

Estudios originales y rigurosos de interés general que involucran análisis, organización sistemática y reflexionada, explicación teórica y predicciones viables.

Las propiedades de las disoluciones a través de experimentos mentales

Edgardo R. Donati¹ y Julio J. Andrade-Gamboa²

Abstract

Mental experiments have played an important role in the evolution of the scientific ideas, existing some famous examples, specially in the history of Physics. These experiments consist of the analysis of hypothetical situations that can be predicted using previous concepts and knowledge, but that can end at apparent paradoxes that finally allow to extend the previous conceptual frame. These experiments can be used in the education of sciences and allow, through several mechanisms that go from the intuition to the analogy, a first approach for the understanding of certain subjects. In this work we approached by means of a series of mental experiments (that could have one experimental counterpart), the subject of the properties of the solutions. Basically, the mental experiment supposes to imagine a container with small spheres of a light material "interacting" through forces (for example, magnetic force). By means of a fan placed in a bored base of the container the "thermal activity" pronouncing itself in processes of "evaporation" could be increased. One sets out to analyze by means of this mental experiment several concepts such as dynamical equilibrium at condensation-evaporation process, vapor pressure, the Raoult's law and its deviations, among other concepts.

Resumen

Los experimentos mentales han desempeñado un importante papel en la evolución de las ideas científicas, existiendo algunos ejemplos famosos, especialmente en la historia de la Física. Estos experimentos

consisten en el análisis de situaciones hipotéticas que pueden predecirse utilizando conceptos y conocimientos anteriores, pero que pueden desembocar en aparentes paradojas que finalmente permiten ampliar el marco conceptual previo. Estos experimentos pueden ser usados en la enseñanza de las ciencias y permiten, a través de variados mecanismos que van desde la intuición hasta la analogía, una primera aproximación para la comprensión de determinados temas.

En este trabajo abordamos mediante una serie de experimentos mentales (que podrían tener una contraparte experimental), el tema de las propiedades de las soluciones. La base del experimento mental supone imaginar un recipiente con pequeñas esferas de un material liviano interactuando a través de una fuerza (por ejemplo magnética). Mediante un ventilador colocado en la base agujereada del recipiente podría incrementarse la "actividad térmica" manifestándose en procesos de "evaporación". Se propone analizar mediante este experimento mental, los conceptos de equilibrio dinámico en el proceso evaporación-condensación, presión de vapor, la ley de Raoult y sus desviaciones, entre otros conceptos.

Introducción

Los experimentos mentales han desempeñado un papel de crítica importancia en el desarrollo de las ciencias (Hacking, 1985). Algunos de estos experimentos son famosos incluso a nivel cotidiano tal cual sucede con el caso del tren de Einstein (Einstein, 1970). Otros experimentos ampliamente divulgados en la ciencia son los de Galileo y de Bohr-Heisenberg (Hacking, 1985). Estos experimentos pueden ocuparse de situaciones hipotéticas que no han podido ser analizadas en el laboratorio (o incluso puede que no ocurran en absoluto en la naturaleza), utilizando para ello conceptos y conocimientos previos. Aunque la categoría es demasiado amplia para poder precisarla mediante una definición, la clave es que el planteo de estos experimentos hace surgir una serie de enigmas que, tras un análisis riguroso, permiten desnudar o comprender conceptos o, eventualmente, desembocar en aparentes paradojas que obligan

¹ Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, 47 y 115 (1900) La Plata, Argentina
Correo electrónico: donati@quimica.unlp.edu.ar

² Área de Química, Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue y Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, Av. Bustillo Km 9.500, (8402 AGP) San Carlos de Bariloche, Río Negro.
Correo electrónico: andrade@cab.cnea.gov.ar

Recibido: 3 de enero de 2004; **aceptado:** 3 de marzo de 2004. Este artículo fue presentado en las III Jornadas Internacionales sobre Enseñanza Universitaria de la Química, llevadas a cabo del 28 de septiembre al 1 de octubre de 2003, en La Plata, República Argentina.

al científico a reajustar su marco conceptual. Desde el punto de vista científico, esta herramienta es adecuada para intentar la eliminación de contradicciones dentro del marco presente de conocimientos e, incluso, como impulsor de la visualización de nuevos enfoques y/o conocimientos.

De acuerdo con algunos enfoques metodológicos en la enseñanza de las ciencias (Pozo y Gómez Crespo, 1998) se considera que en muchas ocasiones la situación del científico frente a nuevos conocimientos o a contradicciones internas dentro de su marco conceptual, es similar a la de un estudiante frente a nuevos temas, especialmente cuando se tratan de conceptos de naturaleza más abstracta. Por esa razón, los experimentos mentales podrían ser una herramienta muy poderosa dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje, tal cual hemos propuesto previamente (Lladó *et al.*, 1997) dentro de una serie de alternativas metodológicas para extraer al alumno de su contexto habitual y obligarlo al replanteo de su propio marco conceptual (Donati y Jubert, 1991; Donati *et al.*, 1997; Vasini y Donati, 2001).

En este trabajo, y utilizando otras herramientas descritas en un trabajo previo en el cual discutimos las características del proceso de disolución (Mártire *et al.*, 1997), aplicaremos aquella propuesta para analizar algunas propiedades de las disoluciones, en particular la vaporización.

Descripción de la propuesta

El experimento mental propuesto consiste en imaginar un recipiente, de base y techo agujereados conteniendo esferas (pelotitas) imanadas. Mediante un ventilador colocado en la parte inferior de la base del recipiente se entrega una corriente de aire ascendente (figura 1). Este sistema representa a un recipiente con moléculas en un estado térmico determinado. alguna pelotita en el recipiente se liberará (hacia arriba) del conjunto que descansa en la base en la medida en que la corriente de aire pueda vencer la fuerza magnética que la retiene. Esto equivale, en el sistema real, a un proceso individual de evaporación. A su vez, esta pelotita tiene alguna posibilidad de chocar con las que se encuentran aglomeradas en la base y adherirse. Ésto constituye el análogo a un evento individual de condensación. La ocurrencia de un número apreciable de estos eventos individuales representa el proceso masivo de evaporación-condensación. Este "experimento mental" constituye una analogía entre sistemas concretos en el que uno de los sistemas (el análogo) actúa

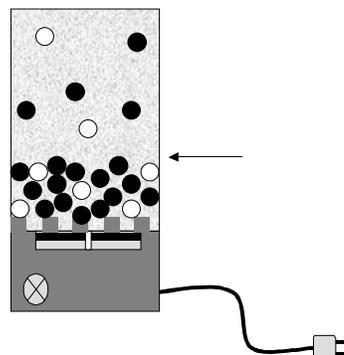


Figura 1. Esquema del "equipo mental". La zona inferior representa un ventilador con velocidad variable. La zona superior es un recipiente con agujeros en su base inferior. Las esferitas de distintos colores representan moléculas de diferentes sustancias.

como auxiliar del pensamiento para entender el otro (el real). La correlación ("la analogía") se logra reemplazando cada componente del sistema real por el del análogo (Donati y Andrade Gamboa, 1990): moléculas por esferas rígidas (pelotitas), fuerzas intermoleculares por interacción magnética entre pelotitas imanadas, energía térmica o temperatura por caudal de aire.

En el experimento podrán imaginarse pelotitas de diferentes colores para representar moléculas de sustancias diferentes. Para ello, y para que la analogía sea correcta, cada pelotita de un dado color debería tener un grado de magnetización diferente a la de una pelotita de otro color.

A continuación describiremos diferentes experimentos que podrían imaginarse con el auxilio del sistema análogo.

1. Fenómenos de vaporización y condensación

Con pelotitas de un solo color (representativas una única sustancia) se imagina el efecto de un dado caudal de aire: algunas "moléculas" lograrán desprenderse del resto y pasar a la parte vacía del recipiente (evaporación); a partir de cierto tiempo se verán algunas "moléculas" que vuelven a ser retenidas por las aún ubicadas en el fondo del recipiente (condensación). La posibilidad de desprendimiento de asociaciones de dos o más pelotitas (esto estará limitado, para un dado caudal, a un número muy inferior a las que se mantienen en la base) puede servir para ejemplificar que sustancias en el vapor aún pueden estar asociadas, tal como sucede con el agua para la que algunos puentes de hidrógeno pueden seguir operando el en vapor.

2. Equilibrio dinámico y presión de vapor

En el experimento anterior y luego de cierto tiempo, el número de pelotitas en la fase superior se mantendrá aproximadamente constante debido a la igualdad de velocidades de escape y retorno. Este hecho permitirá derivar el concepto de presión de vapor y el de equilibrio dinámico. También puede inducirse a pensar que la presión de vapor podría medirse como una proporción directa al número promedio de pelotitas en la zona superior; para ello, podrían separarse las pelotitas de la “fase vapor”, por ejemplo intercalando una plancha agujereada que pueda introducirse lateralmente (aproximadamente donde se encuentra la flecha de la figura 1). Para ejemplificar más claramente el aspecto dinámico del equilibrio, una vez alcanzado éste, podría imaginarse el efecto del reemplazo instantáneo de las pelotitas que forman la fase vapor por otras marcadas: al cabo de cierto tiempo se verá que las esferas se habrán mezclado mostrando que algunas de las “moléculas” se han condensado y otras, aproximadamente en el mismo número, se han “evaporado”.

Una modificación a esta experiencia imaginando pelotitas con mayor o menor grado de magnetización y para un mismo caudal de aire (igual temperatura), permitiría observar el efecto de la interacción entre moléculas sobre la presión de vapor y la consecuente diferencia entre las presiones de vapor de diferentes sustancias.

3. Efecto de la temperatura sobre la presión de vapor

En el experimento anterior, es posible también observar el efecto de la temperatura sobre la presión de vapor y predecir el comportamiento descrito por la ecuación de Classius-Clapeyron, simplemente imaginando los efectos de diferentes caudales de aire sobre la cuantificación de la presión de vapor mencionada en el punto anterior.

Si se imagina la aplicación de un caudal suficientemente elevado como para romper en su totalidad la aglomeración de pelotitas depositada en el fondo, es posible que se pueda introducir, al menos de manera rudimentaria, el concepto de temperatura de ebullición.

4. Predicción de la ley de Raoult

El experimento mental correspondiente consiste en imaginar el recipiente con una mezcla de pelotitas de dos colores y dos magnetizaciones diferentes (representando diferentes sustancias). Una vez que

se alcanza el equilibrio dinámico podría intuirse el resultado de un conteo de pelotitas de cada tipo en el vapor. Esto sería el equivalente de la medición de la presión de vapor de cada componente en un sistema real, y permitirá una primera aproximación a la ley de Raoult.

5. Soluciones ideales y reales. Desviaciones a la ley de Raoult

Si el experimento anterior se plantea para pelotitas de diferente color pero para las que la magnetización no es muy diferente, y se imagina la medición de la presión de vapor de cada componente en la mezcla, respecto de sendas mediciones para los componentes puros (pelotitas de un solo color y con el mismo caudal de aire), se puede inferir que no habrá diferencia (comportamiento ideal). Por el contrario si se imagina una mezcla de pelotitas de diferentes colores pero de muy diferente magnetización, se podrá inferir el efecto de aquéllas de mayor magnetización sobre la medida de la presión de vapor de las de menor magnetización. Estas últimas estarán en menor cantidad a la esperada por la sola interacción consigo mismas (la presión de vapor de dicho componente es menor en la mezcla que en el estado puro). Esto permite introducir el concepto de solución no ideal mediante el ejemplo de una desviación negativa a la ley de Raoult.

6. Extensión a otros sistemas

Estos mismos experimentos mentales pueden emplearse para razonar algunos otros fenómenos. Por ejemplo, si el recipiente está abierto en su parte superior, permitiendo que las pelotitas puedan escapar, se puede trazar la analogía con la evaporación irreversible (desplazamiento del equilibrio) de un líquido en un sistema abierto. Por otro lado, para una velocidad de caudal de aire (energía térmica), si se colocan pelotitas no imantadas (inexistencia de fuerzas de interacción) el sistema equivale a un gas ideal, para el que no existe posibilidad de condensación. Contrariamente, el planteo de la ausencia de caudal de aire (energía térmica nula), e independientemente de la magnitud de las fuerzas de interacción, constituye una aproximación al estado de la materia en el cero absoluto.

Discusión

Tal como hemos mencionado, el conjunto de experimentos mentales propuestos en base a un sistema concreto análogo constituye un auxiliar de razona-

miento. Por tratarse de una analogía deben tomarse las suficientes precauciones para evitar extrapolaciones equivocadas (Donati y Andrade Gamboa, 1990) sobre diferentes aspectos de los procesos y fenómenos que se han intentado analizar. A continuación indicaremos algunas de las extrapolaciones o interpretaciones erróneas que pueden provocar algunos elementos de la analogía incluida dentro del experimento mental y que es conveniente discutir una vez completado:

- Las moléculas son esferas rígidas. Si bien muchos modelos utilizan este postulado, es conveniente reflexionar con los estudiantes sobre sus alcances.
- Las fuerzas de interacción son "dirigidas". Si bien la analogía magnética es totalmente equivalente para el caso de moléculas polares (dipolos eléctricos), es necesario hacer un análisis detallado incluyendo todo tipo de interacción intermolecular.
- Dado que en el sistema análogo la corriente de aire actúa en contra de la fuerza gravitatoria, se debe tomar la precaución para que en este caso no se induzca a pensar (error conceptual frecuente) que las moléculas más pesadas son menos volátiles. Para evitar la inducción al error se puede plantear que la masa de todas las pelotitas es la misma y que sólo se diferencian en color y grado de magnetización.
- Como la presión externa no tiene su equivalente en el sistema análogo, la discusión acerca de la temperatura de ebullición tiene un alcance limitado (punto 3).
- El sistema análogo tampoco permite analizar otras características de las soluciones ideales y no ideales tales como la aditividad o no de los volúmenes.

Esta propuesta pretende no solamente mostrar la utilidad de "experimentos mentales" (factibles o no de realizar en el laboratorio) para el tema de las disoluciones sino también como herramienta para generar el marco adecuado para la discusión de diversos temas y conceptos partiendo de ideas producidas por los propios estudiantes.

Posibilidad de transformar el experimento mental en un experimento real

El sistema análogo de recipiente-ventilador-pelotitas puede construirse sin dificultad y con un control de caudal de aire se pueden emular los diferentes estados térmicos. Para un ventilador operado con un

motor de corriente continua, el caudal se puede regular mediante el control del número de revoluciones por segundo, el cual depende de la tensión aplicada. De esta manera, si se alimenta el motor con una fuente de tensión regulada se puede usar un potenciómetro con una escala graduada en un equivalente a la temperatura. La opción de experimento concreto posee la dificultad de conseguir una magnetización diferente y controlada para cada pelotita para graduar a voluntad la interacción entre pelotitas. A priori, esto se puede lograr usando pelotitas de poliestireno expandido y agregando en su interior imanes permanentes (quizás alambres imanados) de un dado grado de magnetización para representar la molécula una dada sustancia. Si se superara dicho inconveniente técnico, la experimentación en el sistema análogo resulta ser un auxiliar valioso del propio experimento mental ya que se estaría realizando una especie de "experimentación a nivel molecular". ■

Referencias

- Donati, E. y Andrade Gamboa, J. J. La utilidad de las analogías en la enseñanza de las ciencias en base a una posible clasificación, *Revista de Enseñanza de las Ciencias*, **8**, 89-92, 1990.
- Donati, E. y Jubert, A. Una metodología complementaria para las clases de problemas en química, *Revista Chilena de Educación Química*, **15**, 1-2, 1991.
- Donati, E., Martire, D. y Andrade Gamboa, J.J. Uso de gráficos como metodología alternativa para la conceptualización de temas en química, *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, **9**, 128-133, 1997.
- Einstein, A. *La Relatividad*. Grijalbo, México, 1970.
- Hacking, I. *Revoluciones científicas*. Fondo de Cultura Económica, México, 1985, p. 17-57.
- Llado, M., Matkovic, S., Martire, D. y Donati E. Experimentos mentales en química, *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, **9**, 6-11, 1997.
- Martire, D., Matkovic, S., Llado, M. y Donati, E. Introducción intuitiva de conceptos a través del proceso de disolución *Anuario Latinoamericano de Educación Química*, **9**, 12-16, 1997.
- Pozo J. I. y Gómez Crespo M. A. *Aprender y enseñar ciencia*. Ediciones Morata, S.L., Madrid, 1998.
- Vasini, E. y Donati, E. Uso de analogías adecuadas como recurso didáctico para la comprensión de los fenómenos electroquímicos en el nivel universitario inicial, *Revista de Enseñanza de las Ciencias*, **19**, 471-477, 2001.