

Tópicos para la mejor enseñanza de la química en el bachillerato.

# Una reacción oscilante para alumnos del nivel medio superior

F. Guillermo Mosqueira P. S. y Adrián Fuentes Vetán\*

## Abstract (An oscillatory reaction for high school)

We propose a simple way to understand and see an oscillating chemical reaction—the *Belousov-Zhabotinsky reaction*—for high school students. To that end we recall some chemical concepts, as redox, reaction mechanisms, and redox indicators, most of them taught at the high school level. Such framework will be useful to understand some aspects of a very complex chemical reaction. Such reaction is shown in the Chemistry Hall of Universum, the Science Museum of the National Autonomous University of Mexico. We hope that such exhibit would be useful to chemistry and biology teachers of such level.

## Resumen

Proponemos una manera sencilla de conceptualizar y observar una reacción oscilante —la reacción de *Belousov-Zhabotinsky*— para estudiantes del nivel medio superior. Para ello hacemos uso de algunas ideas de la química, tales como: mecanismo de reacción, oxidación, reducción, e indicadores redox, la mayoría de las cuales se explican en ese nivel de enseñanza. Ellas nos servirán de apoyo para explicar algunos aspectos de las reacciones oscilantes, que son de considerable complejidad.<sup>1</sup>

## Introducción

Una reacción oscilante con agitación continua (Shakhashiri, 1985; Atkins, 1991) se caracteriza porque algunas de las especies químicas que intervienen se encuentran *oscilando en concentración*; es decir, para cada punto fijo en dicho volumen, su concentración *aumenta y disminuye* periódicamente, lo cual es

verdaderamente asombroso si las comparamos con las reacciones químicas ordinarias, que no son oscilantes.

Estos cambios periódicos en concentración se pueden revelar al hacer uso de indicadores redox apropiados (atención, no se deben confundir estos indicadores con los indicadores ácido-base), los cuales dejarán *ver* los cambios de concentración por medio de cambios de color que se repetirán igualmente de manera periódica. A pesar de que el comportamiento de una reacción oscilante es muy complejo desde el punto de vista químico, los estudiantes del nivel medio superior podrán comprender el origen de los cambios de color que se observan en esta reacción, y con ello verificar que *hay oscilaciones de concentración*.

La reacción de *Belousov-Zhabotinsky* (que abreviaremos como reacción de BZ) es la oxidación del ácido malónico por medio de bromatos en un medio ácido. Esta reacción oscilante se descubrió y comenzó a estudiar en 1958, por el químico ruso Belousov. Entre la incredulidad y dificultades para estudiar esta reacción, transcurrieron tres décadas antes de lograr entender su grado de complejidad con todo detalle. Entre tanto, otras reacciones oscilantes se descubrieron, las cuales se observan principalmente en los organismos vivos. Este tipo de reacciones químicas son de gran relevancia, puesto que pueden ser el sustento químico de los relojes biológicos observados en los organismos vivos (Ahlgren & Halberg, 1990; Gay, 1971).

Antes de abordar el tema, recordemos algunos conceptos químicos relevantes.

## Definiciones

### Reacción de oxidación-reducción

Una reacción química involucra el rompimiento de enlaces químicos (en los reactivos) y la formación de nuevos enlaces químicos (para formar los productos). En una reacción química de oxidación-reducción el número de oxidación de algunos de los átomos participantes cambia. Cuando en uno de los productos uno de sus átomos dona (total o parcialmente) sus electrones, se dice que se *oxida*. Alternativamente, cuando un átomo en los productos de

\* Universum, Dirección General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM, AP 70-487, Del. Coyoacán, 04510, México, DF. Recibido: 9 de octubre de 2003; **aceptado**: 9 de septiembre de 2004.

<sup>1</sup> Para quienes habitan la zona metropolitana del DF, esta reacción se muestra en la Sala de Química de Universum, el Museo de las Ciencias de la UNAM. Los maestros de química y biología pueden usarla para facilitar el aprendizaje de temas que forman parte de sus programas de estudio.

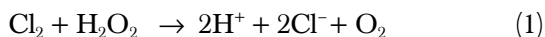
la reacción acepta (total o parcialmente) electrones, se dice que se *reduce*. Puesto que ambos procesos proceden simultáneamente, a este tipo de reacciones químicas se le da el nombre de reacciones de oxidación-reducción o reacciones redox (También hay reacciones químicas en donde *no* hay cambio en el número de oxidación de los átomos participantes, por ejemplo las reacciones de neutralización ácido-base).

### Períodos y oscilaciones

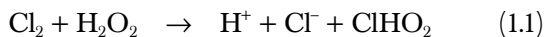
Las oscilaciones son variaciones periódicas de una magnitud física (en nuestro caso, la concentración). Un comportamiento periódico es aquel que se repite exactamente igual en intervalos iguales de tiempo.

### Mecanismo de reacción

Al escribir una ecuación que representa una reacción química, especificamos qué reactivos intervienen y qué productos se forman. Al balancearla, tomamos en cuenta la conservación de la materia que exige que no puede haber creación ni destrucción de la materia. Sin embargo, no debemos confundirnos, *para la mayoría* de las reacciones químicas esta escritura *no* significa que la reacción química *esté sucediendo* como se está escribiendo en la ecuación. Es conveniente analizar un ejemplo para clarificar este tema. Consideremos la oxidación del peróxido de hidrógeno con cloro (Guardiola, 1981):



La lectura de esta ecuación podría hacernos pensar que esta reacción química ocurre así como está escrita: una molécula de cloro choca con otra de peróxido de hidrógeno y, como resultado de esa colisión, se forman dos protones, dos cloruros y oxígeno molecular. Sin embargo esta reacción *no ocurre así*. En su lugar, se lleva a cabo por medio de dos reacciones químicas diferentes que dan como resultado final la ecuación (1). Éstas son:



Cada una de estas reacciones es una *reacción elemental*. La suma de ellas debe dar por resultado el cambio químico global, representado por la ecuación (1). En efecto, se puede corroborar que (1) es la suma de (1.1) y (1.2).

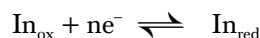
Por lo general, las reacciones químicas se llevan a cabo en una secuencia de varias reacciones elementales, que constituyen el *mecanismo de reacción* de

esa reacción (es decir, el mecanismo de reacción es el conocimiento detallado de cómo los reactivos se transforman en productos). En este ejemplo el mecanismo de reacción contiene sólo dos reacciones elementales [(1.1) y (1.2)]. Son muy pocas las reacciones químicas que se llevan a cabo en un solo paso, tal como está escrita la reacción química; por lo general una reacción química consta aproximadamente de dos a cinco reacciones elementales. El mecanismo de reacción de cualquier reacción química debe descubrirse por métodos experimentales y teóricos.

### Indicadores redox

En la práctica de la química analítica con frecuencia se utilizan indicadores redox (Skoog & West, 1992) –los cuales no deben confundirse con los indicadores ácido-base– que cambian de color de acuerdo con la predominancia del indicador oxidado ( $\text{In}_{\text{ox}}$ ) o del indicador reducido ( $\text{In}_{\text{red}}$ ). Por lo general un cambio de color del indicador supone una variación de concentración entre estas especies de un factor de 100 (Skoog & West, 1992).

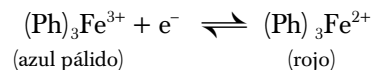
La semirreacción responsable del cambio de color de un indicador redox se escribe así:



donde  $n\text{e}^-$  es el número de electrones transferidos.

En la reacción de BZ el indicador redox utilizado es un tipo de compuestos orgánicos conocidos como 1,10-fenantrolinas (u ortofenantrolinas) que tienen la propiedad de formar compuestos complejos estables con el hierro. La ortofenantrolina tiene un par de átomos de nitrógeno en posiciones tales que cada uno puede formar una unión covalente-coordinada con el ion de hierro. Así, tres moléculas de ortofenantrolina se combinan con cada ion hierro para formar el complejo con la estructura mostrada en la figura 1 (Skoog and West, 1992).

La fórmula de este complejo, conocido también como “ferroína”, se acostumbra representar por el símbolo  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{2+}$ . El color de este complejo hace posible la identificación visual del estado de oxidación del hierro, ya sea al oxidarse o reducirse en una reacción redox reversible:

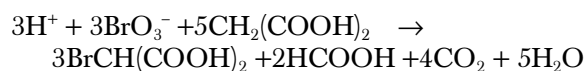


donde el complejo de hierro (III) es de color azul pálido y el reducido puede ir desde casi incoloro hasta un color rojo.

Por otra parte, el ion cerio (IV) también se encuentra en la mezcla reactiva de la reacción de BZ y es un poderoso oxidante que oxida fácil y rápidamente al hierro (II). Por ello, una alta concentración de cerio (IV) inducirá una alta concentración de  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{3+}$  (que mostrará un color azul pálido) y una baja concentración de cerio (IV) provocará una baja concentración de  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{3+}$  (y alta de  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{2+}$ , con una coloración roja) lo que hará posible la identificación visual del estado de oxidación del hierro, como lo habíamos dicho anteriormente.

### La reacción de Belousov-Zhabotinsky

La reacción de BZ es la oxidación de ácido malónico por medio de bromatos en un medio ácido:

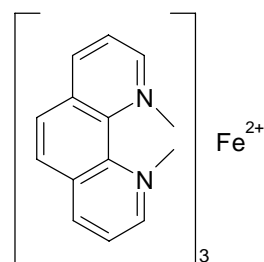


Esta ecuación nos indica el cambio químico global; es decir, nos dice cuáles son los reactivos y cuáles son los productos de la reacción. Además está balanceada, de tal forma que se cumple la ley de la conservación de la materia. Sin embargo esta ecuación no nos dice nada acerca de cómo se realiza, es decir, acerca de su mecanismo de reacción. Después de varios lustros de investigación se pudo dilucidar su mecanismo de reacción en todos sus detalles y se encontró un mecanismo de reacción mucho más complejo que cualquier otra reacción química no oscilante. En la reacción de BZ participan 22 especies químicas diferentes, en un total de 18 reacciones elementales diferentes! Además, para mantener oscilando a una reacción oscilante se requiere una distancia crítica al equilibrio químico, puesto que si estuviera en su cercanía, o en el equilibrio químico, *no* habría oscilaciones.

Sin duda, el mecanismo de la reacción de BZ es de una complejidad extrema. No obstante, ahora podemos entender los cambios de color que se observan al introducir a la 1,10-fenantrolina como indicador (y formar a la ferroína *in situ*), ya que de esta manera se ponen en evidencia a las reacciones de oxidación y reducción alternadas del cerio que se llevan a cabo en el medio reactivo.

### Reactivos utilizados en la reacción oscilante de Belousov-Zhabotinsky

- Bromato de potasio.
- Ácido malónico.
- Bromuro de potasio.



**Figura 1.** Estructura química de la "ferroína", que suele representarse:  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{2+}$ . Lo constituyen tres moléculas de ortofenantrolina combinadas con un ion de hierro.

- Nitrato de amonio cerio (IV).
- Ácido sulfúrico.
- Sulfato de hierro (II) heptahidratado.
- 1,10 fenantrolina.

Dichos reactivos se preparan para formar tres disoluciones:

#### Disolución A:

Disolver 19 g de  $\text{KBrO}_3$  en 500 mL de agua destilada.

#### Disolución B:

Disolver 16 g de  $\text{CH}_2(\text{CO}_2\text{H})_2$  y 3.5 g de  $\text{KBr}$  en 500 mL de agua destilada.

#### Disolución C:

Disolver 5.3 g de nitrato de amonio cerio (IV) ( $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ ) en 500 mL de disolución 2.7 M de ácido sulfúrico.

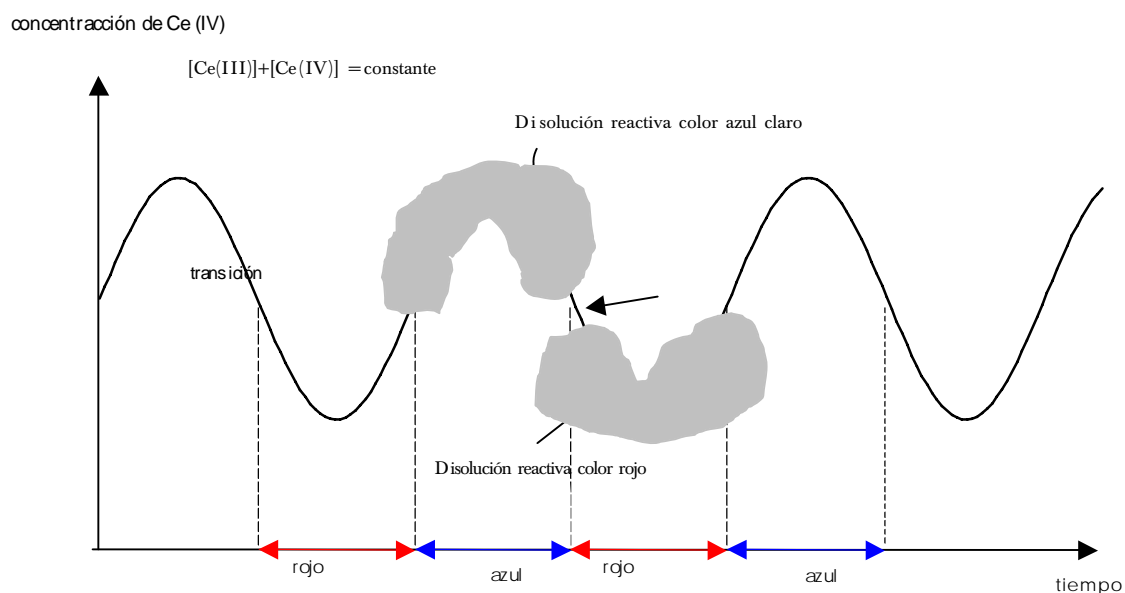
#### Disolución de la ferroína:

Disolver 0.23 g de sulfato de hierro (II) heptahidratado ( $\text{Fe}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en 100 mL de agua destilada; a la disolución resultante se le disuelven 0.46 g de 1,10-fenantrolina.

Se agregan al recipiente de reacción (i.e. a un vaso de precipitados de 0.5 L y con agitación constante) 70 mL de cada una de las soluciones (A, B y C) y 12 mL de la disolución de ferroína.

Con esta composición, la reacción podrá oscilar por un período de 40 minutos sin necesidad de agregar nada más.

Es importante señalar que cambios tanto en la concentraciones de estas soluciones o en los volúmenes agregados, pueden originar alteraciones en la intensidad de los colores y de los tiempos en los que ocurren los cambios de color.



**Figura 2.** Gráfica de la concentración del Ce(IV) en función del tiempo. Una concentración alta en Ce(IV) –que es un oxidante fuerte– induce la aparición de Fe oxidado, i.e. de Fe(III), que debe ser azul claro con la fenantrolina.

Hacemos mención de la forma en que se prepara la reacción de BZ no tanto para que los estudiantes la traten de reproducir en su escuela bajo la dirección del maestro, sino para satisfacer su curiosidad ante la pregunta ¿qué es lo que tiene? (i.e., ¿qué reactivos se usan?). Sabemos que la mayoría de los reactivos son de importación, son caros<sup>2</sup> y de manejo atento (es decir, son sustancias irritantes y tóxicas). En consecuencia, no recomendamos realizar este experimento en las escuelas de enseñanza media superior, salvo que el maestro esté empeñado en llevarla a cabo tomando en cuenta cuidadosamente de todos los requerimientos.

<sup>2</sup> Realizar este experimento resulta caro. A continuación enlistamos los precios actuales de los reactivos principales en las cantidades mínimas que se pueden adquirir. Los precios están dados en pesos mexicanos (1 1.30 pesos = 1 US dollar) Bromato de potasio (100 g): \$150.0; Bromuro de potasio (500 g): \$501.0; nitrato de amonio cerio (IV) (500 g): \$1,326.0; 1-10 fenantrolina (100 g): \$3,148.0; ácido malónico (5 g): 100.0. Al menos \$5,225.0 pesos se deben gastar para realizar esta reacción oscilante una o varias veces. Alternativamente, y si la cercanía lo permite, visitar la Sala de Química del museo Universum, en la Ciudad de México.

### Una verificación visual de cambios periódicos de concentración del Ce(III) y Ce(IV) en la reacción de BZ

El propósito de este artículo es mostrar solamente una de las varias especies químicas que se encuentran oscilando en concentración en la reacción de BZ, i.e. el ion cerio (Ce). Este ion se encuentra oscilando entre sus dos estados de oxidación posibles, es decir, transita periódicamente entre Ce(III) y Ce(IV). El problema químico es “ver” a estos iones del cerio. Afortunadamente este problema se puede resolver utilizando un indicador redox particular, la ferroína, como ya se explicó en una sección anterior. Recordemos que si el cerio está predominantemente oxidado actuará como agente oxidante y el hierro se oxidará. En consecuencia la especie química dominante será  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{3+}$  y la disolución mostrará un color azul pálido (véase la figura 6 de la tercera de forros). La situación se invierte cuando la especie predominante sea el cerio reducido; en este caso la especie química dominante será  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{2+}$ , que impartirá una coloración roja a la disolución (figura 3 de la tercera de forros). Entre estos cambios, hay un intervalo en donde se da el cambio de coloración; no predominan ni el Ce(III) ni el Ce(IV) (véase la figura 1 de la tercera de forros).

Este proceso de aumentar y disminuir alternativamente la concentración del Ce(III) y Ce(IV) se

repite periódicamente, dando como resultado que se repitan periódicamente los cambios de color (véase la figura 2). A la vez, esto le revelará al observador que en efecto, la concentración de esas especies químicas está oscilando en concentración!

Hay otros cambios de color debido a la influencia del color de otras especies químicas participantes, pero no abordaremos esta cuestión en este artículo.

### Conclusiones

Los cambios de concentración de la reacción oscilante de BZ los podemos visualizar gracias a la utilización de un indicador redox como la ferroína que mostrará cambios en el color. La repetición secuencial de los mismos colores es una manifestación del carácter periódico de este mecanismo de reacción, que mantiene una concentración oscilante del Ce(III) y el Ce(IV) (y de otras especies químicas).

Aunque un estudiante de nivel medio superior no podrían tener una comprensión cabal de la complejidad que implica una reacción oscilante, sí podríamos esperar que por medio de la visualización del fenómeno de oxidación-reducción oscilante –a través de cambios de color– podrían convencerse de que en efecto, un grupo de especies químicas –en particular el Ce(III) y el Ce(IV) [y el Fe(II) y Fe(III)]– están oscilando en concentración. Y más importante, se les puede decir que se está investigando para tratar de demostrar que este tipo de reacción química podría ser el sustento químico de los comportamientos *periódicos* que observamos en los seres vivos,

conocidos como relojes o ritmos biológicos. Algunos ejemplos de estos fenómenos son la división celular; el abrir y cerrar de los pétalos de algunas flores; el ciclo menstrual en la mujer; el latido del corazón; la temperatura corporal que oscila, y tantos otros ritmos observados en la biología (Ahlgren & Halberg, 1990; Gay, 1971).

De lo anterior se deduce claramente el interés que despertará esta reacción oscilante para los maestros de química y biología del nivel medio superior. Ello dará ocasión para utilizar conceptos químicos tales como indicadores y reacciones redox y mecanismos de reacción, que forman parte de los programas de estudio. ▀

### Bibliografía

- Ahlgren, A. & Halberg, F., *Cycles of Nature. An Introduction to Biological Rhythms*. National Science Teachers Association, Washington, USA, 1990
- Atkins, P.W., *Atoms, Electrons, and Change*, Scientific American Library, Nueva York, USA, 1991.
- Castells Guardiola, J., *Química General*, Alhambra, 1981 (p. 552).
- Gay G. L., *Biological Rhythms in Human & Animal Physiology*, Dover, Nueva York, USA, 1971.
- Shakhashiri, B. Z., *Chemical Demonstrations. A book for teachers of chemistry*, vol. 2, The University of Wisconsin Press, USA, 1985 (p. 232).
- Skoog, D. A. & West, D. M., *Fundamentos de Química Analítica*, (2ª ed.) Reverté S.A., España, 1992, (p. 398-399).

## Una reacción oscilante para alumnos del nivel medio superior



**Figura 1** Transición de un color a otro. Durante ese corto intervalo, las concentraciones de Ce(III) y Ce(IV) son semejantes.



**Figura 2.**

**Figura. 6** En la mezcla reactiva predomina el Ce(IV), lo cual hace que la concentración de  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{3+}$  sea elevada también y se observe un color azul pálido.



**Figura 3.** En la mezcla reactiva predomina el Ce(III), lo cual hace que la concentración de  $(\text{Ph})_3\text{Fe}^{2+}$  sea elevada también y se observe un color rojo.



**Figura 4.**

**Figura 5.**



**Figura 7.**



**Figura 8.**