

Aleando latón en el laboratorio escolar

ENSEÑANZA
DE LA QUÍMICA

Julián Arias Aparicio



J. Arias

Instituto de Educación Secundaria
Peñamayor
La Laguna 30, 33520 Nava (Asturias)
C-e: julianaa@educastur.org
Recibido: 06/08/2021
Aceptado: 13/12/2021

Resumen: Se propone un experimento de Química apto para edades de 13-16 años, consistente en recubrir de zinc la superficie de cobre de una moneda de 5 céntimos de euro y, posteriormente, transformarla en latón. Se determina la densidad de la moneda y se mide la masa de zinc que la recubre. La experiencia refuerza los procedimientos de medida básicos y algunos conceptos como las aleaciones, las disoluciones, las transformaciones químicas o la acción de un imán sobre diferentes metales y aleaciones. Como ampliación para niveles educativos superiores, se estima la proporción de Zn en el latón obtenido.

Palabras clave: Moneda 5 céntimos euro, recubrimiento de zinc, aleación, latón, magnetismo de metales.

Abstract: A Chemistry experiment is suggested to students aged 13-16. It consists of coating with zinc the copper surface of a 5 cent euro coin. The second step is transforming the result obtained into brass. The density of the coin is determined and the mass of zinc covering it is measured. The experience reinforces simple measurement procedures and introductory chemical concepts including alloys, solutions or chemical transformations. As an extension for higher education, the proportion of Zn in the brass obtained can be estimated.

Keywords: 5 cent euro coin, zinc coating, alloy, brass, metal magnetism.

Introducción

En el currículo de Física y Química de la educación secundaria en España^[1] se aprecia, en los niveles iniciales (13-15 años), una importante y lógica tendencia a enfatizar los contenidos cualitativos por encima de los cuantitativos. La Química se centra en aprendizajes básicos sobre las propiedades y el comportamiento de la materia y sus transformaciones. Así, uno de los contenidos se refiere a la distinción, no siempre obvia para el alumnado novicio, entre mezclas y sustancias puras. Es frecuente que cualquier mezcla que evoque o lleve el adjetivo "puro/a", como el agua de manantial o el aire de la montaña, les sugiera una sustancia pura que, por su composición química, no lo es. Asimismo, el desconocimiento de los elementos químicos produce confusión entre los metales y las aleaciones, de las que se mencionan como ejemplos, en estos niveles educativos, el acero, el latón, el bronce o el oro nórdico.

El tratamiento para recubrir de latón una moneda de 5 céntimos es un experimento ya realizado con anterioridad por otros autores,^[2-4] aunque sin ningún análisis cuantitativo. Esta experiencia invita a revisar las propiedades de la materia y los cambios que acontecen en ella por acción de la temperatura y por el contacto con otras sustancias, la clasificación de los sistemas materiales según su composición y según su apariencia, o las transformaciones exotérmicas, como el aumento de temperatura que experimenta el agua al disolver en ella NaOH o la combustión del propano en un mechero. Además, en los contenidos trabajados en este expe-

rimento incluimos la medida de magnitudes básicas (masas, volúmenes, longitudes y temperaturas). Por último, como una ampliación para alumnado de niveles superiores, se puede estimar la composición del latón obtenido en la moneda e introducir los diagramas de fases.

Esta experiencia persigue los siguientes objetivos pedagógicos: (1) recordar las unidades y los procedimientos básicos de medida de masas, volúmenes y temperaturas; (2) distinguir entre sustancias puras, mezclas, elementos y compuestos; (3) reconocer el carácter exotérmico del proceso de disolución de NaOH en agua; (4) destruir la falsa creencia de que los imanes atraen a todos los metales y (5) observar cómo la acción de un compuesto químico combinada con el incremento de la temperatura produce en la materia transformaciones no triviales.

Fundamentación conceptual

La finalidad práctica del experimento es recubrir con zinc la capa de cobre de una moneda de 5 céntimos y, posteriormente, convertir ambos elementos en latón mediante la acción del calor (ver fig. 1. Nótese el listel o borde elevado de la moneda).

La moneda de 5 céntimos tiene unas propiedades^[5] que los estudiantes pueden reconocer mediante sencillos procedimientos de medida o por simple inspección:

- Masa nominal: 3,92 g
- Diámetro nominal: 21,25 mm

- Espesor nominal: 1,67 mm
- Composición: acero ferrítico recubierto de cobre
- Es atraída por un imán



Figura 1. Moneda de 5 céntimos de euro, antes (reverso) y después del tratamiento (anverso).

La disolución de NaOH

La primera etapa de nuestro proceso consiste en dotar a la moneda de un nuevo recubrimiento de zinc. Para ello se prepara una disolución concentrada de hidróxido de sodio. Esta sustancia es muy soluble en agua y, cuando se disuelve, se constata un evidente aumento de la temperatura asociado a la entalpía de disolución del compuesto, hecho que será mostrado al alumnado mediante la medición con un termómetro. Se puede estimar el incremento de temperatura ΔT que va a experimentar la masa m de disolución, siendo proporcional a la cantidad de calor Q transferido, que es la entalpía de disolución:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m C_e} \quad (1)$$

donde C_e es el calor específico del agua.

El latón

Podemos considerar el latón como una disolución sólida de Zn (soluto) en Cu (disolvente), pues normalmente la proporción de Zn es inferior al 50%, al menos en las aplicaciones comerciales e industriales habituales. Las estructuras cristalinas de estos dos metales son diferentes (hexagonal compacta el Zn y cúbica centrada en caras el Cu), lo que implica que la solubilidad de Zn en Cu no es total, pero sí muy elevada debido a la pequeña diferencia existente entre los radios atómicos de ambos elementos,^[6] cuyos valores son 145 pm para el Cu y 142 pm para el Zn.^[7]

En la figura 2 se muestra el complejo diagrama de fases de la mezcla Cu-Zn, en el que se aprecia que presenta hasta seis fases distintas (α , β , γ , δ , ϵ y η), siendo la fase α pura la más amplia, con proporciones de Zn inferiores al 36%. Esta fase es una disolución sustitucional en la que los átomos de Zn reemplazan a los de Cu en sus posiciones en la red. Mantiene, por tanto, la estructura cúbica centrada en las caras que presenta el Cu puro. En el diagrama se aprecia

también la brusca disminución del punto de fusión de la aleación para proporciones de Zn superiores al 60%, donde la curva *liquidus* desciende pronunciadamente al crecer la fracción de Zn. Se observa además la aparición de la fase γ para porcentajes de Zn superiores al 50%. Esta fase se evita deliberadamente en la producción de aleaciones comerciales por ser la responsable de unas características de dureza y fragilidad que hacen al latón inservible estructuralmente.^[8] De ahí que los latones comerciales no contengan más del 50% de Zn. Si en nuestro experimento apareciese sobre la moneda alguna mancha verdosa, podría ser indicativo de la formación de la fase γ , que exhibe este color.^[8]

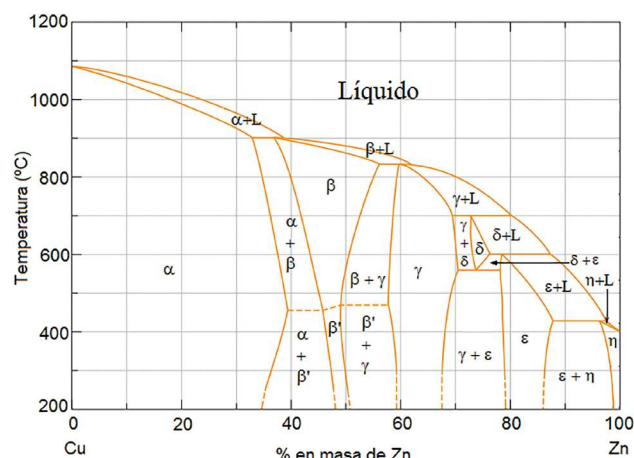
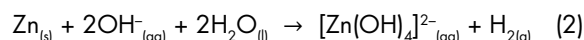


Figura 2. Diagrama de fases de Cu-Zn.^[9]

Más adelante se determinará la masa de zinc que se ha depositado en la moneda y se calculará la masa de cobre que contiene esta. Con ayuda del diagrama de la figura 2 se podrá estimar entonces cuál es la fase de latón que se va a formar en la superficie de la moneda.

“Plateado” y “dorado” de la moneda

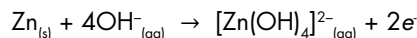
El color “plateado” se consigue por deposición del zinc metálico sobre la moneda de cobre. Para ello se necesita una disolución del ion tetrahidroxozincato(2-), que denominaremos zincato para abreviar. Se obtiene por la reacción en caliente entre hidróxido de sodio en solución acuosa y un exceso de zinc en polvo, ya que el Zn es soluble en disoluciones fuertemente alcalinas:^[10]



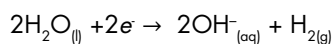
El ion $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}$ es un complejo en el que el catión Zn^{2+} , con estructura electrónica $3d^{10}4s^0$, está rodeado de cuatro ligandos hidroxilo en disposición tetraédrica. Con los cuatro pares de electrones donados por los átomos de O de sendos ligandos OH, el catión cumple la regla del octeto. Mediante los orbitales atómicos $4s$ y $4p_{xyz}$ del Zn^{2+} se forman cuatro orbitales híbridos sp^3 que confieren al anión complejo su estructura tetraédrica.

Durante el calentamiento (sin que hierva) de la disolución de NaOH con zinc en el vaso de precipitado ocurren las semirreacciones siguientes, cuya suma es la reacción (2):

OXIDACIÓN: parte del zinc en polvo se oxida a ion zincato.



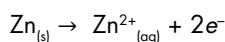
REDUCCIÓN: el agua se reduce a dihidrógeno.



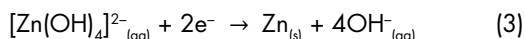
No se observa el desprendimiento de burbujas de H_2 debido a la turbidez de la mezcla por encontrarse en suspensión una parte del polvo de zinc. Asimismo, el movimiento de convección de la suspensión enmascara la visualización de las burbujas de H_2 . Sí se observan, en cambio, cuando se utiliza granalla de zinc, que permanece en reposo en el fondo del vaso de precipitados, siempre que se asegure que hay contacto eléctrico entre la moneda y el zinc para que se haga efectiva la reducción.^[11]

Como se ha añadido exceso de Zn, una fracción de este quedará aún en el medio de reacción sin formar zincato. Al añadir la moneda a la mezcla anterior, el Zn que está en exceso tenderá a oxidarse por tener menor potencial de reducción que el Cu. Los electrones serán cedidos al recubrimiento de cobre de la moneda, que actuará como cátodo. Ocurren ahora las semirreacciones siguientes:

OXIDACIÓN: el Zn sólido en suspensión que no ha reaccionado se oxida a Zn^{2+} .



REDUCCIÓN: el anión zincato que está en contacto con la superficie de la moneda se reduce a Zn.



La transferencia de electrones se produce ahora a través del cobre, por lo que el Zn generado en la reacción 3 queda depositado en dicha superficie, dando lugar a la capa "plateada" que exhibirá la moneda. Además, se liberan iones OH^- del complejo que podrán reaccionar con el exceso de Zn en suspensión, según la reacción 2, produciendo más zincato. Por tanto, la combinación de las reacciones 2 y 3 favorece la producción del zincato, disponible para depositarse sobre el cobre. En la reacción 2 el $\text{Zn}_{(s)}$ está suspendido en la disolución y en la reacción 3 ya se halla depositado sobre el cobre.

En resumen: en una primera fase parte del zinc en suspensión se oxida a zincato mientras parte del agua de la disolución se reduce a dihidrógeno. En la segunda fase, el zinc que no se ha transformado en zincato se oxida al catión bivalente Zn^{2+} a través del cobre de la moneda, a la par que se reduce en la superficie de esta el zincato a zinc metálico. No hay una misma especie química que se oxide y también se reduzca, por lo que no se trata de una reacción de dismutación o desproporción.

Una vez que la moneda está recubierta de zinc ("plateada") se puede "dorar" mediante calentamiento en la llama oxidante de un mechero Bunsen. Este cambio se debe a la formación de la aleación de cobre y zinc, que se produce porque los átomos de zinc migran desde la superficie de la moneda hasta la red cristalina constituida por la fina capa de cobre que inicialmente la recubre, sustituyendo a átomos de cobre en sus posiciones en la red cúbica centrada en las caras.

Desarrollo del experimento y resultados

Puede accederse a la lista de reproducción de vídeos con las diferentes fases del experimento en <https://bit.ly/2UxgPlo>.

La primera actividad es someter una serie de piezas metálicas (Zn, Al, Pb, Cu, Fe, cucharilla de laboratorio) a la acción de un imán, para ver qué efecto produce. Sorprenderá a unos cuantos estudiantes que solo el hierro es atraído por el imán. También se aplica este a monedas de 50 céntimos y de 5 céntimos. El alumnado deberá concluir que la moneda de 5 céntimos es de hierro (acero ferrítico AISI 430)^[12] con un recubrimiento de cobre. Sin embargo, la cucharilla de laboratorio no es magnética y es también de acero (austenítico inoxidable 18%Cr-10%Ni). Basta con que el alumnado más joven comprenda que no todo lo que lleva hierro es sustancia magnética, pero pueden comentarse los detalles sobre los aceros si el experimento se realiza en niveles educativos superiores.

Luego se sumergen dos o tres monedas de 5 céntimos en HCl concentrado para eliminar la capa de óxido y de suciedad. Se enjuagan con agua y se secan bien, debiendo quedar relucientes. A continuación, se miden sus masas con una balanza que aprecia 0,01 g (se toma la media m_0). Asimismo, se mide el diámetro D y espesor h de una de ellas con un calibre que aprecia 0,05 mm. Es instructivo comentar en este punto el concepto de apreciación de un instrumento de medida, que se puede recordar cuando se conecte la balanza y esta muestre en pantalla los dígitos correspondientes.

Con estas medidas se propone al alumnado estimar la densidad de la moneda, haciéndoles ver que tiene forma aproximadamente cilíndrica. El cociente entre la masa y el volumen para un cilindro es

$$\rho_m = \frac{4m_0}{\pi D^2 h} \quad (4)$$

ecuación que permite obtener la densidad de la moneda y compararla con la densidad ρ_a del acero del que está hecha.

Como un primer intento de recubrir la moneda de 5 céntimos con una capa de zinc, la introducimos durante unos tres minutos en un vaso de precipitados con 200 mL de agua caliente (sin hervir) y una cucharadita de polvo de Zn. Se extrae y se comprueba, en contra de la opinión de una parte del alumnado, que no se ha modificado su recubrimiento de Cu. Se concluye que hace falta algún reactivo que provoque la deposición del zinc sobre la superficie de cobre de la moneda.

Con 10 g de sosa cáustica (NaOH) se preparan unos 200 mL de disolución acuosa. El alumnado debe calcular que tiene

una concentración aproximada de 50 g/L. Se mide la temperatura del agua antes de añadir el soluto (21 °C) y conforme el NaOH se va disolviendo (30 °C). Los estudiantes deberían razonar que este incremento de temperatura es consecuencia del desprendimiento del calor de disolución del NaOH.

Podemos estimar el aumento esperado de temperatura haciendo uso de la ecuación (1). La masa de 10 g de NaOH equivale a 0,25 mol. El calor desprendido en la disolución se transfiere a la mezcla de 200 mL de agua (que tienen una masa de 200 g) y 10 g de NaOH. El calor de disolución del NaOH, para la concentración de 50 g/L, es ^[13] 42 800 J/mol, luego el aumento teórico de temperatura es, según la ecuación (1), $\Delta T = \frac{42\,800 \text{ J/mol} \cdot 0,25 \text{ mol}}{210 \text{ g} \cdot 4,2 \text{ J/(g}^\circ\text{C)}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, algo mayor que la variación de 9 °C que se midió experimentalmente. La diferencia puede explicarse considerando que parte del calor es absorbido por el entorno (vaso de precipitado y aire circundante). El proceso de medida correcto requiere, como se sabe, aislar el sistema utilizando un calorímetro y determinar previamente su equivalente en agua, que implica un término añadido a la masa del denominador; así disminuye el cociente, de forma que ΔT se aproximaría más al valor experimental.

Se calienta la disolución de NaOH sin que hierva y se añade nuevamente una cucharadita de Zn en polvo. Se introduce la moneda y, removiendo con la varilla de vidrio, se la mantiene sumergida durante unos tres minutos, hasta que se observe que ha adquirido un color plateado. El alumnado debe concluir que se debe al Zn depositado sobre la superficie de la moneda. Debe notarse la diferencia de apariencia entre esta capa del metal y el Zn en polvo usado como reactivo. Se extrae la moneda del vaso de precipitados, se enjuaga con agua y se seca. Presentará entonces un llamativo brillo plateado. A continuación, se mide su masa (m_1), comprobándose que es mayor que la masa inicial m_0 . En este punto puede surgir la cuestión de si dependerá la masa de zinc depositada en la moneda del tiempo que esté sumergida en

la mezcla acuosa de NaOH y Zn. La respuesta requeriría otra serie de pruebas experimentales que no se han realizado, si bien esta cuestión puede ser la base de una propuesta de investigación para el alumnado de niveles superiores.

Por último, se enciende el mechero Bunsen con llama oxidante. Se coge la moneda con las pinzas y se acerca a la llama, sin que contacte demasiado con esta para evitar la adhesión de carbonilla. Se calienta suavemente volteándola varias veces, hasta que la capa de Zn tome color dorado. La buena conductividad térmica del Cu favorece la formación de la capa de latón. Para terminar, se enfría en agua la moneda, se seca y se mide nuevamente su masa (m_2).

La tabla 1 recoge los resultados de las diferentes medidas y otros datos que serán utilizados para estimar la densidad de la moneda y la composición del latón obtenido sobre su superficie.

Densidad de la moneda

La moneda tiene forma no exactamente cilíndrica, debido a los relieves producidos por la acuñación y al listel. Se puede estimar su densidad con la ecuación (4), sustituyendo los datos de la tabla 1, obteniéndose $\rho_m = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$. El resultado es sensiblemente menor que la densidad del acero que constituye la mayoría de la masa de la moneda, e incongruente con el hecho de que el recubrimiento de cobre tiene aún más densidad que el acero interior de la moneda. La discrepancia surge de que, con el calibre, se ha medido realmente el espesor del listel (1,65 mm) y no el espesor interior de la moneda, algo menor. Medido este con un micrómetro (ver fig. 3), resulta $h' = 1,42 \text{ mm}$ y se obtiene ahora que la densidad de la moneda es $\rho_m = 7,7 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$, resultado que se desvía menos de un 2 % con respecto a la densidad del acero.

Tabla 1. Resultados experimentales y datos de la moneda de 5 céntimos

Magnitud	Dato o valor teórico	Valor experimental
m_0	3,92 g ^[5]	(3,92 ± 0,01) g
D	21,25 mm ^[5]	(21,30 ± 0,05) mm
h	1,67 mm ^[5]	(1,65 ± 0,05) mm
h'	-	(1,42 ± 0,01) mm
m_1	-	(3,97 ± 0,01) g
m_2	-	(3,97 ± 0,01) g
e	$24 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ ^[14]	-
ρ_{Cu}	$8,96 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ^[15]	-
ρ_{Zn}	$7,8 \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ ^[16]	-
ρ_m	-	$(7,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-3} \text{ g/mm}^3$
ΔT	13 °C	(9 ± 1) °C



Figura 3. Medida del espesor interior de la moneda con un micrómetro.

Composición del latón formado en la moneda

Como una ampliación para alumnado de niveles superiores, se puede estimar la composición del latón obtenido en la moneda, calculando la proporción de zinc respecto a la de cobre y zinc juntas. En efecto, la masa de zinc depositado en la moneda es $m_1 - m_0$, luego

$$\% Zn = \frac{m_1 - m_0}{m_{Cu} + m_1 - m_0} \cdot 100 \quad (5)$$

La masa de cobre m_{Cu} del recubrimiento de la moneda se determina aproximadamente asumiendo que la pieza tiene forma de disco perfecto con radio $D/2$ y altura h , ignorando los relieves y el listel. La capa de cobre que recubre ambas caras del disco y el borde lateral tiene espesor supuestamente uniforme e , procedente del baño electrolítico controlado al que se someten los cospeles antes de ser acuñados. Por tanto, el volumen del recubrimiento de cobre es el producto del área de toda la superficie de la moneda por el espesor del recubrimiento, es decir,

$$V_{Cu} = \pi D(D/2 + h)e$$

Multiplicando por la densidad del cobre, la masa del recubrimiento será

$$m_{Cu} = \pi D(D/2 + h)e \rho_{Cu} \quad (6)$$

Sustituyendo en (6) los valores de la tabla 1 se obtiene $m_{Cu} = 0,18$ g. Este resultado es congruente, dentro del error experimental y de las aproximaciones realizadas, con la proporción 5,36 % de Cu atribuida a las monedas de 5 céntimos.^[17] En efecto, aplicando este porcentaje a la masa m_0 de la moneda se obtiene una masa teórica de Cu de 0,21 g.

Por último, reemplazando en (5) $m_1 - m_0 = 0,05$ g y $m_{Cu} = 0,18$ g resulta que la composición aproximada de nuestro latón es 22 % Zn y 78 % Cu. En el diagrama de fases de la figura 2 se observa que esta proporción corresponde a la fase α del latón.

Seguridad en el laboratorio y tratamiento de residuos

Como es sabido, la actividad de laboratorio requiere contemplar una serie de medidas de seguridad y protección dependiendo de los reactivos e instrumentación que se utilicen. En el presente trabajo se ha de tener en cuenta que tanto el HCl como el NaOH son corrosivos, por lo que deben manipularse con guantes. El HCl es además irritante para las vías respiratorias, así que requiere el uso de campana extractora. Como no se dispone de ella, bastará con utilizar mascarilla y operar en una zona con buena ventilación. Por su parte, el Zn en polvo es muy reactivo y puede llegar a ser explosivo, debiendo manipularse con precaución, especialmente al depositarlo en el vaso calentado con el mechero Bunsen, así como reducir a lo imprescindible su contacto con el aire.

En cuanto a los instrumentos utilizados, debe comprobarse el correcto funcionamiento de la llave de paso del gas el mechero Bunsen, además de observar las normas de manejo de sustancias inflamables y las precauciones asociadas al uso de una llama. Finalmente, el amianto de la rejilla utilizada para el calentamiento del vaso está catalogado como cancerígeno. Sin embargo, es segura su manipulación siempre que se evite la rotura, el astillamiento o la conversión en polvo del amianto.

Los inevitables residuos generados en todo trabajo de laboratorio deben desecharse de manera adecuada,^[18-19] aun siendo pequeñas las cantidades de reactivos utilizadas. En el experimento que nos ocupa, la mezcla acuosa de zinc e hidróxido de sodio se filtra para separar la fase líquida de la fase sólida, que es la que contiene la mayoría del zinc utilizado. La fase líquida, alcalina, se deposita en el contenedor de las disoluciones acuosas básicas. El ácido clorhídrico se diluye hasta una concentración inferior al 10% v/v y se deposita en el contenedor de las disoluciones ácidas sin metales pesados. Otra opción es neutralizar la fase líquida alcalina anterior con el ácido clorhídrico, previamente diluido hasta pH > 3, en cuyo caso se depositará la mezcla resultante en el contenedor de las disoluciones acuosas inorgánicas.

La fase sólida contiene el exceso de zinc que, a fin de evitar riesgos de explosión cuando se seque, se debe transformar en sulfato de zinc, soluble en agua, mediante la adición de un exceso de ácido sulfúrico diluido^[4]. En la reacción se desprende hidrógeno gaseoso, que es muy inflamable, por lo que la operación debe hacerse en zona ventilada o bajo la campana extractora y sin presencia de llama alguna. La disolución resultante se vierte en el contenedor de las disoluciones de sales inorgánicas.

Conclusiones

Se ha realizado una experiencia, destinada al alumnado de Química de 13-16 años, consistente en convertir en latón la capa externa de cobre de una moneda de 5 céntimos. Después de limpiar la moneda con HCl concentrado y medir su masa y dimensiones, se la sumergió durante unos 3 minutos en una mezcla caliente de zinc en polvo y disolución de NaOH de concentración aproximada 50 g/L, para recubrirla de una capa de zinc cuya masa resultó ser de 0,05 g. A continuación, se calentó suavemente en llama oxidante, apareciendo entonces la aleación de cobre y zinc, cuya composición se ha estimado en 22 % Zn - 78 % Cu, correspondiente a latón- α . A lo largo de la experiencia se han verificado diferentes hechos experimentales, como el desprendimiento de calor en la disolución de NaOH, la necesidad de este reactivo para lograr la capa de zinc o la igualdad de masa de la moneda recubierta de zinc y recubierta de latón. Además, el desarrollo del experimento ha permitido reforzar algunos de los contenidos de la materia Física y Química del currículo pertenecientes a los bloques *La actividad científica* (magnitudes y su medida, trabajo de laboratorio), *La materia* (propiedades de la materia, sustancias puras y mezclas, elementos y compuestos), *Los cambios* (cambios físicos y cambios químicos, la reacción

química) y *El movimiento y las fuerzas* (fuerzas de la naturaleza: fuerzas magnéticas).

Toda la experiencia ha sido grabada en vídeo y proyectada en el aula para desarrollar una sesión de clase con base en este experimento. Se encuentra disponible en <https://bit.ly/2UxgPlo>.

Agradecimientos

El autor agradece a Isaac Montes Solares (IES Peñamayor) la ayuda prestada para preparar el vídeo del experimento y su divulgación en youtube. Asimismo, agradece el estímulo del prof. J. M. Gavira Vallejo (Universidad Nacional de Educación a Distancia) para publicar esta experiencia.

Bibliografía

- [1] Decreto 43/2015, de 10 de junio, por el que se regula la ordenación y se establece el currículo de la Educación Secundaria Obligatoria en el Principado de Asturias.
- [2] S. Heredia Avalos, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **2007**, 4, 349-351.
- [3] J. M. Gavira Vallejo, D. Paredes Roibás, *Química insólita*. Experiencia n° 345. Certificado de Formación del Profesorado (Cursos de Formación Permanente de la UNED), Dpto. Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas, 2018.
- [4] <https://edu.rsc.org/experiments/turning-copper-coins-into-silver-and-gold/839.article> (visitada el 12/10/2021).
- [5] <https://www.bde.es> (visitada el 12/10/2021).
- [6] E. Nogués en *Caracterización de latones obtenidos por colada continua* (Proyecto Fin de Carrera), Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.
- [7] E. Clementi, D. L. Raimondi, W. P. Reinhardt, *J. Chem. Phys.* **1967**, 47, 1300-1307.
- [8] <https://www.unioviado.es/sid-met-mat/MATMET/LATONES.doc> (visitada el 12/10/2021).
- [9] Adaptado de Callister, W. D. Jr. en *Material science and engineering: an introduction*, John Wiley & Sons, New York, 2007, p. 283.
- [10] F. Burriel, F. Lucena, S. Arribas, J. Hernández en *Química analítica cualitativa*, Thomson, Madrid, 2002, p. 692.
- [11] <http://www.escrioscientificos.es/trab21a40/Cu-Zn-latón/Cu-Zn-latón.htm> (visitada el 12/10/2021).
- [12] <http://www.aceroinoxidablee.com/acero-inoxidable-tipo-430-serie-400> (visitada el 12/10/2021).
- [13] T. F. O'Brien et al. en *Handbook of Chlor-Alkali Technology*, Springer, New York, 2005. Calculado a partir de los datos de esta referencia (tabla H2, p. 1517) para una concentración de 50 g/L.
- [14] https://elpais.com/diario/2001/07/04/futuro/994197602_850215.html (visitada el 12/10/2021).
- [15] David R. Lide, ed., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Internet Version 2005, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005, p. 4-9.
- [16] *Ibidem*, p. 15-29.
- [17] <https://www.monedanumismatica.com/euro/> (visitada el 12/10/2021).
- [18] Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Nota Técnica de Prevención n° 767. *Residuos peligrosos en centros docentes de secundaria: gestión intracentro*.
- [19] <https://servicios.unileon.es/gestion-de-residuos/clasificacion-de-los-residuos-en-la-universidad/> (visitada el 19/10/2021).