

## REACCIONES QUÍMICAS OSCILANTES: SU HISTORIA

Jesús A. Agreda B.<sup>\*</sup>, Daniel A. Barragán R.

Recibido: Febrero 16/98 – Aprobado: Octubre 7/98

**Keywords:** Oscillating Chemical Reactions history.

### RESUMEN

Se presenta un recuento histórico de los hechos más destacados, relacionados con el estudio de reacciones químicas oscilantes. Se ilustran y discuten algunos de los conceptos más importantes en el campo de estas reacciones.

### ABSTRACT

A review of the most outstanding events in the history of the oscillating chemical reactions is made. The most important ideas in the field of oscillating reactions are discussed.

La historia de las Reacciones Químicas Oscilantes (RQO), como un campo de interés en la investigación química y con reconocimiento pleno de su importancia, se remonta aproximadamente a unos treinta años atrás; pero, hubo hechos anteriores y trascendentales, que hoy en día se reconocen como auténticas RQO.

La historia de estos primeros reportes, es el tema central de este escrito. Se destacarán algunos de los hechos cruciales en el desarrollo del bagaje en RQO, describiendo

lo más destacado de cada fenómeno observado o teoría desarrollada.

La primera noticia de una oscilación química, se cree fue realizada por Robert Boyle, hacia finales del siglo XVII. Boyle observó llamaradas intermitentes, producto de la ignición de fósforo en un frasco mal tapado(1). Hoy, quizás también en ese entonces, el fenómeno se explica por la interacción entre la cinética química y la difusión. La reacción del oxígeno y el fósforo es una reacción en cadena que produce la ignición de este último. Dicha ignición, consume todo el oxígeno que existe en el frasco, entonces, la reacción deja de ocurrir. Luego, comienza a entrar oxígeno al frasco, pero la reacción no se reactiva inmediatamente, ya que la concentración de oxígeno en el frasco debe alcanzar un valor crítico mínimo, para que se reinicie la reacción en cadena que produce la ignición, la cual nuevamente agotará el oxígeno y el ciclo se repetirá sucesivamente, observándose llamaradas a intervalos regulares de tiempo, en un proceso realmente oscilante. Los retardos en reiniciarse un proceso determinado, son una constante y requisito para la ocurrencia de RQO.

El siguiente proceso del que se tiene reporte, es el trabajo de A. Th. Fechner, que es por otra parte, el primer reporte

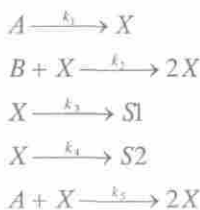
<sup>\*</sup> Laboratorio de Termodinámica y Calorimetría, Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia

escrito de una oscilación química. Fechner en 1828, describió una celda electroquímica en la que se produce una corriente oscilatoria, ocasionada por la disolución oscilante de un metal(2).

A comienzos de los años 1800, sir Humphry Davy, estudió las denominadas llamas frías, conocidas así, porque la temperatura en el reactor es del orden de 200 a 400°C, lo que es menor que la temperatura de una llama común(3). El ejemplo más estudiado de este tipo de reacción, es la oxidación de acetaldehído realizada entre 450-650°K y 40-200 mmHg. En este proceso, nuevamente se acoplan dos eventos, como en el caso de la ignición del fósforo, solamente que ahora, la interacción es entre la concentración del combustible y la temperatura del medio de reacción. La concentración del combustible, acetaldehído por ejemplo, puede fluctuar dependiendo de las condiciones de reacción. Por su parte, la temperatura ( $T^{\circ}$ ) afecta la velocidad de reacción, a través de la dependencia que las constantes de velocidad tienen respecto al valor de  $T^{\circ}$ ; esta dependencia es del tipo Arrhenius:

$$k_i = A e^{-E_0/RT} \quad \text{Ecuación 1}$$

Un modelo sencillo de este comportamiento, lo da el esquema de reacciones de Wang y Mou:



que da origen al sistema de ecuaciones diferenciales acopladas siguiente:

$$\frac{da}{dt} = -k_1 a - k_5 a x$$

## Ecuación 2

$$\frac{dx}{dt} = k_1 a + k_2 b x - k_3 x - k_4 x + k_5 a x$$

$$C \frac{dT}{dt} = q_1 k_1 a + q_2 k_2 b x - q_3 k_3 x - q_4 k_4 x + q_5 k_5 a x - \chi(T - T_a)$$

en donde,  $k_i$  son las constantes de velocidad afectadas por la temperatura según la ecuación 1, las letras minúsculas  $a$ ,  $x$ , representan concentraciones,  $q_i$  es la entalpía molar de reacción,  $C$  es la capacidad calorífica efectiva,  $\chi$  es el coeficiente de transferencia de calor y  $T_a$  es la temperatura a la cual se trabaja.

Para tener la ecuación explícita, cada valor de  $k_i$  se debería reemplazar por expresiones del tipo Arrhenius, ecuación 1. Es claro así, el acoplamiento entre la concentración y la temperatura, además de la clara no linealidad de las ecuaciones (ninguna es una línea recta); lo que a su vez es condición indispensable para la ocurrencia de RQO.

Continuando con nuestro recorrido por la historia, hacia 1830, Munck trabajó nuevamente con la ignición oscilante del fósforo y en 1886 Landolt describió una reacción que involucraba autocatálisis, ingrediente fundamental en las RQO. La reacción descrita por Landolt, es la del yodato con el bisulfito en solución acuosa y con almidón como indicador. La solución es inicialmente incolora y permanece así por un tiempo que se denomina *pe-*

riodo de inducción, durante el cual la concentración del ion yoduro aumenta lentamente. Luego, hay una aceleración en la velocidad de reacción, que conduce finalmente a un cambio súbito de color. A este tipo de reacciones, se les conoce como *reacciones reloj* y, eventualmente, si se les adicionan los reactivos adecuados, se pueden obtener de ellas reacciones químicas oscilantes.

En 1896, J. Liesegang descubrió los patrones de precipitación que llevan su nombre. El fenómeno se puede observar en un tubo de ensayo que contiene un gel en el cual se disuelve un electrolito. Sobre la parte superior del gel, se agrega otro electrolito que interacciona con el primero dando un precipitado que se distribuye en anillos espaciados simétricamente y no en una sola fase homogénea como se podría pensar en primera instancia(4). Nuevamente, la difusión entra en juego en este fenómeno.

En 1899, W. Ostwald encontró oscilaciones en la velocidad de la disolución de cromo en ácido. Hasta este momento, es importante mencionar que las oscilaciones electroquímicas y el fenómeno de Liesegang, que fueron por largo tiempo los únicos osciladores químicos bien conocidos y que a la vez involucraban gradientes de difusión, hicieron que se tomara como un dogma, el que tales gradientes fuesen necesarios para que ocurriesen las oscilaciones en sistemas químicos. Por esto, las oscilaciones en sistemas cerrados homogéneos fueron consideradas imposibles.

Precisamente, en contravía de la afirmación anterior, en 1910 A. Lotka(5) publicó un artículo sobre oscilaciones químicas

en sistemas homogéneos. El modelo de reacciones hipotéticas propuesto por Lotka es:

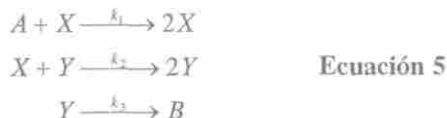


del que resulta el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, que se describe a continuación:

$$\begin{array}{l} \frac{da}{dt} = H - k_1 ax \\ \frac{dx}{dt} = k_1 ax - k_2 x \end{array} \quad \text{Ecuación 4}$$

en donde  $H$  es la aparición constante de  $A$ . De este sistema de ecuaciones se obtiene que la evolución en el tiempo, presenta un comportamiento oscilatorio amortiguado, similar al del clásico oscilador armónico con rozamiento de la Física. Las soluciones a estos sistemas de ecuaciones, presentan un término de amortiguamiento de la forma  $e^{-1/2t}$  y combinaciones de términos en senos y cosenos, que dan las oscilaciones.

En la actualidad se puede decir que el artículo de Lotka de 1910, fue la brecha que abrió el camino, pues la mayoría de modelos de osciladores químicos que se han publicado desde entonces, incluido el famoso modelo de Lotka de 1920:



son modificaciones al modelo de 1910. En el modelo de Lotka de 1910, debemos destacar la presencia de la autocatálisis, ya

antes mencionada. Así entonces, la auto-catalisis se comienza a mostrar como indispensable para la ocurrencia de RQO.

Un hecho que vale la pena destacar y que aparentemente no tiene mucha relación con las RQO, es la llamada inestabilidad de Benard, descubierta en 1900 y explicada teóricamente por Rayleigh en 1916(6). Resulta interesante, mencionar este hecho dentro del recuento histórico de RQO, por tener éste, en esencia, el mismo origen desde el punto de vista de organización de la materia; es decir, son millones de moléculas que dadas ciertas circunstancias deciden agruparse de forma ordenada en el tiempo y el espacio. El fenómeno ocurre al calentar una caja de petri que contiene una fina capa de aceite. Cuando se alcanza un gradiente de temperatura crítico entre la capa inferior, por donde se calienta, y la capa superior expuesta al aire y por tanto, obviamente más fría, se observa una maravillosa organización espacial de la materia en forma de hexágonos. El fenómeno es tan fácil de reproducir que éste aumenta su magnificencia y el asombro del experimentador.

La inestabilidad de Benard tiene una gran similitud con la organización espacial que se da en las RQO, como en el caso de las ondas viajeras observadas en la reacción de Belousov-Zhabotinsky, a la que nos referiremos más adelante. La diferencia entre los dos fenómenos radica en que la autoorganización en la inestabilidad de Benard, está asociada al flujo de calor; mientras que en RQO, el orden es causado por la combinación de la velocidad de reacción química y la difusión.

Volviendo a los hallazgos en RQO, en 1916 Morgan observó la evolución periódica

de monóxido de carbono en un medio de reacción que contenía peróxido de hidrógeno, ácido fórmico y ácido sulfúrico.

En 1921, W.C. Bray(7) estudió las reacciones:



que se pueden resumir como la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno:

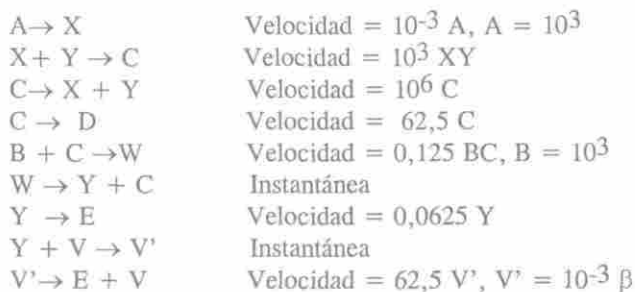


Bray encontró un intervalo de trabajo estrecho, en el cual la concentración de yodo oscilaba además de la evolución periódica de oxígeno. Posteriormente, en 1.931, Bray siguió estudiando este sistema de reacciones, al lado de H. A. Liebhafsky. Juntos realizaron un estudio amplio de la reacción, de tal forma que hoy se conoce como la reacción de Bray-Liebhafsky (BL). Por otra parte, y quizás el hecho más importante de esta reacción, es que fue el primer oscilador en sistema homogéneo conocido (no se necesitaba la difusión para que hubiese oscilaciones químicas). Liebhafsky dejó la investigación por un tiempo, durante el cual se dedicó al trabajo en la industria. Sin embargo, quizás motivado por los nuevos hallazgos en el tema, en 1967 regresó al estudio de la reacción, haciendo nuevos aportes al entendimiento de la misma y usando técnicas de análisis químico moderno, de las cuales en sus primeros años no disponía(8).

Retomando el curso cronológico, cabe destacar los trabajos de los ingenieros químicos sobre reactores no isotérmicos, en las décadas de los años 30 y 40. En este

tipo de reactores ocurre el ya antes mencionado acople entre la concentración de los intermediarios de reacción y la temperatura del reactor químico. Los ingenieros observaron oscilaciones en la temperatura de sus reactores, lo que es equivalente al comportamiento de las llamas frías, descrito anteriormente. Debido a estas características, hoy se conocen este tipo de oscilaciones como *termocinéticas*. Por otra parte, en la misma época, Frank-Kamenetskii postuló que estos comportamientos eran debidos a reacciones oscilantes, e intentó describir estos comportamientos con el modelo de Lotka de 1920.(6)

En 1952, A. Turing(9) publicó un gran trabajo titulado "*The chemical basis of morphogenesis*", en el cual propone que las reacciones químicas más la difusión, son las fuentes generadoras de la evolución del huevo fecundado. Para afirmar esto, Turing se vale de algunos de los elementos antes tratados aquí, aunque parece poco probable que él los hubiese conocido en el momento en que escribió su artículo. Turing, plantea un sistema de reacciones químicas acopladas, algunas de las cuales poseen autocatálisis y sobre las que influye la difusión, que es la encargada de transmitir la información de una célula a otra. El modelo propuesto por Turing es:



En su artículo, Turing desarrolla y analiza el anterior modelo, exponiendo ideas muy claras sobre la posible explicación de la morfogénesis a partir de reacciones químicas adecuadas y, de la difusión de ciertos intermediarios de reacción, que en este caso se denominan *morfogenes*. Este trabajo, en su época, no fue valorado lo suficiente y dado su carácter netamente teórico (algo similar a lo que le pudo pasar a la obra de Lotka), fue relegado a la categoría de posibilidad teórico-matemática, sin peso experimental, pues hasta esa fecha los hechos experimentales que mostraban oscilaciones químicas, no tenían mayor trascendencia a nivel mundial. Sin embargo, este escrito es inspirador de uno de los hechos que, desde el punto de vista termodinámico, más fuerza dio al estudio de RQO, el trabajo de la escuela de Bruselas, a cargo de I. Prigogine, R. Lefever y G. Nicolis en los años de 1967(10,11) y 1968(12). Más adelante describiremos el trabajo de este importante grupo.

Continuemos con el que fue el descubrimiento crucial en el desarrollo de las RQO, aunque en su momento tampoco se le dio mayor importancia. El descubrimiento, realizado por B. P. Belousov en 1950, consistió en la observación de oscilaciones químicas en una mezcla de reactivos. Belousov estudiaba el mecanismo

del ciclo de Krebs, para lo cual usaba ácido cítrico como sustrato orgánico (el cual realmente participa en el ciclo) y reemplazaba el agente oxidante por bromato en medio de ácido sulfúrico y el catalizador organometálico (proteína unida a un metal) por una sal de cerio IV. El científico ruso observó la decoloración de la solución amarilla (a causa del cerio IV) y la posterior reaparición del color amarillo, este cambio de color continuó por algunas horas(13).

Belousov intentó publicar un artículo relatando su descubrimiento, pero los editores de la revista a la cual envió su manuscrito, le contestaron que su supuesto descubrimiento sólo podía ser publicado si se acompañaba de una demostración de que la teoría existente estaba errada. Los editores de esa revista consideraron que no podía haber oscilaciones en sistemas de reacción química (especialmente en medios homogéneos como era el caso), algo que como ya se dijo, parecía ser un dogma en química. Además, esto estaba soportado en parte, por una mala interpretación de la segunda ley de la Termodinámica, según la cual la entropía de un sistema aislado sólo puede aumentar monótonicamente; entonces, la oscilación en la concentración de especies químicas, sería una clara violación a esta ley, ya que si cuando, por ejemplo, aumenta la concentración de una especie, aumenta la entropía del sistema, sería lógico pensar que en el sentido contrario (disminución de la concentración de esa misma especie), la entropía del sistema disminuiría, violando la segunda ley de la Termodinámica. En el anterior argumento existe una falacia, puesto que la entropía de un sistema aumenta monótonicamente sólo cuando el sistema de estudio está o aislado o

muy cerca del equilibrio termodinámico. Los sistemas que presentan oscilaciones químicas son sistemas abiertos con intercambios grandes de materia y energía con sus alrededores y muy alejados del equilibrio. Esto es la fuente de las oscilaciones químicas.

Belousov ante este revés, decidió seguir trabajando para aclarar el mecanismo de la reacción que había encontrado. Así, seis años después, envió un extenso trabajo a otra revista de química. Lamentablemente, nuevamente se encontró con el escepticismo de los editores. Se le recomendó abreviar su escrito al tamaño de una indigna carta al editor. Esto enfureció a Belousov, quien ya con 64 años, decidió no volver a publicar y retirarse. Sin embargo, su receta oscilante circulaba por las aulas de varias universidades de la antigua URSS, sin conocerse su origen. La receta se hizo tan popular que, tras una laboriosa búsqueda de su autor, se logró que éste publicara el oscuro resumen de 1958, que hoy se conoce como el primer reporte escrito de la reacción de Belousov.

Hacia 1961, A. M. Zhabotinsky comenzó un estudio sobre el mecanismo de la reacción de Belousov, el cual terminó, parcialmente (pues sigue publicando artículos sobre el tema), con una publicación en 1964. H. Degn, en Copenhague, conoció del trabajo de Zhabotinsky y publicó su propia versión del mecanismo, pero en Occidente, la reacción sólo llamó la atención cuando en 1968 Zhabotinsky y sus colaboradores, en compañía de Busse (de Alemania occidental), dieron a conocer sus trabajos en una conferencia internacional celebrada en Praga, sobre osciladores biológicos y bioquímicos(14). Debido al importante papel desarrollado por

Zhabotinsky en el estudio de la reacción de Belousov, hoy se conoce la reacción como el oscilador BZ.

Ahora, regresemos un poco en el tiempo y justificaremos el por qué se organizó un seminario sobre osciladores biológicos y bioquímicos. En el año de 1957, Duysens y Amesz encontraron oscilaciones en la concentración de NADH en el ciclo glicolítico (otro proceso bioquímico). Luego, Ghosh y Chance en 1964, reportaron oscilaciones amortiguadas de NADH en suspensiones de células de levaduras vivas. Chance y Hess en 1964 y Pye y Chance en 1966 hallaron oscilaciones sostenidas y amortiguadas en extractos de células. Hubo además otros estudios importantes hacia finales de los años sesenta(15). Respecto a este tipo de osciladores, vale la pena destacar lo que Nicolis y Portnow dicen, en su revisión bibliográfica sobre oscilaciones químicas, en 1973: "*Oscillations in biochemical systems are perhaps the most intriguing of all chemical oscillations. Indeed, as we have already mentioned, the present interest in chemical oscillations is due largely to the discovery of oscillating biochemical phenomena.*",

En el año de 1967, Prigogine y Nicolis publicaron su "*On symmetry breaking instabilities in dissipative systems*", en donde se dan las bases termodinámicas para la existencia de las oscilaciones químicas, demostrando que las oscilaciones sí son posibles y no contradicen ningún principio de la termodinámica (especialmente la segunda ley). Esto quizás era lo que le pedían a Belousov, los editores de la revista a la que envió su primer manuscrito. El artículo trata sobre la validez desde el punto de vista termodinámico, del modelo de

Turing y se hace énfasis en cómo se puede lograr el rompimiento de la homogeneidad espacial a partir de pequeñas perturbaciones a un sistema inestable, como es el modelo autocatalítico con difusión de Turing. La inestabilidad de éste y de casi todos los modelos de osciladores químicos, se origina precisamente en el componente autocatalítico o más generalmente, en la *retroalimentación*, que puede ser positiva (autocatálisis) o negativa.

En 1968, Prigogine y Lefever continúan con el trabajo anterior, sentando las bases termodinámicas que justifican las inestabilidades que rompen la homogeneidad (simetría), en sistemas que disipan materia y/o energía. Ellos presentan varios modelos de cinética química que manifiestan comportamiento oscilatorio tanto en el tiempo como en el espacio. Es aquí donde hace su aparición, el modelo que posteriormente Tyson llamará el Bruselador(16) y que tanta utilidad didáctica tiene para el entendimiento de las RQO.

Aunque se pueden citar otras varias publicaciones entre los años de 1968 y 1972, estas se dejarán de lado, para hablar del trabajo de mayor trascendencia en los últimos 25 años en el estudio de RQO. El trabajo en mención fue realizado por Field, Körös y Noyes en 1972(17), con el título: "*Oscillation in chemical systems II. Thorough analysis of the temporal oscillation in the bromate-cerium-malonic acid system*". En el artículo se hace un concienzudo estudio cinético y termodinámico de la reacción BZ. El análisis del mecanismo de reacción, fue el primero realizado para un oscilador químico(18). El mecanismo está tan bien soportado cinética y termodinámicamente que, rápidamente, éste fue adoptado como la base para trabajos poste-

riores. Aún en nuestros días, su importancia y aceptación es indiscutible, pese a las muchas modificaciones y ampliaciones que se le han hecho.

El mecanismo de la reacción BZ propuesto por Field-Körös-Noyes y abreviado FKN, se puede resumir en tres pasos:

- a. Una secuencia de reacciones lentas que forman entre otros productos el ácido bromoso, la especie autocatalítica y que además, consume el ion bromuro. La solución en este intervalo de tiempo es incolora, si se usa cerio como catalizador o roja si se usa ferroína, el complejo del hierro con 1,10-fenantrolina.
- b. Comienza cuando el ion bromuro se ha agotado y ocurre la reacción autocatalítica en ácido bromoso, por lo que éste es un paso rápido. La solución se torna amarilla si se usa cerio o azul si se usa ferroína. Entre estos dos estados se da la oscilación.
- c. Es un puente entre los dos primeros, que consiste en la oxidación del ácido malónico y del ácido bromomalónico con formación de iones bromuro, los cuales después de superar una cierta concentración crítica, dan comienzo nuevamente al primer paso.

Lo anterior se resume en la figura 1.

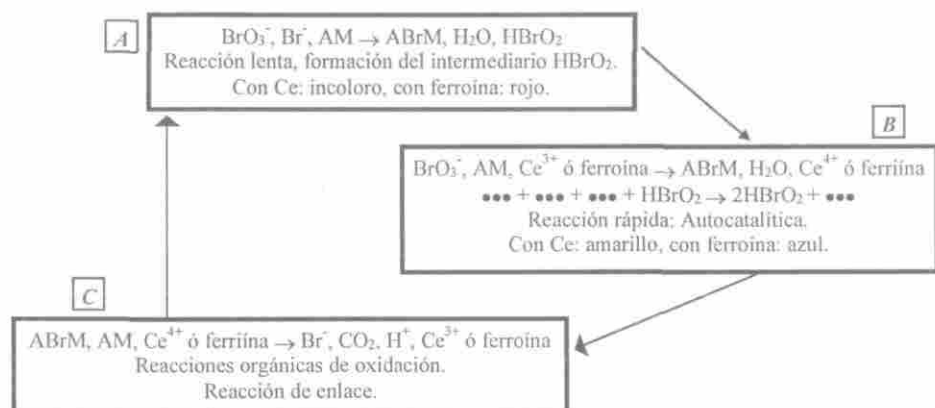
El mecanismo FKN, generó una enorme actividad de investigación en el campo de las RQO. En 1974, Field y Noyes(19), reducen su complejo mecanismo de 18 reacciones elementales y 20 especies químicas, a un modelo matemático de 5 reacciones y 3 especies que oscilan en concentración. Este modelo, hoy conocido como

el Oregonador, en honor de la Universidad en donde se hicieron los estudios (igual que en el caso del Bruselador), describe muy bien el comportamiento de la reacción BZ, aún en la formación de ondas espaciales viajeras. En la actualidad, este modelo pese a sus múltiples modificaciones y mejoras, sigue teniendo vigencia por su excelente descripción del comportamiento oscilante de la reacción BZ y aunque es más complejo que el modelo de Lotka o el Bruselador, todavía se deja trabajar con alguna facilidad.

Field y Noyes, siguieron publicando juntos sobre temas relacionados, durante unos cuantos años más. Körös, también publicó otros estudios, desde su sede en Hungría. La historia reciente, sigue mostrando a Richard J. Field, como uno de los más importantes investigadores en el tema; de esto dan fe sus últimas publicaciones con importantes aportes al conocimiento de RQO, tema al cual él contribuyó enormemente, dándole el prestigio y reconocimiento mundial que hoy tiene.

Para finalizar este recuento histórico, hablaremos sobre uno de los instrumentos que más ha ayudado al estudio de las RQO, después de la "aparición" de este singular fenómeno a comienzos de la década de los setenta. Nos referimos, al tanque de reacción con flujo continuo y agitación, CSTR de sus iniciales en inglés *Continuous flow Stirred Tank Reactor*. El CSTR, es un reactor químico en el que se alimentan constantemente los reactivos de la reacción que se estudia y permite la salida continua de la mezcla de reacción, la cual tiene exactamente la misma concentración en cada especie involucrada en la reacción, que la concentración de las mismas al interior del reactor, en virtud





**Figura 1.** Esquema del mecanismo FKN. AM representa el ácido malónico y ABrM el ácido bromomalónico.

de su carácter de bien agitado. El CSTR es así, un sistema abierto, por su intercambio permanente de materia con los alrededores.

El CSTR como tal, no era desconocido en la década de los setenta; especialmente para los ingenieros químicos, quienes manejan este tipo de reactor de manera familiar, pero en el mundo de la química, su uso era escaso. Tres grupos de investigación comparten el honor de haber introducido el CSTR, al mundo de las RQO: los químicos de la escuela de Bordeaux en el año de 1976 y los ingenieros químicos Graziani, Hudson y Schmitz, en 1976, por un lado y Marek y Stuchl por otro, en 1975(20). La importancia del CSTR en el estudio de RQO, radica en que con él se pueden manejar los sistemas químicos, como sistemas abiertos, es decir, con una entrada y salida de materia constante, elemento esencial para la aparición de oscilaciones químicas.

A nivel nacional, el grupo de Termodinámica y Calorimetría, al que pertenecen los autores, ha realizado estudios calorimétricos de la reacción de Belousov-Zhabotinsky (21, 22), los cuales son escasos a nivel mundial. Con esto, se espera aportar al mejor entendimiento de estas complejas reacciones.

## AGRADECIMIENTOS

Uno de los autores, JAAB, agradece a Colciencias por el financiamiento parcial del presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Scott, S.K. *Oscillations, waves and chaos in chemical kinetics*. Oxford University Press, Oxford, 1994.
2. Degn, H. *J. Chem. Educ.* 1972, 49, 302.

3. Gray, P., Scott, S.K. *Chemical oscillations and instabilities*. Oxford University Press. Oxford. 1990.
4. Sharbaugh III, A.M., Sharbaugh Jr., A.H. *J. Chem. Educ.* 1989, 66, 589.
5. Lotka, A. *J. Phys. Chem.* 1910, 14, 271.
6. Babloyantz, A. *Molecules, dynamics, and life*. John Wiley & Sons. New York. 1986.
7. Bray, W. C. *J. Am. Chem. Soc.* 1921, 43, 1262.
8. Furrow, S. D. Chemical oscillators based on iodate ion and hydrogen peroxide. En *Oscillations and traveling waves in chemical systems*. (ed. R. Field y M. Burger). John Wiley & Sons. 1985.
9. Turing, A. M. *Phil. Trans. Roy. Soc. London.*, 1952, B237, 37.
10. Prigogine, I., Nicolis, G. *J. Chem. Phys.* 1967, 46, 3542.
11. Lefever, R., Nicolis, G., Prigogine, I. *J. Chem. Phys.* 1967, 47, 1047.
12. Prigogine, I., Lefever, R. *J. Chem. Phys.* 1968, 48, 1695.
13. Winfree, A.T. *J. Chem. Educ.* 1984, 61, 661.
14. Tyson, J. J. *The Belousov-Zhabotinsky reaction*. Springer-Verlag. Berlin. 1976.
15. Nicolis, G., Portnow, J. *Chem. Rev.* 1973, 73, 365.
16. Tyson, J. J. *J. Chem. Phys.* 1973, 58, 3919.
17. Field, R., Körös, E., Noyes, R. *J. Am. Chem. Soc.* 1972, 94, 8649.
18. Field, R. *Current Contents.* 1984, 24, 16.
19. Field, R., Noyes, R. *J. Chem. Phys.* 1974, 60, 1877.
20. Epstein, I. *J. Phys. Chem.* 1984, 88, 187.
21. Alba, R. *Estudio calorimétrico de la reacción de Belousov-Zhabotinsky. Tesis de grado. Química.* Universidad Nacional de Colombia. 1995.
22. Barragán, R. *Estudio-teórico experimental en sistema abierto de una reacción oscilante tipo Belousov-Zhabotinsky: Modelamiento por procesos estocásticos y monitoreo en un sistema CSTR.* Tesis de grado. Química. Universidad Nacional de Colombia. 1995.