

“Patrones en movimiento: La fascinante Reacción de Belousov-Zhabotinsky”

Juan Márquez Moreno, David Antonio Márquez Duplaga, Escarlata D. Blandón Cumbreiras

Resumen—La reacción de Belousov-Zhabotinsky (BZ) es un sistema químico oscilante que genera patrones autoorganizados, simulando fenómenos naturales. Descubierta por Belousov y estudiada por Zhabotinsky, desafía el equilibrio químico natural. Dentro de sus aplicaciones incluyen modelar sistemas complejos como ritmos biológicos, avanzar en computación química y desarrollar materiales inteligentes.

Palabras Claves— Reacción, Oscilaciones químicas, Autoorganización, Sistemas complejos, Oxidación, Reducción.

1. INTRODUCCIÓN

Una reacción química se suele conocer por ser un proceso continuo y que siempre sigue el mismo patrón, se mezclan los reactivos y se forman los productos. Sin embargo, como todo en la química, encontramos excepciones, siendo en este caso la reacción que descubrió el bioquímico ruso Boris Belousov en los años 50.

Esta reacción se diferenciaba de las demás debido a que no seguía un camino lineal, sino que tenía un comportamiento oscilante. Esta cambiaba de color continuamente y de una manera cíclica, dejando ver un patrón que cambiaba a lo largo de la reacción, pudiendo incluso ver patrones parecidos a los de los seres vivos.

Esta reacción no fue aceptada por la comunidad científica de la época, debido a que, en ese entonces, no se contemplaba la idea de que una reacción fuera oscilante sin llegar a un equilibrio. Este trabajo quedó en el olvido hasta que años después, Anatol Zhabotinsky retomó el trabajo de Belousov y pudo mostrar su certeza. La reacción, ahora llamada Belousov-Zhabotinsky, ha seguido siendo estudiada y se ha convertido hoy en día en un modelo fundamental sobre los sistemas complejos, autoorganización y patrones en la química.

La reacción Belousov-Zhabotinsky se ha convertido en un gran ejemplo de perseverancia científica y también nos muestra cómo se pueden unir la química, la física y la biología para producir fenómenos increíbles, abriéndonos las puertas hacia nuevos horizontes en la química.

2. ¿QUÉ ES LA REACCIÓN DE BELOUSOV-ZHABOTINSKY?

La reacción de Belousov-Zhabotinsky es una reacción química oscilante, es decir, no sigue el patrón típico de las reacciones en la que los reactivos se van consumiendo para formar productos de forma continua hasta que se agotan. Esta, en cambio, se alterna entre estados de oxidación y reducción de manera cíclica. Durante este proceso, el cambio en el estado de oxidación genera ondas visibles de color en

el sistema, por lo que crea una visión óptica donde parece que se mueven y cambian sin intervención externa.



Fig. 1. Vista cenital de la reacción BZ

2.1. Componentes

Para que se lleve a cabo esta reacción deben mezclarse:

- 1) Ácido fuerte (ácido sulfúrico) que proporciona el entorno ácido necesario
- 2) un bromato (bromato de potasio) que actúa como oxidante
- 3) un reductor orgánico (ácido malónico) que ayuda a mantener el ciclo
- 4) un catalizador metálico (ión ferroína o cerio) que es el responsable de los cambios de color característicos al pasar entre estados de oxidación.

2.2. El baile químico de los colores

Al mezclarse, los iones del catalizador alternan entre dos estados de oxidación en una serie de reacciones interconectadas. En cada oscilación, el catalizador cambia de color: al usar el ión ferroína se alternan el color rojo intenso (oxidado) y el azul (reducido). Así lo que se observa son secuencias de cambios de color que se repiten en ciclos, creándose así un patrón rítmico de colores y formas.

La duración de estos ciclos depende de la concentración y condiciones de la reacción, por lo que puede durar desde minutos hasta horas.

Mostrando así un comportamiento similar al de un organismo en movimiento, lo que aporta una fascinante

imprevisibilidad y complejidad a lo que normalmente es un proceso químico estable.

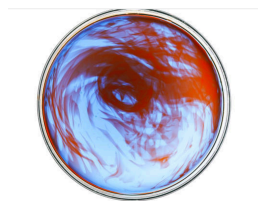
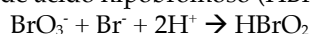


Fig. 2. Vista cenital de la reacción BZ

2.3. ¿Cómo se da la reacción?

La reacción describe un proceso oscilante que involucra varias etapas redox. Este proceso se puede simplificar en tres pasos principales.

A) Formación de ácido hipobromoso (HBrO₂)



B) Oxidación de Ferroína



C) Reducción de Ferroína



El proceso cíclico de oxidación y reducción se repite constantemente, resultando un patrón de color cambiante en la solución, observándose el cambio de color.

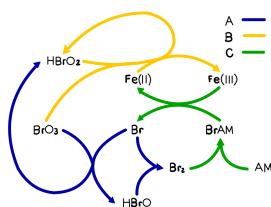


Fig. 3. Esquema de la reacción BZ

3. PATRONES EN ACCIÓN: ONDAS, ESPIRALES Y CAOS

La característica que más llama la atención de esta reacción son los patrones que se forman cuando esta se lleva cabo, producidos por la constante transformación de reactivos a productos y de productos a reactivos. Estos patrones geométricos se pueden apreciar cuando la reacción se lleva a cabo en un medio que permita la difusión de los reactivos, como por ejemplo una placa de Petri.

La reacción produce estos patrones debido a que los diferentes puntos de la reacción llegan a los cambios de estado en diferentes momentos por la difusión y propagación de los reactivos en el medio. Cuando se lleva a cabo la reacción, podemos observar que los cambios en la reacción no se llevan a cabo de manera lineal, sino en forma de ondas o espirales que giran en sentido contrario, que se chocan, se cruzan o incluso zonas donde parece que se pelean para ver quien gana el espacio. Más allá de lo visual, esta reacción la relacionamos con la biología, debido a que los

patrones formados se pueden comparar a patrones en los seres vivos como los impulsos eléctricos en el cerebro, los latidos del corazón o los ritmos circadianos, que son los ritmos que regulan los cambios físicos y mentales en el transcurso de un día.

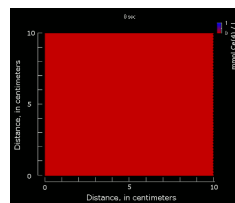


Fig. 4. Gráfica interactiva de la expansión de las ondas

3.1. ¿Por qué se forman los patrones?

Para poder explicar los patrones de la reacción BZ, nos apoyamos de la teoría de la dinámica no lineal y de la teoría de sistemas fuera del equilibrio. Tan pronto como que los reactivos interactúan entre sí, se van generando cambios tanto en la concentración como en el estado de oxidación como si fuesen ondas. Para visualizarlo, imaginemos que lanzamos una piedra al estanque para que rebote, de igual manera funciona lo mencionado previamente. Sin embargo, la piedra deja de rebotar tras un tiempo, distinto a las ondas de los reactivos que siguen extendiéndose, creando nuevos ciclos de reacción.

Esta propiedad de los sistemas no lineales provoca que, en ciertas condiciones, aparezcan formas ordenadas de manera espontánea. Debido a esto, a pesar de que cada partícula individual siga reacciones químicas específicas, el sistema en su conjunto muestra patrones emergentes y autoorganizados tal que son imposibles de predecir únicamente a partir de las reacciones individuales.

3.2. Relación con fenómenos naturales

En la naturaleza podemos apreciar estos patrones de oscilación y propagación. Pongamos el caso del cerebro, en concreto de la actividad cerebral. Esta involucra la propagación de impulsos eléctricos en una serie de ondas coordinadas entre millones de neuronas. Otro caso sería los impulsos cardíacos, estos se extienden de forma rítmica en un patrón que regula el ritmo del corazón. O también durante el sueño a través de los ritmos circadianos, que controlan los ciclos de sueño y vigilia, que también trabajan bajo un sistema de oscilaciones periódicas.

En estos sistemas vivos, el comportamiento oscilante observado en la reacción BZ se vuelve algo fundamental para el funcionamiento y organización del sistema completo.

4. MÁS ALLÁ DE LOS CAMBIOS DE COLOR. APLICACIONES

Aunque parezca solo un fenómeno curioso, esta reacción tiene prometedoras aplicaciones científicas y tecnológicas.

4.1. Biología y Neurociencia

La reacción BZ es un modelo fundamental para entender cómo los sistemas biológicos pueden generar patrones oscilatorios complejos. Esta reacción química ha sido utilizada para simular la organización de ritmos oscilatorios en redes neuronales, mostrando cómo las interacciones no lineales pueden dar lugar a dinámicas cíclicas y rítmicas. En particular, la propagación de señales a lo largo del cerebro y el sistema nervioso central se asemeja a cómo las ondas químicas en la reacción BZ se propagan, interactúan y generan patrones que cambian con el tiempo. Al igual que en la reacción BZ, pequeñas perturbaciones pueden desencadenar grandes oscilaciones que se transmiten a través del sistema, lo que ofrece una valiosa perspectiva experimental para entender la propagación de estímulos eléctricos y la generación de ritmos en sistemas biológicos, como las redes neuronales que controlan procesos como el movimiento, la percepción y la memoria.

4.2. Computación química

Actualmente, se está investigando la posibilidad de utilizar la reacción BZ para el desarrollo de "computadoras químicas", un concepto innovador que se diferencia de las computadoras electrónicas tradicionales, que utilizan electricidad para procesar la información. A diferencia de estas, las computadoras químicas emplearían la propagación de ondas de reacción en un medio químico para realizar los cálculos.

En este sistema, las ondas generadas por las reacciones químicas pueden representar bits de información, y su propagación, interacción y modificación a lo largo de un entorno químico podrían ser utilizadas para llevar a cabo operaciones de procesamiento de datos. Aunque esta área de investigación es todavía experimental, ha mostrado un enorme potencial, particularmente en el campo de la simulación de redes neuronales y en el estudio de modelos de procesamiento de información en sistemas complejos. Este enfoque químico podría ofrecer una alternativa a las computadoras tradicionales, abriendo nuevas posibilidades para crear sistemas computacionales basados en principios de la química dinámica, con aplicaciones futuras en áreas como la inteligencia artificial y el modelado de procesos biológicos.

4.3. Materiales Inteligentes y Nanoingeniería

Los materiales autoorganizados se han convertido en un área de gran interés dentro de la ingeniería moderna debido a su potencial para revolucionar diversos campos. Un ejemplo fascinante de este tipo de materiales es la reacción BZ, que tiene la capacidad de generar patrones de manera autónoma, sin necesidad de intervención externa. Este fenómeno podría inspirar el diseño de materiales que respondan de manera controlada a distintos estímulos, lo que abriría nuevas posibilidades en el desarrollo de tecnologías avanzadas. En este sentido, se han realizado investigaciones en la creación de superficies que se organizan en patrones específicos cuando se alteran las condiciones de su entorno, ya sea químico o físico. Este avance podría tener aplicaciones significativas en áreas como la medicina y la biotecnología, donde la capacidad de controlar la

respuesta de los materiales ante ciertos estímulos podría ofrecer soluciones innovadoras y eficaces.

4.4. Control de liberación de fármacos

La reacción BZ ha sido propuesta como una base prometedora para el desarrollo de sistemas de liberación controlada de fármacos. Los patrones autoorganizados que genera esta reacción podrían utilizarse para regular la liberación de medicamentos de manera temporal, espaciada o en intervalos específicos, lo cual resulta fundamental en tratamientos que requieren una dosificación precisa y constante a lo largo del tiempo. Esta capacidad de control dinámico de la liberación de fármacos es especialmente relevante en enfermedades crónicas o complejas, donde una administración continua o ajustada de medicamentos es crucial para mantener su eficacia terapéutica. Además, esta técnica podría minimizar los efectos secundarios asociados con una dosificación inadecuada, mejorando la calidad del tratamiento y la experiencia del paciente. En resumen, el uso de la reacción BZ en este campo podría representar un avance significativo en la medicina personalizada y en la optimización de los tratamientos farmacológicos.

5. CONCLUSIONES

La reacción de Belousov-Zhabotinsky nos recuerda que la naturaleza tiene una increíble capacidad para organizarse de maneras sorprendentes y que incluso los sistemas químicos simples pueden generar patrones complejos. Esta reacción no solo desafía las concepciones tradicionales de equilibrio químico, sino que también muestra cómo la autoorganización es un fenómeno fundamental en sistemas que parecen vivos.

Gracias a la reacción BZ, hoy entendemos mejor cómo surgen patrones en el cerebro, en el corazón, y en muchos otros sistemas naturales y artificiales. La fascinación que despierta su colorida danza de oscilaciones y patrones sigue inspirando a científicos e ingenieros a explorar las fronteras de la complejidad. Tal vez, en un futuro cercano, veamos aplicaciones que lleven esta reacción de los laboratorios a nuestras vidas cotidianas.

REFERENCIAS

- [1] https://www.quimica.es/enciclopedia/Reaccion_Belousov-Zhabotinsky
- [2] Zhabotinsky, A. M. (1964). *Periodic process of oxidation of malonic acid solution*. *Biophysics*, 9, 306-311.
- [3] Belousov, B. P. (1959). *Periodically acting reaction and its mechanism*. *Radiatsionnaya Meditsina*, 147, 145.
- [4] <http://www.scielo.org.bo/scielo.php>
- [5] Fritz Räu chle and Isabel Díaz Tang, "Reacciones Químicas Oscilantes", *Revista de Química*, vol. 7, 1993.
- [6] <http://www.experienciadocet.com/2011/01/bz-un-oscilador-espaciotemporal-quimico.html>
- [7] https://rua.ua.es/dspace/bitstream/Modelos_matematicos_para_reacciones_oscila_BENAVENTEGARCIA_ALEXANDRE_JORGE.pdf