

SE BUSCA UNA MAGNITUD PARA LA UNIDAD MOL

Julio José Andrade Gamboa⁽¹⁾, Hugo Luis Corso y Fabiana Cristina Gennari⁽²⁾

Universidad Nacional del Comahue y Centro Atómico Bariloche
(8400) Bariloche, Argentina

⁽¹⁾ correo electrónico: andrade@cab.cnea.gov.ar

⁽²⁾ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

[Recibido en Octubre de 2005, aceptado en Enero de 2006]

RESUMEN ^(Inglés)

En este trabajo se analiza la frecuente discusión acerca de cuál es la magnitud de la que el *mol* es su unidad. Se cuestiona la definición de *cantidad de sustancia* dada por la IUPAC como magnitud fundamental del SI. Se presenta como ciertamente inútil la búsqueda de una magnitud que mida una porción de materia en unidades *mol* y que no haga referencia a la cantidad de entidades elementales que la componen. Se considera aceptable denominar *Cantidad Química* a la magnitud que expresa el número de entidades elementales constitutivas de cualquier sistema material, siendo el $mol = 6,02214 \times 10^{23}$ entidades, su unidad. Se propone que el *mol* sea incluido como una unidad suplementaria (no fundamental) del SI.

Palabras clave: Mol; cantidad de sustancia; cantidad química; unidades fundamentales; Sistema Internacional.

INTRODUCCIÓN

El *mol* es la única unidad de cálculo fisicoquímico que ha suscitado la discusión acerca de cuál es la magnitud que le corresponde (Kell, 1977; Furió, Azcona, Guisasola y Mujika, 1993; Freeman, 2003).

Cuando Ostwald introdujo el término *mol* en 1900, lo definió con base en una masa proporcional a las masas relativas de las entidades elementales de las sustancias, lo cual trajo el consabido problema de la interpretación del *mol* como una unidad de masa. El hasta ahora vigente uso de cantidades como el átomo-gramo y la molécula-gramo (lo cual consideramos que debe ser desterrado de la instrucción) ha reforzado en épocas actuales esta asociación errónea. Más tarde, con los avances en la teoría atómico-molecular, un *mol* fue identificado como un número fijo de átomos, moléculas, iones, etc., es decir, el número de Avogrado de entidades elementales. Queda claro, entonces, que el *mol* nació para establecer cantidades de entidades

elementales sin la necesidad de tener que definir alguna magnitud especialmente asociada.

A fines del siglo XIX, se introdujo la escala de "pesos atómicos" basada en $O = 16$, bajo la influencia de Berzelius, y comenzó a ser usada por los químicos (Guggenheim, 1961). De modo que se pasó a definir el *mol* como "... la cantidad de sustancia que contiene el mismo número de moléculas (o iones, o átomos) que el existente exactamente en 16 g de O ".

Pero en 1929 fueron descubiertos los isótopos ^{17}O y ^{18}O , con lo cual los físicos tuvieron muy buenas razones (Kohman, Mattauch y Wapstra, 1958) para basar su escala en $^{16}O = 16$. Para los químicos, el "peso atómico" del oxígeno (obviamente, un promedio ponderado de sus isótopos), era 15,99560. La diferencia entre las dos escalas era una fuente de controversias e irritación entre químicos y físicos. Las discusiones mantenidas, y las condiciones que tanto físicos como químicos impusieron, llevaron a adoptar una escala unificada, propuesta en 1957 por Olander y Nier (Kohman et al., 1958), basada en $^{12}C = 12$, y que fue oficialmente aceptada por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en 1961 y por la IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) en 1960.

La IUPAC y la IUPAP resolvieron en conjunto en 1967 tomar como referencia al ^{12}C , y redefinir el *mol* como

"la cantidad de sustancia de un sistema material que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kg de ^{12}C . Cuando se usa el mol las entidades elementales deben ser especificadas, pudiendo ser átomos, moléculas, iones, electrones, u otras partículas o agrupaciones específicas de tales partículas."

Esta definición fue adoptada por la XIV Conferencia General de Pesas y Medidas de 1971, y el *mol* fue incluido como unidad fundamental del Sistema Internacional (SI).

El objetivo del presente trabajo es discutir las diferentes posturas actuales acerca de cuál es la magnitud de la que el *mol* es la unidad.

LA RIGUROSIDAD EN LA DEFINICIÓN ACTUAL DE MOL

La definición de *mol* incluye de manera implícita la mención de la magnitud correspondiente, pero es insuficiente para dar su significado. Cuando se menciona que el *mol* "... es la cantidad de sustancia ..." se está estableciendo que *cantidad de sustancia* constituye una magnitud. Pero no hay una definición previa de esta magnitud de manera independiente de la definición de *mol*. Entonces estaría definido (de manera circular) que *cantidad de sustancia* es la magnitud cuya unidad es el *mol*. Esto entra en conflicto con los aspectos conceptuales asociados a las definiciones del resto de las unidades fundamentales: *primero existe un concepto de magnitud (longitud, masa, tiempo), claramente establecido mediante un procedimiento instrumental (indicación de cómo usar una regla, una balanza, un cronómetro), que permite efectuar mediciones de cantidades de esas magnitudes. Luego, la unidad es una cantidad de cada magnitud, elegida de manera arbitraria con fines comparativos.*

Lamentablemente, en beneficio de la rigurosidad de la definición de *mol*, no existe una forma análoga para definir *cantidad de sustancia*, ya que no hay manera de establecer un procedimiento directo para medir cantidades de esta magnitud. A su vez, el significado de la frase *cantidad de sustancia*, le restringiría el ámbito de aplicación a esta magnitud, dejando de lado la posibilidad de, por ejemplo, hacer referencia a moles de partículas elementales (electrones, protones, neutrones), ya que un conjunto de las mismas no constituyen sustancia alguna. Incluso, el *mol* ha sido vinculado con cantidades correspondientes a magnitudes diferentes a la masa. Así, la energía de un *mol* de fotones es denominada *einstein* y la carga eléctrica de un *mol* de electrones es un *faraday*. La posibilidad de tomar el *mol* como referencia para definir una cantidad de energía o de carga eléctrica, indica que su magnitud debe tener un carácter más universal. Una alternativa para subsanar estas últimas dificultades es cambiar la denominación *cantidad de sustancia* por *cantidad química* (Nelson, 1991; Gorin, 1994). Pero esto solamente permite ampliar el rango de aplicación de la unidad *mol*, mientras que lo esencial queda sin resolver. El cambio, por sí sólo, no aclara de qué manera se miden *cantidades químicas*. Incluso los intentos más conceptuales de búsqueda de una denominación para la magnitud de la cual el *mol* es su unidad, tampoco constituyen una verdadera definición para dicha magnitud. Entre dichas propuestas, tenemos la de introducir la denominación *psammity* (Kell, 1977) (derivada de la palabra griega psammítés, que hace referencia a la operación de conteo de granos de arena) para enfatizar la necesidad de diferenciar la unidad (*mol*) de la magnitud, pero solamente introduce un nombre más afín con la naturaleza corpuscular de la materia. Otro autor (Freeman, 2003) avanza en el mismo sentido, indicando que debe ser definida la magnitud *posos* (del griego, cuánto), correspondiente a la propiedad de microgranularidad de la materia, y una nueva unidad (*monon*) de dicha magnitud, para no entrar en conflicto con el uso actual y extendido del *mol* y con su inclusión en el SI. Si bien establecer que el *mol* es la unidad de la magnitud que hace referencia a la característica microgranular de la materia es un aspecto conceptual importante, el *psammity* o el *posos* no adquieren *per se* la categoría de magnitud debido a que no existe indicación de *cómo medir* de manera directa "psammities" o "posos".

Actualmente, las denominaciones *cantidad de sustancia* y *cantidad química* son consideradas por la IUPAC como sinónimos (Gorin, 2003) y son las únicas aceptadas para denominar a la magnitud de la cual el *mol* es su unidad.

SI EL MOL NO ES UN NÚMERO, ENTONCES ¿QUÉ ES?

Independientemente de cuál es la magnitud correspondiente a la unidad *mol*, si se habla, por ejemplo, de 1 *mol* de H₂, surge la identificación con $6,02214 \times 10^{23}$ moléculas, o con 2,058 g, o con 22,414 L (en CNPyT) de dicho elemento. Dado que la masa sería diferente si se hablara de 1 *mol* de H, o diferente el volumen si se tratara de un *mol* de moléculas de un sólido, está claro que el *mol* no es unidad ni de masa ni de volumen. Por otro lado, debido a que 1 *mol* de H₂ y 1 *mol* de Fe poseen el mismo número de unidades estructurales, es razonable pensar que es el número de partículas lo que está implícito en la unidad *mol*. El *mol*, entonces, puede considerarse como la

unidad de la magnitud *cantidad de partículas*, y es un número de entidades elementales. Esta elección ha sido cuestionada (Gorin, 1994) por el hecho de que un número natural se determina por conteo directo, tarea aquí imposible dado el valor del número a contar. Esta objeción da pie a toda postura que proponga denominaciones para la magnitud en cuestión con la condición de no hacer referencia explícita a un determinado número de partículas. Resulta difícil no ver este enfoque como un cuestionamiento a la teoría corpuscular de la materia. La IUPAC (IUPAC, 2001) realiza una aclaración adicional a la definición de *mol* diciendo que la cantidad física "cantidad de sustancia" o "cantidad química" es proporcional al número de entidades elementales. Si el modelo corpuscular hubiera sido incorrecto (materia continua), y se hubiesen descubierto igualmente (no se nos ocurre cómo) leyes como la de las proporciones definidas, o la de los volúmenes de las combinaciones gaseosas, allí hubiera surgido una magnitud como la que se está buscando para el *mol* cuya definición necesariamente hubiera tenido que obviar cualquier referencia a un número. Pero ante la validez del modelo de discontinuidad de la materia, todo intento de búsqueda de una propiedad de la materia que permita medir de manera directa cantidades expresadas en moles, no puede realizarse evitando pensar en cuáles son las propiedades que dependen del número de partículas constituyentes. Y, al menos hasta el momento, no hay un procedimiento experimental universal para medir moles, sino procedimientos específicos, como podría ser la medición de alguna propiedad coligativa para el caso de solutos.

Ya cuatro décadas atrás se mencionaba (Guggenheim, 1961) la necesidad de diferenciar la magnitud "cantidad de sustancia" de magnitudes como masa y volumen, y que debía tener relación directa con alguna propiedad de la materia. Por ejemplo, la cantidad de un sólido puro es habitualmente medida por pesada, la cantidad de un gas o de un líquido es medida volumétricamente, la cantidad de una sustancia en solución es determinada por titulación, colorimetría o polarografía, la cantidad de una sustancia radioactiva se mide con un contador Geiger, o la cantidad de un fármaco se puede determinar por su acción fisiológica. Todas estas mediciones, naturalmente, involucran a propiedades específicas que dependen del número de partículas. Pero estas mediciones no permiten abstraernos de dicho número y efectuar, por ejemplo, la comparación de moles de sustancia radioactiva con moles de fármaco comparando medidas de radioactividad con medidas de acción fisiológica. Por lo tanto el *mol* no puede considerarse como unidad fundamental en el SI dada la imposibilidad de establecer de manera operativa un patrón primario. Por otro lado, el *mol* no sería estrictamente una unidad derivada, ya que no surge de una combinación de unidades fundamentales. Tal como se ha sugerido (Freeman, 2003), podría incluirse en el SI como una unidad suplementaria.

Las discusiones alrededor del *mol* no han perdido actualidad, tal como lo muestra el intercambio de opiniones entre diferentes autores a través de unas recientes cartas al Editor en el *Journal of Chemical Education* (Karol, 2004; Freeman, 2004a; Cvitas, 2004; Freeman, 2004b).

¿TIENE ENTONCES EL MOL ASOCIADA UNA MAGNITUD?

Dada la imposibilidad de obtener mediante un procedimiento de medición directa una definición de la magnitud de la cual el *mol* es la unidad, y teniendo en cuenta que, a falta de dicho procedimiento, el mero hecho de proponer una denominación para la magnitud no es una acción sustituta, no hay otra opción que aceptar que el *mol* es la unidad para medir número de partículas o entidades elementales constituyentes de un sistema material dado. Esta elección permite aplicar el *mol* para definir, tal como se mencionó, unidades de energía y carga eléctrica, y considerarlo la unidad de una magnitud compatible con un ámbito de aplicación más amplio.

Es importante notar que esta alternativa no está vedada por la definición de *mol* aceptada por la IUPAC, ya que en ella se hace referencia a un dado *número de entes elementales*. Y es el número de partículas la magnitud de comparación, tomando como patrón el número de átomos contenidos en 12 g de ^{12}C .

El hecho de que no se puedan contar de manera directa entidades elementales, no es una crítica severa a considerar que el *mol* es una medida del número de entidades elementales que componen una porción de materia dada. La medición de la cantidad de átomos se puede realizar de manera *indirecta* con base en la masa total del sistema y la masa individual de los átomos. Y es, en este caso, la precisión de las balanzas la que va a definir la precisión del *mol* (no es necesario conocer el número de Avogadro con 24 cifras exactas para que el *mol* sea considerado como un número). Para el caso de fotones o partículas cargadas, es la precisión de los instrumentos de medición de energía radiante o carga, respectivamente, la que fijará la precisión del *mol*.

CONCLUSIONES

Una vez aceptado que el *mol* es la unidad de cantidad de entidades elementales de un sistema material, sí podría tener sentido encontrar alguna denominación para esta magnitud. La denominación *cantidad química* podría ser una alternativa aceptable ya que es en los procesos químicos en los que la naturaleza corpuscular de la materia cobra vital importancia (incluyendo los procesos de intercambio de partículas elementales). Atendiendo a lo expresado más arriba, en el sentido de que el *mol* es adecuado para referirse a la energía de un gran número de cuantos, o a la carga eléctrica de un gran número de partículas cargadas, el nombre *cantidad química* también puede parecer restrictivo, y quizás se podría pensar en cambiarlo por *cantidad fisicoquímica*, o, incluso por *cantidad molar*. Este último nombre, que se nos ocurre apropiado, está de algún modo vedado por el uso generalizado que tienen en termodinámica las "cantidades molares", que son cantidades por mol de sustancia (Nelson, 2005). Consideramos, no obstante, que la denominación *Cantidad Química*, es apropiada por cuanto ya ha sido empleada en relación con el *mol* y dado que su etimología no interfiere en gran medida con el carácter universal de la magnitud que representa.

Entonces se puede, tal como es el requerimiento ya mencionado, definir primero la magnitud:

Cantidad Química: es el número de entidades elementales constitutivas de cualquier sistema material. La identidad de la entidad elemental se debe establecer según la conveniencia.

y luego definir la unidad

Mol: es la cantidad química de 0,012 kg de ^{12}C .

Y dar la equivalencia

$$1 \text{ mol} = 6,02214 \times 10^{23}$$

Finalmente se debe destacar que la unidad *mol* y la magnitud *cantidad química* deberían incluirse como suplementarias en el SI.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer las interesantes sugerencias de los evaluadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CVITAS, T. (2004). SI for Chemists: Another Position (Letter to Editor). *Journal of Chemical Education*, 81(6), 801.
- FREEMAN, R. D. (2003). SI for Chemists: Persistent Problems, Solid Solutions. *Journal of Chemical Education*, 80(1), 16-20.
- FREEMAN, R. D. (2004a). SI for Chemists: Persistent Problems, Solid Solutions. [SI Basic Units: The Kilogram and the Mole \(Author reply\)](#). *Journal of Chemical Education*, 81(6), 800-801.
- FREEMAN, R. D. (2004b). SI for Chemists: A modification (Author reply). *Journal of Chemical Education*, 81(6), 802.
- FURIÓ, C., AZCONA, R., GUIASOLA, G. y MUJICA, E. (1993). Concepciones de los estudiantes sobre una magnitud "olvidada" en la enseñanza de la Química: La cantidad de sustancia. *Enseñanza de las Ciencias*, 11(2), 107-114.
- GORIN, G. (1994). Mole and Chemical Amount. *Journal of Chemical Education*, 71(2), 114-116.
- GORIN, G. (2003). Mole, Mole per Liter, and Molar. *Journal of Chemical Education*, 80(1), 103-104.
- IUPAC (2001). Abbreviated list of quantities, units and symbols in physical chemistry <http://www.iupac.org/reports/1993/homann/base1.html>.
- GUGGENHEIM, E. A. (1961). The Mole and Related Quantities. *Journal of Chemical Education*, 38(2), 86-87.
- KAROL, P. J. (2004). SI for Chemists: Persistent Problems, Solid Solutions. SI Basic Units: The Kilogram and the Mole (Letter to Editor). *Journal of Chemical Education*, 81(6), 800.

KELL, G. S. (1977). *Nature*, 267, 665.

KOHMAN, T., MATTAUCH, J. and WAPSTRA, A. (1958). *Science*, 127, 1431-1432.

NELSON, P. G. (1991). The elusive mole. *Education in Chemistry*, 28, 103-104.

NELSON, P. G. (2004). What is the mole? <http://www.hull.ac.uk/chemistry/mole>.

SUMMARY

The frequent discussion about which is the magnitude for the unit *mole* is analyzed. The IUPAC definition of *amount of substance* as a SI fundamental magnitude is questioned from elementary considerations. The attempt to find a magnitude that reflects a matter property, measured in *mole*, and not directly related with the number of elementary entities, is presented as vain. The magnitude that represents the number of elementary entities in any material system is accepted to be called *Chemical amount*, being $mole = 6,02214 \times 10^{23}$ entities their unit. *Mole* is proposed to be included as supplementary (not fundamental) unit in the SI.

Key words: Mole; amount of substance; chemical amount; fundamental units; International System.