

## GEOMETRIA FRACTAL E A REAÇÃO DE BELOUSOV-ZHABOTINSKY NA FORMAÇÃO DE PROFESSORES

### FRactal Geometry and the Belousov-Zhabotinsky Reaction in Teacher Education

Tânia Baier<sup>1</sup>, baier@furb.br  
Eduardo Zimdars<sup>2</sup>,  
eduardo.zimdars@ifc.edu.br  
Samuel de Macêdo Rocha<sup>3</sup>,  
samuel.rocha@ifmt.edu.br

**Resumo:** O objetivo deste artigo é apresentar uma proposta pedagógica que articula os componentes curriculares Matemática e Química, no Ensino Médio, trazendo para a sala de aula temas científicos atuais. Este texto traz o relato de uma vivência pedagógica, desenvolvida com estudantes de um curso Licenciatura em Química de um Instituto Federal Catarinense, relacionada com a reação Belousov-Zhabotinsky, também conhecida como reação BZ. A prática realizada pelos estudantes da licenciatura, em laboratório de Química, foi gravada em vídeo e pode ser apreciada por estudantes de Ensino Médio caso a escola não tenha laboratório em condições para realizar essa reação. Na introdução deste artigo estão apresentados aspectos históricos da descoberta da reação BZ, e, em seguida, está evidenciada a geometria fractal subjacente à reação BZ e a ligação com o tema progressões geométricas. Também são descritos detalhadamente os produtos químicos necessários e o processo. Essa reação é um exemplo da ocorrência do caos que pode ser abordado com o objetivo de divulgar descobertas atuais para contribuir na educação científica dos estudantes. A realização da reação BZ favorece o entendimento de fenômenos dinâmicos em sistemas fora do equilíbrio, pois as características da reação BZ revelam que a matéria afastada do equilíbrio apresenta novas propriedades. Desse modo, o artigo contribui para a formação docente

promovendo ações pedagógicas que articulam temas curriculares de Matemática e de Química no Ensino Médio.

**Palavras-chave:** Formação de professores. Geometria fractal. Progressão geométrica. Reação BZ.

**Abstract:** The objective of this article is to present a pedagogical proposal that articulates the curricular components of Mathematics and Chemistry in High School, bringing current scientific themes into the classroom. This text recounts a pedagogical experience developed with students of a Chemistry Licentiate course at a Federal Institute of Santa Catarina, related to the Belousov-Zhabotinsky reaction, also known as the BZ reaction. The practice carried out by the undergraduate students in a Chemistry laboratory was recorded on video and can be viewed by High School students if their school does not have a laboratory suitable for carrying out this reaction. The introduction to this article presents historical aspects of the discovery of the BZ reaction, followed by a highlighting of the fractal geometry underlying the BZ reaction and its connection to the topic of geometric progressions. The necessary chemical products and the process are also described in detail. This reaction is an example of the occurrence of chaos that can be addressed with the aim of disseminating current discoveries to contribute to the scientific education of students. Performing the BZ reaction facilitates the understanding of dynamic phenomena in systems out of equilibrium, since the characteristics of the BZ reaction reveal that matter away from equilibrium exhibits new properties. Therefore, this article contributes to teacher training by promoting pedagogical actions that connect curricular themes in Mathematics and Chemistry in secondary education.

**Keywords:** Teacher education. Fractal geometry. Geometric progression. BZ Reaction.

<sup>1</sup> Doutora em Educação Matemática (UNESP Rio Claro SP); professora no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais e Matemática – Universidade Regional de Blumenau (FURB).

<sup>2</sup> Doutor em Educação em Ciências e em Matemática, (UFPR); professor do Instituto Federal Catarinense campus Brusque.

<sup>3</sup> Doutor em Química Inorgânica (UFSC); professor do Instituto Federal do Mato Grosso campus Confresa.

## 1 INTRODUÇÃO

Este artigo inicia com a apresentação dos temas abordados – reação BZ e geometria fractal – seguida de uma breve história da descoberta da reação BZ e informações sobre o desenvolvimento da geometria fractal.

Estes textos visam fornecer subsídios para professores de Matemática e de Química que almejam abordar esses temas em suas aulas evidenciando as ligações entre eles.

O artigo está elaborado de modo a contribuir para a educação científica de professores de Matemática e de Química visando ações pedagógicas que articulem esses dos componentes curriculares do Ensino Médio.

### 2.1 Temas abordados no artigo

Este artigo evidencia a relação entre a reação de Belousov-Zhabotinsky (reação BZ) com os temas progressão geométrica e geometria fractal.

Para possibilitar a replicação da reação BZ em laboratório de Química, estão detalhados o processo e os reagentes químicos. A realização da reação foi gravada em vídeo visando constituir material de apoio para uso em escolas de Ensino Médio sem condições de realizá-la.

Prigogine (1996, p. 70) considera que “hoje, muitas outras reações oscilantes são conhecidas, mas a reação de Belousov-

Zhabotinski continua tendo uma importância histórica. Ela foi a prova de que a matéria longe do equilíbrio adquire realmente novas propriedades”.

Em seguida, estão apresentados aspectos da história da descoberta dessa reação, relatados por Kiprijanov (2016), Prigogine (1996, 2009) e Capra (2002).

### 2.2 Geometria fractal

A palavra *fractal* foi criada por Benoit Mandelbrot para descrever as formas irregulares dos objetos geométricos relacionadas com os fenômenos da natureza. Ele escolheu o termo *fractal* a partir do adjetivo latino *fractus*, que significa *irregular* ou *quebrado*.

Nos dizeres de Mandelbrot (1977, p.4, tradução nossa): “O verbo latino correspondente *frangere* significa *quebrar*: criar fragmentos irregulares. [...] *Fractus* pode também significar *irregular*, estando ambos os significados preservados em *fragmento*”.

Objetos *fractais* são construídos por meio de processos iterativos, sendo acrescentadas ou retiradas muitas partes, indefinidamente. Iteração é o processo matemático utilizado na criação dos objetos *fractais*, podendo ser iteradas construções geométricas ou expressões algébricas.

Os objetos *fractais* apresentam uma propriedade conhecida como *autossimilaridade*: em todas as escalas, cada uma das suas partes

possui uma aparência semelhante com a forma inicial.

### 2.3 A reação BZ

A descoberta dessa reação ocorreu em 1950, quando o cientista soviético Boris Belousov (1893-1970), durante seus experimentos, observou que uma solução química apresentava mudanças periódicas de cor por um intervalo de tempo significativo. Apesar da importância da descoberta, Belousov enfrentou dificuldades para divulgar seus resultados. Em 1951, submeteu um artigo a um periódico científico, mas este foi rejeitado sob a justificativa de que o fenômeno contrariava a Segunda Lei da Termodinâmica. Apenas em 1958 um resumo reduzido de seu trabalho foi publicado, em uma coletânea de circulação limitada, o que contribuiu para que a descoberta permanecesse pouco conhecida na comunidade científica naquele momento. Na década de 1960, o pesquisador Anatoly Zhabotinsky retomou o estudo dessa reação, investigando seus mecanismos e contribuindo significativamente para sua compreensão e divulgação no meio científico. Por essa razão, a reação passou a ser denominada reação de Belousov-Zhabotinsky, em homenagem a ambos os cientistas (Kiprijanov, 2016).

Vencedor do prêmio Nobel de Química edição 1977, Ilya Prigogine (2009, p.4) esclarece que, na época de Belousov, as

pesquisas em termodinâmica estavam focadas na termodinâmica do equilíbrio “para a qual os fenômenos irreversíveis se estabilizam uma vez atingido o equilíbrio. Foi somente no transcorrer do século XX que se começou a estudar seriamente a termodinâmica do não-equilíbrio”. Naquela época, a descoberta de Belousov foi desacreditada porque contrariava a visão da Química dominante fundada no entendimento de que as reações químicas homogêneas não poderiam oscilar.

Atualmente, o comportamento da reação BZ é explicado pelas leis da termodinâmica do não equilíbrio, desenvolvidas por Ilya Prigogine, Grégoire Nicolis, Paul Glansdorff e outros pesquisadores, ao longo das décadas de 1950 e 1960. Somente em meados da década de 1970 foi alcançada uma compreensão teórica mais completa das propriedades termodinâmicas e cinéticas envolvidas nessa reação (Kiprijanov, 2016).

Prigogine desenvolveu uma nova termodinâmica não linear, em sistemas abertos afastados do equilíbrio, para descrever fenômenos onde, em certos pontos críticos, ocorre a emergência de padrões de auto-organização. Estruturas dissipativas são de uma natureza diferente, como explica Capra (2002, p. 31): “Prigogine cunhou o termo estruturas dissipativas para sublinhar a íntima interação que existe entre a estrutura, de um lado, e o fluxo e a mudança (ou dissipação), de

outro”. Na sua teoria, as estruturas dissipativas se mantêm em um estado estável afastado do equilíbrio, mas também podem sofrer novas instabilidades e se transformar em novas estruturas mais complexas. Se, na termodinâmica clássica, a dissipação de energia era entendida como desperdício, a “concepção de Prigogine de uma estrutura dissipativa introduziu uma mudança radical nessa concepção ao mostrar que, em sistemas abertos, a dissipação torna-se uma fonte de ordem” (Capra, 1998, p. 82).

A abordagem do tema reação BZ no ensino de Química e de Matemática possibilita trazer para a sala de aula algumas ideias fundamentais da ciência contemporânea. Na próxima seção estão descritos procedimentos e reagentes para a realização da reação BZ e apresentada a estrutura fractal subjacente.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A reação BZ é um sistema químico oscilante que exhibe padrões periódicos de cor devido a reações redox autocatalíticas. Quando realizada em uma placa de Petri, segue as seguintes etapas:

### Etapa1- Preparação das Soluções

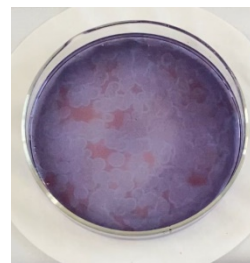
O bromato de potássio (9,5g) é dissolvido em 250 mL de água destilada. O ácido malônico (8g) e o brometo de potássio (1,75g) são dissolvidos em 250 mL de água destilada. O nitrato de amônio cério IV (2,65g) e o ácido sulfúrico (2,7 mol/L) são dissolvidos em 250

mL de água destilada. A ferroína, utilizada como indicador de cor, é preparada dissolvendo 0,165g de sulfato de ferro heptaidratado e 0,23g de fenantrolina em 50mL de água destilada.

### Etapa 2 - Montagem da Reação

Cada solução é preparada separadamente em um copo de Becker e misturada com o auxílio de um agitador magnético, garantindo a homogeneização completa. As soluções são então combinadas em uma placa de Petri. A ferroína é adicionada para permitir a visualização das oscilações de cor. Após aproximadamente 15 minutos, os padrões oscilantes mostrados na Figura 1 começam a se formar na solução.

**Figura 1** – Padrões na reação BZ



Fonte: Autor (2024).

Professores do Ensino Médio podem encontrar dificuldade para replicar a reação BZ, por exemplo, pela ausência de equipamentos e reagentes, mas principalmente pelo tempo que leva e por ser sensível aos mínimos movimentos na bancada do laboratório.

Nesse contexto, está disponível QRCode apresentando a gravação do

experimento realizado com estudantes de Licenciatura em Química.

**Figura 2** – QRCode da reação BZ.



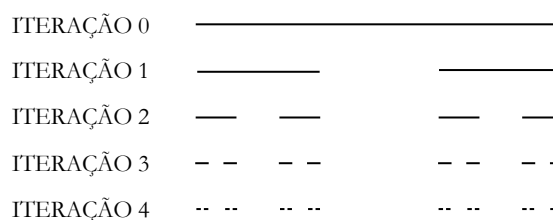
Fonte: Autor (2026).

Fiedler-Ferrara e Prado (1994, p. 206) comentam: “Interessantes e surpreendentes efeitos não-lineares são verificados quando os reagentes da reação BZ são postos em contato”. Durante o desenvolvimento da reação BZ, emergem cores que se alternam e bilhões de moléculas, espontaneamente, a partir de um determinado momento crítico, atuam como um todo, organizando-se em um alto grau de ordem: “Aparecem estruturas espaciais da forma de anéis, espirais ou de ondas circulares concêntricas (ondas químicas); observam-se também oscilações temporais com padrões mais ou menos complexos e, em determinadas condições, padrões caóticos” (Fiedler-Ferrara; Prado, 1994, p. 207).

Ligações entre reação BZ e geometria fractal estão explicitadas em Baier (2005). A reação BZ está relacionada com um fractal conhecido como *escada do diabo*, assim denominado porque existe um número infinito de degraus entre cada dois degraus. “Escadas do diabo são encontradas numa grande

variedade de sistemas como: reações químicas de Belousov-Zabotinsky” (Fiedler-Ferrara; Prado, 1994, p. 169). Elas estão relacionadas com o fractal *Poeira de Cantor* cuja construção está esquematizada na Figura 3, iniciando com um segmento de reta que é dividido em três partes de mesma medida, sendo retirada a terça parte central. Repetindo esse processo indefinidamente, a supressão repetida das terças partes intermediárias tem como resultado um objeto geométrico que pode ser brevemente descrito como sendo um segmento de reta esburacado, ou, como pontos alinhados.

**Figura 3** – Fractal *Poeira de Cantor*.

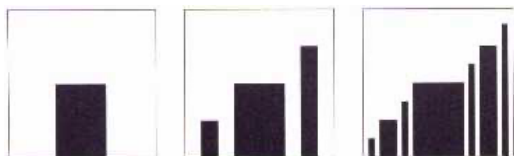


Fonte: Baier (2005).

Na Figura 4 estão apresentadas as primeiras iterações do fractal *escada do diabo* que inicia com a divisão de um segmento de reta em três partes de mesma medida, sendo construída uma coluna sobre a parte central. Continuando esse processo iterativo, infinitos degraus vão surgindo no formato de uma escada. Fiedler-Ferrara e Prado (1994, p. 168) esclarecem que “a estrutura da escada do diabo é *auto-similar*, isto é, ao ampliar-se cada patamar vê-se uma estrutura similar à anterior. Pode-se, portanto, compreender a designação *escada do*

*diabo*: existe um número infinito de degraus entre cada dois degraus”.

**Figura 4** – Iterações iniciais da *escada do diabo*.



Fonte: Peitgen; Jürgens; Saupe (1991, p. 245).

Inicialmente tendo como base a terça parte da medida do quadrado e sua metade como altura, a partir da primeira forma retangular, tem-se a progressão geométrica apresentada na Figura 5.

**Figura 5** – Progressão geométrica.

$$A = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} + \frac{1}{9} \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \right) + \frac{1}{27} \left( \frac{1}{8} + \frac{3}{8} + \frac{5}{8} + \frac{7}{8} \right) + \dots$$

or,

$$A = \frac{1}{6} + \frac{1}{9} \cdot \left( 1 + \frac{2}{3} + \frac{4}{9} + \dots + \frac{2^k}{3^k} + \dots \right)$$

The sum of the geometric series in the bracket is 3. Thus, the result is

$$A = \frac{1}{6} + \frac{3}{9} = \frac{1}{2}$$

Fonte: Peitgen; Jürgens; Saupe (1991, p. 247).

A soma dos termos de uma progressão geométrica infinita mostra que, no limite, a sucessão de degraus forma um fractal do tipo fronteira que divide ao meio a área da forma quadrada. Trata-se de conceitos elementares, elencados na BNCC – Base Nacional Comum Curricular (Brasil, 2018) possíveis de serem abordados no Ensino Médio.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fiedler-Ferrara e Prado (1994, p. 206) comentam: “Interessantes e surpreendentes efeitos não-lineares são verificados quando os

reagentes da reação BZ são postos em contacto”. Durante o desenvolvimento da reação BZ, emergem cores que se alternam e bilhões de moléculas, espontaneamente, a partir de um determinado momento crítico, atuam como um todo, organizando-se em um alto grau de ordem: “aparecem estruturas espaciais da forma de anéis, espirais ou de ondas circulares concêntricas (ondas químicas); observam-se também oscilações temporais com padrões mais ou menos complexos e, em determinadas condições, padrões caóticos” (Fiedler-Ferrara; Prado, 1994, p. 206-207).

Assim sendo, a abordagem da reação BZ ligada com a estrutura fractal correspondente, possibilita a realização de aulas de Química e de Matemática articuladas.

Com o presente relato buscou-se instaurar um movimento formativo que não se limitasse à transmissão de conteúdos ou à reprodução de procedimentos experimentais, mas que favorecesse a emergência de um olhar investigativo sensível à complexidade dos fenômenos químicos não lineares em articulação com a Matemática. Tal movimento implicou deslocar o foco da ciência como um conjunto de leis universais, estáveis e previsíveis, para compreendê-la como um campo em constante constituição, atravessado por incertezas, instabilidades.

O eixo estruturador dessa experiência foi o estudo teórico e a realização experimental

da reação BZ, reconhecida como um dos exemplos mais emblemáticos de sistemas químicos oscilantes.

A escolha desse experimento se deu por sua potência visual, epistemológica e formativa, ao permitir a problematização de noções clássicas da química, como equilíbrio, linearidade e causalidade simples. A reação BZ, ao apresentar padrões temporais e espaciais complexos, como oscilações de cor e formação de ondas, instaura um campo de experiência no qual a matéria se mostra em processo, evidenciando comportamentos que desafiam interpretações reducionistas.

Ao se engajarem na observação atenta dos fenômenos emergentes, tais como as ondas químicas e os padrões de auto-organização, os estudantes podem ser progressivamente confrontados com a limitação das explicações baseadas em relações lineares de causa e efeito. Nesse contexto, conceitos como não linearidade, irreversibilidade e estruturas dissipativas deixaram de ser meras abstrações teóricas para se constituírem como compreensões vividas.

Para os futuros docentes, estudantes da Licenciatura em Química, a realização da reação BZ no laboratório de Química, representou uma inflexão no modo de compreender a própria natureza da ciência e, conseqüentemente, o seu ensino e pesquisa. Ao vivenciarem a Química atual como um campo de relações complexas e emergentes, os

licenciandos foram convidados a repensar práticas pedagógicas e de pesquisa que, muitas vezes, reduzem-se a procedimentos mecanizados e previsíveis. Emergiram, assim, possibilidades de ensino e de pesquisa mais sensíveis à problematização, à investigação e à abertura ao inesperado.

Assim, a experiência contribuiu para o desenvolvimento de compreensões acerca da pesquisa em Educação em Ciências. Ao invés de buscar “respostas finais” ou generalizações apressadas, os estudantes foram instigados a descrever, interpretar e refletir sobre o vivido, reconhecendo a complexidade dos processos formativos e a singularidade das experiências. Dessa forma, tem-se a possibilidade de compreender a pesquisa como um modo de se relacionar com o mundo, marcado pela atenção e pelo rigor descritivo.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reação BZ é um fenômeno químico relevante por demonstrar que certas reações podem apresentar comportamento oscilatório, isto é, variações periódicas ao longo do tempo, como mudanças de cor sucessivas.

Neste artigo estão apresentadas as ligações da reação BZ com geometria fractal, contendo textos que podem contribuir para a abordagem de uma reação química em aulas de Matemática que contemplam tópicos de ciência contemporânea.

A pesquisa pode evoluir na direção de evidenciar as aplicações da reação BZ atualmente. Visando mostrar caminhos, seguem alguns exemplos.

Sharma *et al.* (2024, p. 9, tradução nossa) descrevem um dispositivo construído a partir de uma matriz computacional híbrida que opera com base na reação BZ, evidenciando que a “química está assumindo um papel ativo na computação”. Além disso, pesquisas recentes, como as conduzidas por Yamada, Ito e Maeda (2022), destacam a relação entre a reação BZ e os relógios biológicos, revelando sua importância para o estudo dos ritmos circadianos e mostrando as ligações entre pesquisas das áreas da Química e da Biologia.

Espera-se que o presente artigo promova ações pedagógicas articulando diferentes componentes curriculares e promovendo educação científica a partir de temas atuais.

## REFERÊNCIAS

BAIER, T. **O nexa “geometria fractal – produção da ciência contemporânea” tomado como núcleo do currículo de matemática do ensino básico.** 2005. Tese (Doutorado em Educação Matemática) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

BRASIL. **Base Nacional Comum Curricular.** 2018.

CAPRA, F. **A Teia da Vida:** Uma Nova Compreensão Científica dos Sistemas Vivos. 3. ed. São Paulo: Cultrix, 1998.

CAPRA, F. **As Conexões Ocultas:** Ciência para uma Vida Sustentável. São Paulo: Cultrix, 2002.

FIEDLER-FERRARA, N.; PRADO, C. P. **Caos, uma Introdução.** São Paulo: Edgard Blücher, 1994.

MANDELBROT, Benoit B. *The Fractal Geometry of Nature.* New York: W. H. Freeman and Company, 1977.

PEITGEN, Heinz-Otto; JÜRGENS, Hartmut; SAUPE, Dietmar. *Fractals for the Classroom – Part One: Introduction to Fractals and Chaos.* New York: Springer-Verlag, 1991.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas:** tempo, caos e as leis da natureza. 2. ed. São Paulo: Ed. da UNESP, 1996.

PRIGOGINE, I. Criatividade da natureza, criatividade humana. **Ponto-e-vírgula**, PUC, São Paulo 6, p. 1-6, 2009. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/article>. Acesso em: 18 abr. 2026.

SHARMA, A.; NG, M.T-K.; GUTIERREZ, J. M. P.; JIANG, Y.; CRONIN, L. A programmable hybrid digital chemical information processor based on the Belousov-Zhabotinsky reaction. **Nat Commun**, 15, p. 1-11, 2024.

YAMADA, Y.; ITO, H.; MAEDA, S. Artificial temperature-compensated biological clock using temperature-sensitive Belousov–Zhabotinsky. **Nature**, v. 12, p. 1-8, 2022. <https://www.researchgate.net/publication/301251902>

KIPRIJANOV, K. S. Chaos and beauty in a beaker: the early history of the Belousov–Zhabotinsky reaction. **Annalen der Physik**, v. 528, n. 3-4, p. 233-237, 2016. Disponível



em:

<https://www.researchgate.net/publication/301251902>. Acesso em: 20 abr. 2026.