

Balanceo de ecuaciones químicas mediante computadora

Manuel Castelló Hernández*

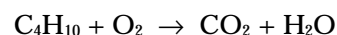
Introducción

La representación de una reacción química mediante una ecuación fue utilizada por vez primera por Lavoisier en 1789, en su *Tratado Elemental de Química* (Lavoisier, 1789). En estas ecuaciones, utilizaba los nombres de las sustancias participantes, relacionándolos mediante igualdades, a consecuencia de la verificación experimental de su Ley de Conservación de la Masa. En 1800, Dalton introdujo una representación más simbólica con pictogramas, que representaban, mediante círculos con signos en su interior, los elementos conocidos hasta esa fecha; era un método similar al que empleaban los alquimistas durante la Edad Media. Pero fue el sistema propuesto por el químico sueco Berzelius el que ha prevalecido, con ligeras modificaciones, hasta nuestros días. Está basado en la representación de los elementos químicos con sus iniciales en latín, y relaciona las sustancias que reaccionan (*reactivos*) con las que se obtienen (*productos*) mediante el signo de la igualdad, que durante la primera mitad del siglo xx fue sustituido por una flecha.

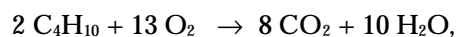
La teoría atómica de Dalton dio lugar a una interpretación lógica de las cantidades con que los elementos reaccionan entre sí. Un postulado básico de esta teoría afirma que *cualquier compuesto químico debe tener una composición constante*. El químico alemán Richter introdujo por primera vez el término *estequiometría*; aunque su significado actual es más amplio que el descrito por Richter, quien lo relacionaba con las cantidades de ácidos y bases que se neutralizaban entre sí. Hoy no sólo hace referencia a la medida de las masas de los compuestos que reaccionan, como es su significado etimológico (στοιχείο, elemento; μέτρον, medida), sino también a la proporción cuantitativa en que lo hacen.

Podemos, pues, definir una ecuación química como la representación simbólica de una reacción química donde aparecen todas las sustancias que

intervienen en ella, diferenciando los reactivos de los productos, y mostrando las relaciones ponderales en que reaccionan y se forman, respectivamente. Así, la reacción de combustión del butano se representa mediante la ecuación:



Sin embargo, esta representación está incompleta ya que, si bien muestra las sustancias implicadas, no indica en qué proporción cuantitativa reaccionan entre sí, es decir, no está balanceada. La expresión final debería ser:



indicando que por cada 2 moléculas de butano se necesitan 13 de oxígeno para que tenga lugar la reacción, y que se forman 8 moléculas de dióxido de carbono y 10 de agua. O que 4 moléculas de butano necesitan 26 de oxígeno, etcétera. Es decir, el butano y el oxígeno reaccionan en relación molecular 2:13; análogamente, describiríamos la proporción de los productos. Si tuviéramos, por ejemplo, 5 moléculas de butano y 26 de oxígeno quedaría 1 molécula de aquél sin reaccionar, siendo así el oxígeno el *reactivo limitante* de la reacción al encontrarse en menor proporción, aunque está en mayor cantidad (más número de moléculas). Como podemos ver, el balanceo resulta de capital importancia para cualquier estudio cuantitativo de una reacción química. Estos conceptos deben dejarse bien claros porque es bastante habitual que los estudiantes confundan, entre otros, los términos ecuación química con reacción química, y cantidad con proporción. No discutiremos ahora, por no ser relevante para el objetivo de este trabajo, la vinculación que las anteriores proporciones moleculares tienen con la cantidad de sustancia (mol) y con las masas de los compuestos de la reacción, que constituyen la base de los llamados *cálculos estequiométricos*. Lo que nos proponemos analizar es la cuestión siguiente: “¿cómo y por qué se obtienen esos coeficientes?”. Pero antes resultará bastante ilustrativo repasar, aunque sea brevemente, los principales métodos creados para llevar a cabo el balanceo de las ecuaciones químicas.

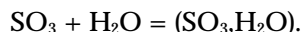
*IFP Misericordia, Valencia (España)
e-mail Internet: manoloc@ctv.es
Recibido: 16 de agosto de 1996.
Aceptado: 28 de octubre de 1996.

Breve historia de los métodos de balanceo

No puede decirse que existan muchos estudios monográficos sobre el tema, sino más bien presentaciones dispersas en diferentes publicaciones. La primera reseña donde se recogen los diferentes métodos existentes se remonta a principios de este siglo (Karlslake, 1907). Un estudio reciente más completo y con buena base documental es el realizado por Garrigós (Garrigós, 1990).

El primer método utilizado fue el de **tanteo**, ya que no implica más dificultad que probar distintos coeficientes hasta lograr los adecuados para la ecuación propuesta. Este método era muy simple, por lo que no mereció mucha atención en los libros de química de la época, si bien solía hacerse referencia a él, tanto de forma directa como indirecta, en algunos textos del siglo pasado. Lógicamente, este tanteo no se realiza de forma aleatoria y casual sino que debe poseer cierto carácter intuitivo que, junto con un poco de práctica, resulta bastante certero en el balanceo de muchas ecuaciones químicas sencillas.

El segundo método empleado fue el **dualístico**. En realidad, era una versión del método de tanteo pero aplicado a la forma de escribir las ecuaciones químicas según el sistema dualista de Berzelius. Esta teoría simplificaba casi todos los compuestos a combinaciones de óxidos positivos, óxidos negativos y agua. Así, por ejemplo, la reacción entre el trióxido de azufre y el agua para formar ácido sulfúrico se representaba mediante la ecuación:



Esta manera de escribir las fórmulas de los compuestos hacía que el tanteo en las ecuaciones fuera muy simple.

La teoría dualista de Berzelius, que permaneció vigente durante casi un siglo, condujo, entre otras cosas, a concebir las reacciones químicas como una serie de etapas elementales (en las que normalmente aparecían óxidos binarios) cuya suma algebraica proporcionaba la reacción considerada. Esto dio origen a un nuevo método llamado **de las ecuaciones parciales**, donde el balanceo de éstas (realizado también por tanteo) conducía al balanceo inmediato de la ecuación final. Su principal inconveniente era que, en la mayoría de los casos, las ecuaciones parciales eran artificios sin realidad química alguna.

El método del **número de valencia** tiene su origen en los trabajos de Arrhenius sobre la disociación iónica, donde se arrojaba una nueva luz en los

procesos de oxidación-reducción. En 1880, Otis Johnson (Johnson, 1880) estableció las reglas que todavía hoy se utilizan para determinar el número de oxidación (que él llamó *enlace*) de los elementos de un compuesto. No vamos a enumerarlas ahora ya que se encuentran en los libros de texto actuales que tratan el tema. Este método de Johnson estaba limitado por la concepción vigente sobre la naturaleza de la materia, hasta que a principios de siglo William Karlslake (Karlslake, 1907) lo adecuó a los nuevos planteamientos de la disociación electrolítica; unos años después, H.L. Lochte da a conocer una ampliación del método de Johnson, que denominó método de "reacciones de polo". Finalmente, Stuart Brinkley le aplicó las ideas de la teoría de valencia para proponer el llamado "método de ataque" que constituye el actual método del **número de valencia o número de oxidación**.

Uno de los métodos más utilizados hoy para realizar el balanceo de las ecuaciones redox es el **ion-electrón**, que fue propuesto inicialmente por Jette y La Mer (Jette y La Mer, 1927), y que surge como la síntesis de un conjunto de ideas que se habían ido introduciendo desde principios de siglo. Presenta innumerables ventajas respecto de otros utilizados en aquella época, y tuvo una gran aceptación desde el momento de su publicación.

Recogiendo la idea de un alumno, W.S. Endslow publicó una breve nota (Endslow, 1931) que provocó un gran revuelo, no por su contenido sino por la dudosa paternidad del método que en ella describía. En esa nota se esboza el **método algebraico**, sin duda uno de los más completos y de mayor efectividad para realizar el balanceo de las ecuaciones químicas. Fueron muchas las cartas que se recibieron en la editorial citando diversos orígenes del método expuesto por Endslow; parece ser que la primera referencia escrita data de 1877, de un tal James Bottomley (Bottomley, 1877). Este autor pasó rápidamente al olvido ya que casi nunca se le citó al describir su método, hasta que surgió la polémica motivada por el trabajo de Endslow. La principal crítica que se hacía al método algebraico se centraba en el escaso contenido químico que ofrecía de los procesos que estudiaba, pues está basado en el planteamiento de un sistema de ecuaciones matemáticas cuya resolución proporciona el conjunto de coeficientes estequiométricos que balancea la ecuación química. Sin embargo, esta crítica carece de fundamento ya que, en realidad, el método está basado en

dos sólidos principios fundamentales de la Química, que veremos en el siguiente apartado.

Para concluir esta breve reseña histórica, mencionaremos los dos métodos que se van imponiendo actualmente como los más interesantes y efectivos en el balanceo de las ecuaciones químicas: **el método de inspección** y **el método matricial**, que luego comentaremos.

¿Cómo y por qué se balancean las ecuaciones químicas?

La respuesta a por qué son necesarios los coeficientes estequiométricos ya se apuntó al hablar de la Ley de Conservación de la Masa de Lavoisier, la cual conduce a que en ambos miembros de la ecuación debe haber el mismo número de átomos de cada uno de los elementos químicos participantes. De no ser así, significaría que los átomos verían alterada su estructura interna (lo cual sólo ocurre en las reacciones nucleares, donde se ponen en juego grandes cantidades de energía), transformándose en otros átomos distintos, cuando en realidad sólo se produce una reorganización de los enlaces existentes entre ellos sin que se vea modificada dicha estructura. Se destruyen unos enlaces y se forman otros pero los átomos implicados en ellos no cambian. Este punto constituye una fuente casi inagotable de errores conceptuales entre los estudiantes, por lo que se debe prestar una gran atención siempre que haya alguna oportunidad en la que se puedan poner de manifiesto para desvelar su existencia y corregirlos.

A la Ley de Lavoisier hemos de añadir otra frecuentemente olvidada al hablar del balanceo de ecuaciones químicas: la Ley de Conservación de la Carga. En efecto, cuando se puso de manifiesto la existencia de las partículas subatómicas en 1897 y la subsecuente aparición del modelo atómico de Bohr en 1913, se hizo necesario unir ambas leyes para realizar un correcto balanceo de una ecuación química, sobre todo cuando la reacción correspondiente tiene lugar en disolución y aparecen especies iónicas que imponen la segunda restricción (conservación de la carga) en el cálculo de los coeficientes estequiométricos. Cuando sólo aparecen especies neutras, también la estamos considerando pero no lo hacemos de manera explícita. Así pues, el cumplimiento de las leyes de Conservación de la Masa y de la Carga obliga a hacer el balanceo de las ecuaciones químicas.

En lo referente a cómo realizar el balanceo, la situación es más compleja, tal como hemos tenido

oportunidad de comprobar en la sucinta relación histórica del apartado anterior. Es una ocasión más donde podemos observar que los contenidos de la ciencia, por simples que parezcan, nunca están consolidados desde el primer momento, sino que requieren de procesos más o menos largos y laboriosos hasta llegar a las situaciones que se pueden considerar *definitivas*. Aspecto que debemos tener siempre en cuenta cuando elaboremos o construyamos los conceptos científicos con los alumnos, no debiendo ser presentados como acabados y *perfectos* desde un principio sino después de dichos procesos (Gil, 1983), o quizá nunca...

Este balanceo suele causar especiales dificultades a los estudiantes de todos los niveles (Allsop y George, 1982); dificultades que se acentúan si la ecuación química corresponde a una reacción de oxidación-reducción. La mayoría de los libros de texto actuales describen cuatro métodos de balanceo de ecuaciones químicas: el de tanteo, el algebraico, el del número de oxidación y el del ion-electrón (Nyman y King, 1979; Boikess y Sorum, 1987). Los dos primeros suelen presentarse al comienzo del tema del balanceo de ecuaciones, cuando los ejemplos que se proponen son todavía sencillos; se aplican a todo tipo de ecuaciones, aunque no suele hacerse explícito este hecho. Después, cuando se presentan ejercicios más complicados, se introducen los otros dos métodos, y se afirma que sólo son aplicables a las reacciones redox, utilizando entonces ejemplos de ecuaciones que pertenecen únicamente a esa categoría. Esta forma de proceder genera confusión entre los estudiantes. Por este motivo, algunos autores (Barberá, 1990) consideran superflua la necesidad de introducir diversos métodos de balanceo ya que conducen al alumnado a pensar que el comportamiento de las sustancias en las reacciones químicas se describe por principios y leyes distintos cuando sufren procesos redox que cuando lo hacen en otro tipo de transformaciones químicas. Por esta razón, preconizan una simplificación de métodos en la que se trate todas las ecuaciones por igual, en el momento de realizar su balanceo, sea cual sea la naturaleza del proceso químico que está teniendo lugar. Lo único importante debe ser que el estudiante comprenda claramente que el proceso de balanceo es la manifestación de las dos leyes antes citadas. Es frecuente detectar concepciones erróneas por su desconocimiento, incluso en estudiantes que realizan balanceos con gran soltura. En una entrevista (Yarroch, 1985) a estudiantes norteamericanos de

enseñanza media para averiguar cómo obtenían los coeficientes estequiométricos de ecuaciones sencillas se reveló que para la mayoría de ellos los subíndices y los coeficientes eran números que se distinguían principalmente por su situación en la ecuación y que proporcionaban la misma información: el número de símbolos presentes; la función de los coeficientes era simplemente la de multiplicar los subíndices para balancear la ecuación. Resultan asombrosos los diagramas dibujados por estos estudiantes para explicar las ecuaciones químicas. Es, pues, evidente que la escritura repetitiva de ecuaciones y sus balanceos correspondientes se convierte pronto en una tarea mecánica sin ningún contenido químico donde se aprende poco y se pierde mucho tiempo (Campanario y Ballesteros, 1991).

La tendencia actual, y con la que estamos completamente de acuerdo, es la de establecer un método único para realizar el balanceo de cualquier ecuación química "a mano", y emplear programas de computadora cuando la complejidad de la ecuación, o la cantidad de las que se deban balancear, sea lo suficientemente considerable que desaconseje la realización de dicho balanceo mediante lápiz y papel. Para el primer caso, ha sido propuesto el **método de inspección** (Ling, 1979), un sencillo procedimiento basado en el algebraico pero planteado mediante un algoritmo de reglas simples y fáciles de memorizar. Para el segundo caso, presentaremos un programa de computadora que permite balancear de forma automática ecuaciones químicas por el **método matricial**, un procedimiento largo y complejo para realizar "a mano" pero que permite obtener información muy interesante, no asequible por otros métodos.

El método de inspección ha sido descrito en distintas ocasiones desde su introducción por Ling en 1979, pero curiosamente suele centrarse en su capacidad para balancear ecuaciones redox (Merino, 1984), cuando en realidad es perfectamente válido para cualquier tipo de ecuación química (Porter, 1985; García, 1987). Si bien el balanceo final se obtiene resolviendo un sistema de ecuaciones (por lo que está basado en el método algebraico), la *inspección* previa de la ecuación conduce a un sistema bastante simplificado, además de obligar a un examen detenido de la misma, con el consiguiente valor didáctico del proceso. Por cuestiones de extensión no podemos entrar ahora en detalles sobre el mismo, pero puede obtenerse una descripción completa en las referencias antes citadas.

Método matricial

En todos los casos, el método algebraico es suficiente para estudiar ecuaciones de balanceo único, es decir, ecuaciones que sólo pueden tener un conjunto de coeficientes estequiométricos (desestimando, lógicamente, los que sean múltiplos de dicho conjunto). Las ecuaciones propuestas en los cursos de química elementales y medios son de este tipo, aunque en ocasiones se *deslizan* algunas que no lo son, provocando quebraderos de cabeza tanto a los estudiantes como al profesor. Estas ecuaciones tienen, en general, el mismo número de elementos (E) que de compuestos (C), o difieren en una unidad, es decir, $E = C$ o $C = E + 1$. Un ejemplo del primer caso, con 3 elementos y 3 compuestos, lo tenemos en



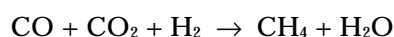
y uno del segundo, en la combustión del butano que vimos al principio (4 compuestos y 3 elementos). En esta última situación, se introduce una solución arbitraria (normalmente que el coeficiente del primer compuesto sea 1) para que el sistema de ecuaciones matemáticas tenga el mismo número de incógnitas que de ecuaciones y sea resoluble por los procedimientos habituales. Hay que advertir que esta forma de determinar si una ecuación es de balanceo único o no, es una simplificación que resulta cierta en la mayoría de los casos pero no siempre: la afirmación más general debemos buscarla en el álgebra de matrices. Es el rango de la matriz de los subíndices el que determina de manera unívoca este hecho.

Cuando $C > E + 1$, es muy probable que el balanceo no sea único, es decir, existan infinitos conjuntos (no múltiplos entre sí) de coeficientes estequiométricos que permitan balancear la ecuación. Insistimos en que también aquí es el rango antes mencionado el que discrimina de forma definitiva. En este caso, el balanceo de la ecuación que estamos analizando puede obtenerse como combinación lineal de otras ecuaciones balanceadas más elementales, es decir, que cada una de éstas sea de balanceo único y que, en general, tenga algún compuesto menos que la ecuación inicial. El método matricial discrimina automáticamente todas estas situaciones y otras que puedan presentarse, como la imposibilidad de balancear una ecuación porque le falte algún compuesto o, incluso, que cambie "de lado" alguno de los compuestos porque es un reactivo y se ha considerado producto, o viceversa.

El método matricial es el más moderno y poten-

te (Krishnamurthy, 1978; Blakley, 1982; Garrigós, 1990), para el que es necesario el uso de programas de computadora si se pretende obtener un buen rendimiento, y no perderse en una maraña de cálculos. Antes de presentar el programa de computadora que hemos desarrollado para llevar a cabo el balanceo mediante este método, vamos a describir brevemente el procedimiento que utiliza el método matricial, siguiendo su forma de operar con un ejemplo.

Balancearemos la ecuación



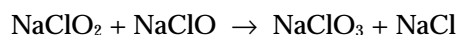
La matriz que se obtiene a partir de los subíndices es

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 4 & 2 \end{pmatrix}$$

La primera fila corresponde a los subíndices del carbono, la segunda a los del oxígeno, y la tercera a los del hidrógeno. Resaltemos que no es necesario indicar qué compuestos son reactivos y cuáles productos (lo cual se podría hacer mediante números negativos para éstos y positivos para aquéllos), ya que el método, como se ha dicho antes, mostrará, mediante esos signos, a qué "lado" se deben encontrar. Por supuesto, no por consideraciones termodinámicas sino simplemente por razones de conservación de masas y cargas.

Como hemos apuntado más arriba, el rango (R) de esta matriz de subíndices determina si la ecuación es de balanceo único o no.⁽¹⁾ Cada columna representa un compuesto químico, por lo que es evidente que el número mínimo de compuestos necesario para describir una reacción química será R+1. Si el número de compuestos (C) de que consta la ecuación es igual a R+1, responderá a un único proceso químico. Si C es mayor que R+1, la ecuación representará distintos procesos químicos, cuyo número vendrá dado por C-R. En el caso de que C sea igual

a R, la ecuación no se podrá balancear por la ausencia de algún compuesto. El caso que falta, que C sea menor que R, es evidente que se trata de una situación totalmente imposible. Todo este análisis no es fácil de realizar sin el auxilio de una computadora (o cuando menos de una buena calculadora científica), por lo que resulta frecuente hacer esta misma descripción simplificada en términos de elementos y compuestos en lugar de rangos y compuestos, tal como ya indicamos anteriormente. Un ejemplo del incorrecto funcionamiento de esta simplificación lo tenemos en la ecuación:



donde C = E + 1 pero no es de balanceo único ya que C-R = 4 - 2 = 2, indicando que consta de dos ecuaciones elementales. Podemos observar claramente que la relación material del sodio coincide con la del cloro; esto da lugar a que en la matriz de subíndices la fila del primero sea linealmente dependiente del segundo. En este caso concreto son idénticas.

Una vez establecida la matriz de subíndices, el siguiente paso consiste en transformarla en su **hermítica normal**, lo cual se hace habitualmente mediante el método de Gauss-Jordan. El resultado que presentamos a continuación mostrará a qué tipo de matriz nos estamos refiriendo. Se trata de operar combinando filas entre sí, sumándolas o restándolas a otras o a múltiplos de ellas, para obtener una diagonal principal con valores unidad:

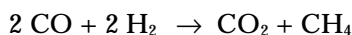
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

A continuación, se añaden tantas filas de ceros como haga falta para convertirla en una matriz cuadrada; en este ejemplo serán dos filas. Y, finalmente, le restamos la matriz unidad, lógicamente de las mismas dimensiones; aquí será, pues, una matriz unidad de 5 × 5. El resultado al que se llega en este ejemplo es:

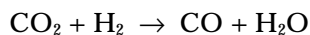
$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

⁽¹⁾ Recordemos brevemente que el rango de una matriz es igual al máximo número de filas linealmente independientes de dicha matriz. El rango por filas coincide siempre con el rango por columnas. Se puede hallar evaluando determinantes obtenidos a partir de la matriz en cuestión. Así, el rango es igual al orden del mayor determinante posible que tenga un valor distinto de cero. Existen diversos métodos sistemáticos para averiguar el rango de una matriz; están descritos en cualquier libro de texto de matemáticas que trate el tema del cálculo matricial.

Las columnas no nulas se encuentran siempre a la derecha, y corresponden a coeficientes estequiométricos de ecuaciones balanceadas, leyéndolos de arriba abajo. Los signos permiten atribuir a cada compuesto su "comportamiento" como reactivo o como producto. El ejemplo descrito pertenece a una ecuación de balanceo múltiple (tal como ya habíamos averiguado al calcular C - R, que proporcionó el valor 2), porque existen dos columnas no nulas que corresponden a ecuaciones elementales cuyas combinaciones lineales permiten obtener balanceada la ecuación inicialmente propuesta, y que tendrá así infinitos conjuntos de coeficientes estequiométricos posibles para su balanceo. Definitivamente,



y



Una combinación lineal que podemos hacer como ejemplo podría ser sumar la primera con la segunda multiplicada por 3. Nos proporcionará uno de los infinitos balanceos posibles de la ecuación inicial:



En el caso de las ecuaciones de balanceo único, sólo la última columna de la matriz anterior es no nula. Si todas las columnas fueran nulas, la ecuación sería de imposible balanceo porque le faltaría algún compuesto. Como podemos ver, el método matricial permite realizar unos análisis sumamente ricos, convirtiendo los balanceos, que suelen tratarse en las aulas como procedimientos rutinarios, en una herramienta de gran interés didáctico.

El programa de computadora AJUSTEQ

Hemos creado el programa AJUSTEQ para computadoras personales compatibles PC, con sistema operativo MS-DOS, que realiza el balanceo de ecuaciones químicas a partir de la matriz de subíndices antes descrita. Permite balancear ecuaciones hasta de 21 elementos y 24 compuestos, con la posibilidad de almacenar la matriz de subíndices en un fichero, lo que permite su posterior tratamiento para ampliar o modificar la información. Asimismo, posee la capacidad de balancear ecuaciones en estado iónico, hecho poco frecuente en otros programas de similares características. En ecuaciones que no puedan ser balanceadas por faltar algún compuesto, se indica

claramente, lo cual resulta muy útil, desde el punto de vista didáctico, para proponer posibles sustancias que permitan completar la ecuación.

El programa AJUSTEQ puede ser solicitado al autor de forma gratuita a través del correo electrónico de Internet a la dirección que se indica. Se enviará mediante un *attachment* en un único fichero comprimido en formato ZIP, donde se incluyen, además del programa principal, el resto de programas necesarios, ejemplos y la documentación correspondiente. Si se desea, también pueden solicitarse al autor otros ficheros adicionales: una versión simplificada del programa para la calculadora HP-48GX y un documento interactivo para MATHCAD 4.0 con ejemplos de los métodos algebraico y matricial.

Bibliografía

- Allsop, R.T. y George, N.H., Redox in Nuffield Advanced Chemistry, *Ed. Chem.*, **19**, 57-59, 1982.
- Barberá, O., Ajuste de ecuaciones químicas: ¿por qué usar reglas arbitrarias y hechos ficticios?, *Ens. Cien.*, **8** [1], 85-88, 1990.
- Blakley, G.R., Chemical Equation Balancing, *J. Chem. Educ.* **59** [9], 728-734, 1982.
- Boikess, R.S. y Sorum, C.H., *Cómo resolver problemas de química general*, Paraninfo S. A., España, 1987, 311-345.
- Bottomley, J., Note on a Method for Determining Coefficients in Chemical Equations, *Chem. News.*, marzo, **37**, 110-111, 1878.
- Brinkley, S.R., Application of the Electron Concept to Oxidation-reduction Reactions in General Chemistry, *J. Chem. Educ.*, **2** [7], 576-584, 1925.
- Campanario, J.M. y Ballesteros, R., Ajuste de ecuaciones químicas: un enunciado poco afortunado para un problema ya resuelto, *Ens. Cien.*, **9** [2], 205-207, 1991.
- Endslo, A.W.S., Correspondence, *J. Chem. Educ.*, **8** [12], 2453, 1931.
- García, A., A new method to balance chemical equations, *J. Chem. Educ.*, **64**, 247-248, 1987.
- Garrigós, L., *Aproximación a la evolución histórica de los métodos de ajuste de las ecuaciones químicas*, Instituto de Cultura Juan Gil Albert, España, 1990.
- Gil, D., Tres paradigmas básicos en la enseñanza de las ciencias, *Ens. Cien.*, **1** [1], 26-33, 1983.
- Jette, E.R. y La Mer, V.K., The balancing of oxidation-reduction equations, *J. Chem. Educ.*, **4** [9], 1021-1030, 1927.

- Johnson, O.C., Negative Bonds and Rules for Balancing Equations, *Chem. News.*, 30 julio, 51, 1880.
- Karslake, W.J., Balancing of Ionic Chemical Equations, *Chem. News.*, 26 julio, 41-43, 1907.
- Krishnamurthy, E.V. Generalized matrix inverse approach for automatic balancing of chemical equations, *Intern. J. Math. Ed. in Sci. and Technol.*, **9** [3], 323-328, 1978.
- Lavoisier, A.L., *Tratado Elemental de Química*, Alfguara, España, 1982, 124-125 (versión española de la obra original de 1789).
- Ling, J., *Easy Chemistry*, Goodman Pub., Hong Kong, 1979, 105-112.
- Merino, J.M. y De Diego, A.M., Ajuste de ecuaciones rédox por inspección, *Ens. Cien.*, **2** [1], 72-75, 1984.
- Nyman, C.J. y King, G.B., *Problemas de química general y análisis cualitativo*, AC ediciones, España, 1984, 27-36.
- Porter, S. K., How should equation balancing be taught?, *J. Chem. Educ.*, **62** [6], 507-508, 1985.
- Yarroch, W.L., Student understanding of chemical equation balancing, *J. Res. Sci. Teach.*, **22**, 449-459, 1985. ▀



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

Coordinación del Posgrado
en Química

DOCTORADO EN CIENCIAS (QUÍMICA)

Convocatoria 1997

Líneas de Investigación en:

- Físicoquímica
- Química Analítica
- Química Inorgánica
- Química Orgánica

Duración: Con dedicación exclusiva, el Doctorado directo dura cuatro años. La opción a Maestría en Ciencias (Química) tiene duración de dos años a tiempo completo. Los alumnos se ubican en el programa de acuerdo con su preparación previa.

Beca: Acceso al sistema de BECAS del CONACYT y el de la Universidad de Guanajuato para nuestros estudiantes de tiempo completo.

OBJETIVOS

- Proporcionar una formación de excelencia en Química.