enfriamiento de una masa de agua caliente, obtenida por estudiantes de Bachillerato del IES Leonardo da Vinci de Alicante. Midieron dicha temperatura con un sensor sumergible y comprobaron que se ajusta bastante fielmente a una ley de decrecimiento exponencial, tendiendo asintóticamente hacia la temperatura ambiente del laboratorio (unos 21 °C).

Es un bonito ejemplo, en el que puede verse que tres sistemas (agua, sensor y aire de laboratorio) evolucionan hacia el equilibrio térmico entre ellos, aunque su ritmo de evolución es distinto.

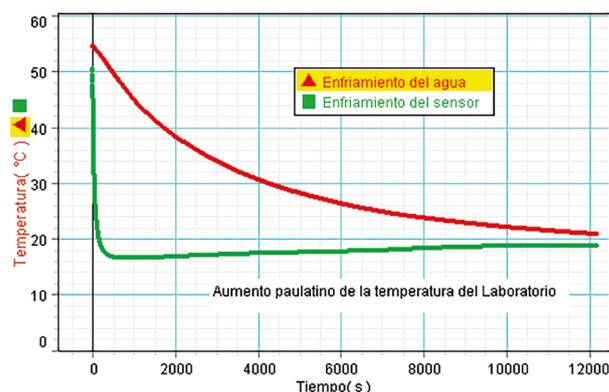


Fig. 4. Gráficas comparativas del enfriamiento del agua y del enfriamiento de un sensor que se saca del agua al principio del experimento y se deja al aire.

2.6. Calor específico

Llegados aquí se plantea la cuestión de qué es lo que ocurre entre dos sistemas en contacto que evolucionan hacia el equilibrio térmico. Para los estudiantes es sencillo de imaginar que entre ellos se transfiere energía y que esta fluye desde el sistema que inicialmente tiene mayor temperatura hacia el que inicialmente tiene menor temperatura. Resultados como los del experimento anterior enseñan además que esa transferencia de energía no se produce con la misma facilidad ni con la misma rapidez para diferentes objetos o materiales.

Planteamos entonces de qué factores cabe suponer que dependa la cantidad de energía emitida o absorbida por un cuerpo en forma de calor, Q . La discusión realizada en clase a partir de las hipótesis formuladas por los estudiantes sobre esta cuestión permite introducir la expresión, $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$, donde m es la masa del cuerpo, ΔT la diferencia entre su temperatura y la del entorno, y c una constante, necesaria para distinguir la respuesta térmica de unos materiales con res-

pecto a otros, a la que llamamos capacidad calorífica específica o calor específico. Indica la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad.

El calor específico tiene muchas implicaciones en la vida cotidiana y puede ser interesante detenerse a comentar alguna de ellas, por ejemplo: la brisa marina. Como se sabe, a lo largo del día, según aumenta la temperatura de la tierra costera, esa tierra va calentando al aire situado encima por convección, con lo que dicho aire se expande y disminuye la presión encima de esa tierra de la costa. En cambio, el aire situado encima del mar tiene una presión más alta, porque, al ser la capacidad calorífica del agua mucho mayor, dicha agua se calienta mucho más lentamente y también calienta menos a ese aire. Esa diferencia de presión hace que fluya aire durante el día desde el mar hacia la tierra. Durante la noche, mientras se enfrían la tierra costera y el agua, la brisa se produce en sentido opuesto.

Para terminar este apartado, consideramos que conviene enriquecer la propuesta didáctica intercalando algunas actividades que se destinen específicamente a contribuir a que los estudiantes diferencien claramente entre los conceptos de calor y temperatura, cuya no distinción es una concepción ampliamente extendida [1].

2.7. Temperatura y modelo cinético-corpúscular de los gases

Hasta este momento nos hemos ido aproximando al concepto de temperatura relacionando esta magnitud únicamente con el concepto de equilibrio térmico. Nada se ha visto aún sobre el significado más profundo que tiene esta propiedad de la materia en relación con la estructura íntima de la propia materia.

El primer gran avance histórico en el conocimiento de la estructura interna de la materia vino de la mano de estudios realizados en la segunda parte del siglo XVII sobre del comportamiento físico de los gases. Los temas sobre estructura interna de la materia que se imparten en 4.º ESO y/o en 1.º de Bachillerato tienen esto en cuenta y suelen comenzar con un estudio de sus propiedades físicas, ya que el estado gaseoso es aquel en el que la materia tiene un comportamiento más sencillo de describir mediante la termodinámica.

Se puede organizar ese inicio preguntando de qué factores (y de qué modo), cabe esperar, que dependa la presión ejercida por un gas encerrado. Este punto de partida ayuda a introducir tentativamente las leyes de Boyle y Gay-Lussac y a ir desarrollando el modelo cinético-corpúscular, aplicado a los gases. Se interpreta la ley de los gases ideales, $PV = Nk_B T$, y, con ella, las variables de estado macroscópicas: presión, P , volumen, V , y temperatura, T , en base al modelo (además de especificar que N es el número de moléculas o átomos y k_B la constante de Boltzmann). Así, se relaciona la presión con la cantidad de choques que tienen las partículas del gas con el recipiente y con su intensidad, y la temperatura con la energía cinética media de traslación de dichas partículas.

Es importante conectar el concepto de temperatura que emerge del modelo cinético-corpúscular de los gases con algunas cuestiones vistas anteriormente sobre esta magnitud. Entre otras: a) El hecho de que la temperatura se relacione con la energía cinética media de las partículas del gas es coherente con que sea una magnitud intensiva; b) La temperatura

de un gas se relaciona con las energías de traslación de las moléculas, pero no con las de rotación, que tienen los gases no monoatómicos (un valor mayor o menor de la energía cinética de traslación de una molécula gaseosa implica una mayor o menor intensidad con la que puede chocar con el recipiente; en cambio, una mayor o menor velocidad de rotación no).

2.8. El cero absoluto y la estructura interna de la materia

Entre los experimentos que se pueden realizar sobre las leyes de los gases resulta de particular interés para continuar avanzando en el desarrollo del concepto de temperatura uno sobre la segunda ley de Gay-Lussac, que permite introducir a este nivel el cero absoluto.

Comienza fundamentando sobre el modelo cinético-corpúscular de los gases la hipótesis de que, al ir aumentando la temperatura de un gas (para un número de partículas y un volumen constantes), ha de aumentar la presión absoluta que ejerce sobre el recipiente que lo encierra. Para contrastarla se sumerge un matraz al baño maría en un vaso con agua y se calienta esta agua con una resistencia sumergible. Se conecta un sensor de presión al matraz y en el agua se introduce otro de temperatura (figura 5).



Fig. 5. Montaje experimental para estudiar la segunda ley de Gay-Lussac [2].

La figura 6 muestra resultados de este experimento, obtenidos por estudiantes de Bachillerato en la *ikastola* Pasaia-Lezo en Guipúzcoa [2]. Como se observa, realizaron un ajuste lineal sobre los valores empíricos (puntos de color naranja en la gráfica de la figura 6) y pudieron comprobar que es muy razonable aplicar la segunda ley de Gay Lussac al aire dentro del rango de valores de presión y de temperatura que habían considerado. Se les planteó entonces qué ocurriría con la temperatura al extender estos resultados a un rango de presiones cada vez menores. Esta conjetura ayuda a que emerja la idea de que en el caso límite de que la presión, P , llegara a ser cero, la temperatura alcanzaría un valor mínimo, por debajo del cual no debería existir ningún otro valor de esta magnitud. Se usó el *software* del programa para prolongar la gráfica empírica buscando esa temperatura mínima y se comprobó que el punto de corte con el eje de temperaturas de esa línea recta prolongada era próximo a los teóricos $-273,15\text{ °C}$ del cero absoluto.

Por supuesto, al realizar esta actividad se aclara que estas disquisiciones no tienen en consideración cuál es el com-

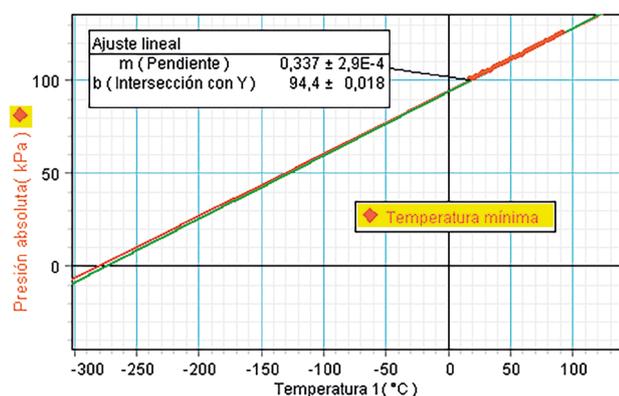


Fig. 6. Búsqueda de la temperatura mínima, prolongando la gráfica empírica $P = f(T)$ de un gas.

portamiento auténtico de la materia cerca del cero absoluto. Evidentemente, a esa temperatura no estaría, ni mucho menos, en estado gaseoso. Los alumnos lo saben bien, porque cuando se desarrolla en clase el modelo cinético-corpúscular se precisa el campo de aplicabilidad del modelo de gas ideal. Las eventuales interacciones que pueda haber entre las partículas se asimilan en dicho modelo a meros choques elásticos, lo que únicamente es aceptable mientras esas partículas mantengan su movimiento y sean diminutas en comparación con las distancias medias que las separan. Estas condiciones dejan de cumplirse cuando el gas se comprime de forma apreciable y/o cuando se enfría en exceso.

En el tema sobre el modelo cinético-corpúscular se trabaja también la cuestión de cómo trasladar un modelo similar a sólidos o a líquidos. Sobre los sólidos se explica que sus átomos están enlazados entre sí, formando una estructura ordenada, y vibrando alrededor de sus posiciones de equilibrio. Su temperatura se relaciona con la energía media de estas vibraciones, que es proporcional al cuadrado de la amplitud de oscilación en el régimen clásico. Sin embargo, conviene advertir que la explicación es más compleja en ciertos regímenes, una vez hay que considerar la mecánica cuántica¹. En cuanto a los líquidos, se explica que tienen una estructura intermedia con la que, además de vibrar, grupos de partículas se pueden desplazar ocupando huecos alternativamente. Así se entiende que los líquidos se adaptan a la forma del recipiente, que, en general, se puedan mezclar con facilidad, etc.

3. Cómo funcionan y qué miden algunos termómetros

El conjunto de desarrollos anteriores ayuda a que a lo largo de la ESO y el Bachillerato se vaya instalando un concepto de la temperatura que, como hemos visto, se basa en el principio cero de la termodinámica y se interpreta como una propiedad de la materia que se puede relacionar con su estructura interna a través del modelo cinético-corpúscular. Esta definición no es completa (no se llega, por ejemplo, a la definición formal de la temperatura que puede establecerse en términos de la segunda ley de la termodinámica) pero es suficiente

1 El modelo cuántico vibracional del sólido trata a los átomos de un sólido como osciladores armónicos acoplados con energía cuantizada. Al aumentar la temperatura, aumenta la energía promedio de los osciladores acoplados, pero esto no tiene por qué traducirse en un aumento de la amplitud de sus oscilaciones.

para tratar la mayoría de los aspectos físicos que se estudian en estas etapas involucrando a esta magnitud.

Podemos ahora avanzar un paso más y lanzar al aire algunas preguntas que hemos pasado por alto en el camino. Empezando por la siguiente: ¿cómo hemos estado midiendo la temperatura?, ¿qué miden realmente los termómetros? Para los estudiantes resulta evidente que ninguno de los que han usado mide la velocidad promedio de los trillones de moléculas de gas o la vibración de los átomos que forman un sólido. También saben que la temperatura indicada por algunos de esos termómetros se obtiene a partir de la medición de otra magnitud física que depende de ella. Por tanto, el punto de partida para su estudio va a ser plantear cuál es esa magnitud e incidir en que, para que pueda usarse en termometría, tal magnitud ha de tener una relación empírica y reproducible con la temperatura del sistema que se quiere medir.

3.1. Termómetro de líquido

En Secundaria se trata en más de una ocasión la dilatación de los líquidos, la cual ahora procede interpretar a partir del modelo cinético-corpúscular de la materia. Asimismo, es importante informar en este punto del uso histórico de mercurio por ser uno de los únicos elementos de la tabla periódica en estado líquido a temperatura ambiente y más allá (hasta 365 °C en condiciones atmosféricas), aunque, desde 2009, la normativa nacional ha restringido severamente su uso debido a su toxicidad, sustituyéndose por otros líquidos como el etanol.

En clase se puede construir un termómetro casero de líquido que, básicamente, es una botella cuyo tapón se perfora para colocar una pajita [3]. Dentro de la botella se vierte agua o alcohol con unas gotitas de colorante. Este líquido asciende por la pajita cuando se calienta y desciende cuando se enfría, lo que ocurre, por ejemplo, al sumergir la base de la botella en un recipiente con agua caliente o fría, o al rodearla con las manos. Para las experiencias cuantitativas el termómetro casero se calibra con otro termómetro patrón (figura 7).

3.2. Pirómetro de infrarrojo

La población en general está muy familiarizada con los termómetros de infrarrojo (IR), que, por ejemplo, fueron usados masivamente para tomar la temperatura corporal de las personas en grandes recintos durante la pandemia. Muchos estudiantes también son conscientes de la disponibilidad de aplicaciones de termometría para móviles y, de hecho, las han usado en las actividades iniciales ya comentadas para obtener temperaturas de objetos sólidos, como el mobiliario del laboratorio. Estos termómetros de IR son una clase de los llamados pirómetros, que miden la temperatura superficial de un objeto a partir de la radiación térmica que emite.

Si bien hay varios tipos de pirómetros, que difieren en su principio de medida, el fenómeno físico del objeto medido en que se basan estos aparatos, la radiación térmica (llamada incandescencia, cuando es visible), se puede enseñar con bastante rigor en 2.º de Bachillerato, donde se tratan conceptos adecuados para ello de óptica, de electromagnetismo y de introducción a la física cuántica. Con esos conceptos en la mano se explica que todos los cuerpos emiten radiación térmica (es decir, radiación electromagnética generada por el movimiento térmico de las partículas cargadas que poseen),



Fig. 7. Calibración de un termómetro casero de líquido [3].

la cual suele hallarse en el rango espectral IR, salvo en el caso de cuerpos muy calientes, que emiten también luz visible y ultravioleta. Un cuerpo que absorbe toda la energía radiante incidente se denomina cuerpo negro y la radiación que emite presenta un espectro continuo característico que depende únicamente de su temperatura, según la ley de Planck. Aunque los objetos reales no se comportan como cuerpos negros ideales, el modelo del cuerpo negro es una buena descripción de muchos de ellos, a los que se les puede realizar correcciones a partir de su emisividad, es decir, de la fracción de radiación electromagnética que emiten.

Interesa analizar en clase la gráfica de la emisión característica del cuerpo negro (figura 8), que pone en evidencia que la radiación térmica tiene su máximo de emisión a una determinada frecuencia, la cual se desplaza a valores mayores a medida que aumenta la temperatura del cuerpo emisor (Ley de Wien).

Para alcanzar estas temperaturas en clase se puede usar una bombilla tradicional de filamento, que, cumpliendo la ley de Wien, va emitiendo luz de un color que guarda relación con la temperatura que va adquiriendo desde que se conecta. El alumnado puede comprobar que al principio se observa una emisión roja, según sube la temperatura la luz emitida empieza a tomar tonos amarillos, y, cuando se alcanzan unos 2800 K, se convierte en luz blanca. Entonces ya es idónea para alumbrar e iluminar espacios cerrados, aunque, como vemos en la figura 8, la mayor parte de la radiación que emite no es luz visible, con los efectos que ello tiene en su eficiencia energética.

Para tratar sobre estos conceptos también es muy interesante construir un electroscopio casero (figura 9) [4] y

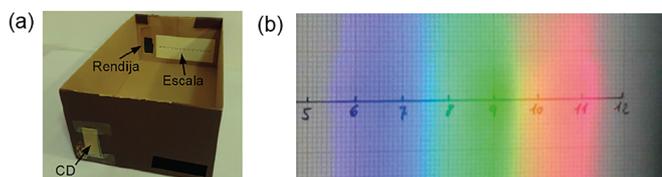


Fig. 9. (a) Espectroscopio casero construido por estudiantes de 2º Bachillerato [4] (b): Espectro de una bombilla incandescente obtenido con el espectroscopio casero.

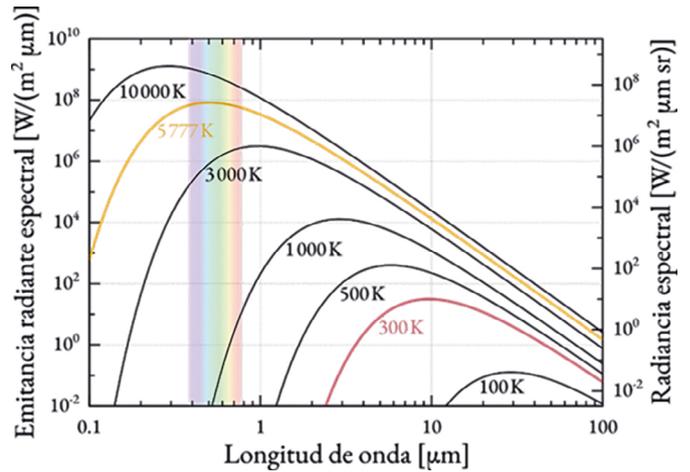


Fig. 8. Radiación de cuerpo negro para temperaturas entre 100 K y 10 000 K. En la gráfica se indica el rango visible, con sus colores característicos, como guía. La curva amarilla muestra la emisión del Sol a 5777 K, que podemos ver con nuestros ojos, mientras que la curva roja muestra la emisión correspondiente a los cuerpos a temperatura ambiente (300 K), que cae en el infrarrojo.

estudiar con él la emisión de la bombilla en función de su temperatura.

Con todo esto el alumnado de Bachillerato puede entender básicamente el funcionamiento de un pirómetro. Para niveles inferiores también se puede trasladar una parte de estos conceptos mostrando de forma cualitativa la emisión térmica de la bombilla de filamento.

3.3. Sensor de temperatura sumergible: termistor

Muchos laboratorios escolares disponen de sensores de temperatura sumergibles que utilizan un termistor NTC para medirla. El termistor aprovecha la dependencia (cuantificable) de la resistencia eléctrica de un material con la temperatura. Como indican sus siglas (*negative temperature coefficient*), en un termistor NTC su resistencia eléctrica disminuye (de manera exponencial) al aumentar la temperatura.

Un análisis en profundidad de la dependencia térmica de la resistividad del material semiconductor en el que se basa un termistor NTC excede al nivel de ESO y Bachillerato, pero se puede mostrar el fenómeno de forma cualitativa usando argumentos tales como la mayor activación de portadores de carga (electrones o huecos, según el tipo de semiconductor) a mayor temperatura, que se pueden desligar de su átomo. Un mayor número de portadores de carga libres implica una mayor corriente eléctrica, como conoce el alumnado de Bachillerato a través de la ecuación $I = nq_e v A$, en la que I es la corriente, n la densidad de portadores de carga, q_e la carga del electrón, v su velocidad, y A la sección transversal del material.

Una nota histórica, de la que conviene informar, es el hecho de que la observación de este efecto, que es una de las propiedades que definen a un semiconductor, la realizó Michael Faraday en 1833, abriendo la puerta al estudio de estos materiales a fecha de hoy ubicuos en la electrónica (chips de transistores, etc.) y la optoelectrónica (LEDs, etc.).

Una vez vista una forma de abordar la explicación de los fenómenos físicos en los que se basan tres de los principales termómetros que se puede encontrar el alumnado, vamos a dar un último paso y plantear la siguiente cuestión: ¿Cuál

es la utilidad de medir la temperatura de entidades tan pequeñas como una célula, que ni siquiera podemos ver con nuestros ojos, y qué podemos usar para hacer una medida tan desafiante?

4. Termometría a muy pequeña escala

En esta última sección vamos a conectar someramente con el mundo de la micro- y nanotecnología, cuyo abordaje se puede introducir llamando la atención sobre la importancia y necesidad creciente en la sociedad actual de medir temperaturas a muy pequeña escala.

En este sentido, cabe referirse al hecho de que el tamaño de los componentes electrónicos utilizados en la industria y en nuestro día a día se ha reducido exponencialmente. Así lo expresa la *ley de Moore*, que describe la comercialización de dispositivos electrónicos funcionales cada vez más compactos, junto con un inevitable aumento de la densidad de potencia en los mismos. Si el dispositivo opera a mayor temperatura de lo deseable, su rendimiento (por ejemplo, su resistencia eléctrica) no será el esperado. Además, una temperatura local mayor que la tolerancia térmica del dispositivo dará lugar a una degradación indeseada del mismo. Por ello existe una gran necesidad de medir la temperatura a escalas cada vez menores en estos dispositivos [5].

El control de la temperatura a pequeñas escalas es también fundamental en un ámbito completamente distinto del anterior, como es el de la medicina. Se considera que la medición de la temperatura a escala celular permitirá comprender y tratar mejor diversas enfermedades, en particular varios tipos de cáncer, porque ayudará a conocer con mayor detalle procesos metabólicos y bioquímicos que ocurren en el interior de las células tumorales. Esta información es clave para la detección temprana de estas enfermedades y para prevenir complicaciones. Además, puede ayudar en el desarrollo de terapias más efectivas y personalizadas para cada paciente [6].

4.1. Termometría luminiscente en tamaños micro- y nanométricos

Un campo de investigación actual, cuyos avances van en la dirección de poder medir temperaturas a escalas micro y nanométricas, es la termometría luminiscente.

La luminiscencia puede ser explicada en términos muy básicos en Bachillerato. Con los conceptos de óptica y de introducción a la física cuántica que se estudian en esta etapa, se puede entender bastante bien este proceso en el que determinadas sustancias pueden emitir luz visible cuando adquieren energía, a través de radiación electromagnética (fotoluminiscencia), de una corriente eléctrica (electroluminiscencia) o por otros medios. Si se compara con la incandescencia, vista anteriormente, se comprende que ahora el origen de dicha emisión de luz visible no es térmico (se produce a cualquier temperatura) y que se debe a la desexcitación de electrones que han sido previamente excitados a niveles o bandas de energía superiores (figura 10).

Ahora bien, que el origen de la emisión luminiscente no sea térmico no impide que las propiedades de la luz emitida por este mecanismo sí sean dependientes de la temperatura. Esto, que es fundamental para el tema que nos ocupa, se puede ilustrar en clase dando a conocer con más detalle algún ejemplo concreto, como puede ser el caso del rubí, una de

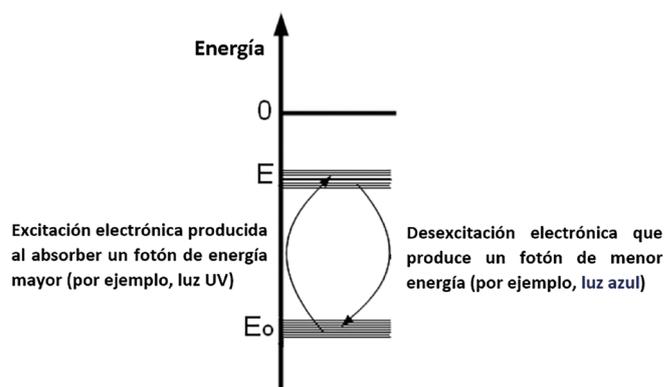


Fig. 10. Esquema elemental simplificado de un proceso luminiscente.

las cuatro gemas preciosas, bien conocida por su alto valor en joyería. Su característico brillo rojo e intenso no se debe a una reflectancia especialmente intensa en el rango espectral rojo, sino a la reemisión en ese color de la radiación visible y ultravioleta absorbida por el material.

Los niveles electrónicos responsables del color rojo del rubí provienen del cromo presente en la red cristalina del óxido de aluminio. Debido a que son transiciones directas provenientes de niveles electrónicos de iones Cr^{3+} individuales, las dos transiciones dominantes, llamadas R_1 y R_2 , están muy bien definidas espectralmente: a temperatura ambiente, sus longitudes de onda asociadas son 694,3 nm y 692,8 nm, respectivamente (como anticipábamos, en el rango rojo del espectro visible). Pues bien, la intensidad relativa entre ambas transiciones ópticas, su longitud de onda de emisión, su anchura espectral, o su tiempo de vida dependen de la temperatura y, de hecho, dicha dependencia se puede representar cuantitativamente mediante modelos teóricos y/o a partir de medidas experimentales. Por ejemplo, a bajas temperaturas, el nivel de menor energía de los dos (es decir, el que da lugar a la emisión a mayor longitud de onda, según la ecuación $E = hc/\lambda$) estará más poblado de electrones excitados, mientras que, según aumente la temperatura, aumentará la intensidad relativa de emisión de luz procedente del nivel de mayor energía, pudiéndose modelar la población electrónica en ambos niveles mediante la estadística de Boltzmann [6, 7].

Por tanto, si se sintetizan nanoestructuras de rubí, o de cualquier otro fósforo cuya emisión esté bien definida, y se calibra su respuesta frente a la temperatura medida por un termómetro convencional [8], se podrán insertar esas nanoestructuras en un sistema de tamaño micro-/nanométrico y medir la temperatura de ese sistema (inaccesible para un termómetro convencional) a partir alguno de los parámetros anteriormente mencionados de su emisión óptica: intensidad relativa, longitud de onda de emisión, anchura espectral y/o tiempo de vida. Es decir, se habrá construido un termómetro luminiscente con capacidad de medir temperaturas a esas ínfimas escalas.

Dado el potencial de la nanotermometría luminiscente en medicina, además de explicar estas cuestiones, conviene plantear en el aula qué requerimientos adicionales hay que imponer al nanomaterial del que está compuesto el termómetro para que pueda ser introducido en un organismo vivo. Algunas respuestas clave son: el material ha de ser biocompatible y seguro para nuestro cuerpo; debe operar en las

ventanas biológicas (rangos espectrales accesibles para la luz en el cuerpo humano, es decir, donde no sea absorbida por nuestros tejidos), etc. [6].

Después de haber visto el contexto de la nanotermometría luminiscente y dado el ejemplo anterior del rubí como emisor de luz dependiente de la temperatura, vale la pena mostrar algún ejemplo paradigmático de la prometedora investigación que se está realizando en este campo. En la figura 11 puede verse el uso de nanopartículas de fluoruro de lantano dopado con neodimio en el tratamiento de tumores en ratones. En esta investigación [9] se calentaron las células tumorales, donde habían inoculado previamente las nanopartículas, mediante un láser. Dicho calentamiento es superior al que se produciría mediante un tratamiento convencional de fototerapia, es decir, calentando las células con el láser sin haber inoculado las nanopartículas. Al mismo tiempo, la presencia de las nanopartículas luminiscentes permite la monitorización del calentamiento celular, que es distinto al calentamiento de la piel adyacente al órgano tumoral. En este caso se midió la temperatura a partir de la intensidad relativa entre las dos transiciones R del ion luminiscente (Nd^{3+}) en las nanopartículas, que en el rango de medida se pudo ajustar a una relación lineal.

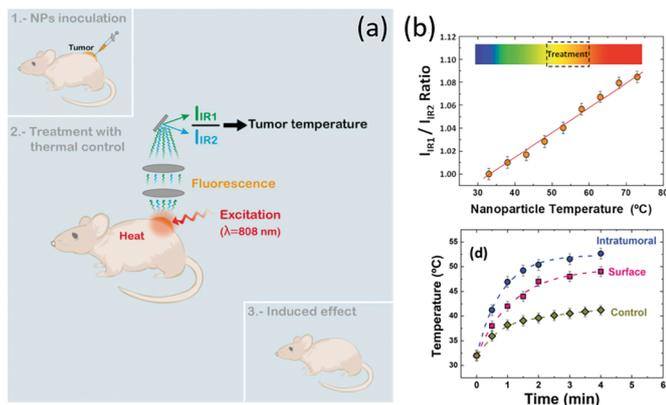


Fig. 11. (a) Esquema del proceso llevado a cabo para aumentar y medir la temperatura en tumores de ratones. Primero se inocula las nanopartículas luminiscentes. Luego se irradia la zona tumoral, logrando tanto calentar como monitorizar la temperatura de las nanopartículas y, por tanto, de las células del ratón. El efecto deseado es la eliminación del tumor. (b) Medida de la temperatura intratumoral y superficial del ratón durante el tratamiento. Los resultados muestran la importancia de controlar la temperatura del tumor mediante este proceso; la medida superficial suele subestimar el calentamiento. También se muestra, en amarillo, el menor aumento de temperatura del tumor si se efectúa el tratamiento únicamente con un láser, sin la presencia de las nanopartículas [9].

Si bien ejemplos como el anterior muestran el potencial de la nanotermometría luminiscente en nuestra sociedad, su aplicación clínica en humanos es actualmente muy limitada debido a los estrictos requerimientos anteriormente mencionados, en particular, a la complejidad en la calibración de la respuesta óptica de dichos nanotermómetros en un organismo tan complejo y delicado como el del ser humano. Por otra parte, hasta donde sabemos, todavía no se están usando nanotermómetros luminiscentes de forma industrial en la fabricación de componentes micro- y nanoelectrónicos.

En la habitual compleja transición entre la investigación científica y la transferencia tecnológica, el trabajo realizado hasta ahora por los distintos grupos de investigación en

este campo está permitiendo comprender cada vez mejor la relación entre las propiedades ópticas y térmicas de estos fósforos luminiscentes en la micro- y la nanoescala, que en ocasiones han demostrado su aplicabilidad a nivel de laboratorio y su potencial en distintos ámbitos de la sociedad.

Conclusiones

El desarrollo en clase de aspectos básicos de una magnitud fundamental como la temperatura ha de contribuir a una mejora significativa del conocimiento que de este concepto tiene el alumnado de las etapas de ESO y Bachillerato. Adicionalmente, la discusión y las explicaciones cualitativas del profesorado de diversos fenómenos en los que se basan los termómetros que usamos a diario puede ser una experiencia muy gratificante para los estudiantes, permitiéndoles conocer mejor cómo funcionan los termómetros de su alrededor y repasando o aprendiendo conceptos importantes de otras ramas de la física. Todo ello no solo tiene mucho interés desde el punto de vista fundamental e instrumental, sino que también adquiere una gran importancia en nuestra sociedad tecnológica actual y, por supuesto, en la investigación científica. Los prometedores avances hacia una termometría luminiscente en la nanoescala son un buen ejemplo de ello.

Referencias

- [1] C. FURIÓ-GÓMEZ, J. SOLBES y C. FURIÓ-MAS, "La historia del primer principio de la Termodinámica y sus implicaciones didácticas", *Revista Eureka de Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **4**, 461-475 (2007).
- [2] M. ETXANIZ, "Los gases", en *Innovación y motivación para la escuela actual. XXI Premios Francisco Giner Ríos a la Mejora de la Calidad Educativa* (pp. 133-193, 2006).
- [3] E. MARTÍNEZ, J. CÁCERES, A. LOZADA y D. HIDALGO, "Construcción y calibración de un termómetro de alcohol para fines educativos", *Latin American Journal of Physics Education* **7**, 3 (2013).
- [4] F. SAVALL-ALEMANY, F. J. L. DOMENECH y J. MARTÍNEZ TORREGROSA, "El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica", *Revista Brasileira de Ensino de Física* (2014).
- [5] A. EL HELOU, "Advanced Thermal Characterization and Temperature Control to Enable the Next Generation of Micro-Electronic Technologies" (2020).
- [6] A. BEDNARKIEWICZ, J. DRABIK, K. TREJGIS, D. JAQUE, E. XIMENDES, y L. MARCINIAR, "Luminescence Based Temperature Bio-imaging: Status, Challenges and Perspectives", *Applied Physics Reviews* **8**, 011317 (2021).
- [7] V. MYKHAYLYK, H. KRAUS, Y. ZHYDACHEVSKYY, V. TSUMRA, A. LUCHECHKO, A. WAGNER y A. SUCHOCKI, "Multimodal Non-contact Luminescence Thermometry with Cr-doped oxides", *Sensors* **20**, 5259 (2020).
- [8] M. ALONSO-ORTS, D. CARRASCO, J. M. SAN JUAN, M. L. NÓ, A. DE ANDRÉS, E. NOGALES y B. MÉNDEZ, "Wide Dynamic Range Thermometer Based on Luminescent Optical Cavities in Ga2O3: Cr Nanowires", *Small* **18**, 2105355 (2022).
- [9] E. CARRASCO, B. DEL ROSAL, F. SANZ-RODRÍGUEZ, A. J. DE LA FUENTE, P. H. GONZALEZ, U. ROCHA, K. U. KUMAR, C. JACINTO, J. G. SOLÉ y D. JAQUE, "Intratumoral Thermal Reading During Photo-thermal Therapy by Multifunctional Fluorescent Nanoparticles", *Advanced Functional Materials* **25**, 615-626 (2015).