

USO DE SETAS NO CONTEXTO DA APRENDIZAGEM EM QUÍMICA E A IMPORTÂNCIA DO SEU SIMBOLISMO**Tiago Gomes dos Santos^a, Valdiney Vieira da Silva^b, André Gustavo Ribeiro Mendonça^c, Iara Terra de Oliveira^c e Wander Gustavo Botero^{c,*}**^aDepartamento de Química, Universidade Federal do Maranhão, 65080-805 São Luís – MA, Brasil^bPrograma de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Goiás, 74690-900 Goiânia – GO, Brasil^cInstituto de Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas, 57072-970 Maceió – AL, Brasil

Recebido em 12/06/2023; aceito em 25/09/2023; publicado na web 16/11/2023

USE OF ARROWS IN THE CONTEXT OF LEARNING IN CHEMISTRY AND THE IMPORTANCE OF ITS SYMBOLISM. The representation of arrows in Chemistry learning is routinely applied in classrooms and textbooks. Arrows of different shapes like horizontal, curved, vertical, or wavy have been used as symbols since the beginning of ancient civilizations, representing elements or compounds. The arrow is one of the most used symbols in Chemistry, as different types have presented different functions, especially in chemical reactions, and because there is no consensus, their use has generated ambiguities and confusion when applying them. In this sense, the present work sought to present and differentiate the types of arrows used in Chemistry to provide a better understanding of this symbol in the learning process. Furthermore, a historical overview of the emergence of arrows in the world of chemistry and the process of acceptance as chemical symbolism in chemical reactions is provided. The use of arrows in some chemical phenomena (e.g., resonance, tautomerism, symmetry operations, and movement of electrons) is also detailed. This work reflects that arrows, as chemical symbolism, require an increasingly concrete standardized notation system to avoid ambiguities of concepts. Finally, when using them, let us consider why the arrow is being symbolized and, above all, what is the scientific concept behind its symbolism.

Keywords: chemistry teaching; symbology; arrows; chemical language.

INTRODUÇÃO

A Química é considerada por muitos como uma ciência de difícil compreensão e usa de uma linguagem muito característica e singular para o entendimento e representação dos fenômenos e reações que ocorrem a nossa volta.¹ Assim, analogias e representações são comumente aplicadas na sala de aula e muitas vezes é foco de problemas associados ao ensino e aprendizagem dos conceitos químicos.

O uso de analogias e representações não se enquadram apenas em ensino de Química, mas sim na linguagem química como um todo.² Francisco *et al.*² relatam que ensinar e aprender Química é um trabalho que necessita de imaginação e da capacidade de interpretação de sua linguagem. Para entender os conceitos químicos, além da compreensão da linguagem comum e das especificidades da linguagem científica, existe a necessidade de interpretação da linguagem química, com seus símbolos, fórmulas, setas, equações e termos para explicar modelos abstratos.³

Durante décadas, o estudo de representações tem sido amplamente discutido e abordado ao nível macroscópico, microscópico e simbólico.⁴⁻⁷ Diversos trabalhos demonstram a dificuldade dos alunos na compreensão dos níveis microscópico e simbólico,⁸⁻¹² devido principalmente a natureza abstrata e invisível, já que muitas vezes, a construção do pensamento depende de informações sensoriais.¹³ Além disso, sem o conhecimento conceitual e habilidade visual, os alunos demonstram maior dificuldade durante o processo de aprendizagem.^{4,14}

Johnstone^{14,15} mostrou a extensão dos problemas associados à falta de entendimento da linguagem comumente usada no contexto da Química. Representou graficamente em três níveis o conhecimento necessário para o entendimento dos fenômenos químicos: o

macro, relacionado ao tangível, ao visível, com possibilidade de manusear materiais e descrever suas propriedades organolépticas; o submicro, relacionado ao nível atômico e molecular; por último, o representacional, que simboliza as substâncias químicas por fórmulas e suas mudanças por reações. Porém, segundo Gabel,⁵ o princípio para o entendimento químico não é a existência de três níveis de representação da matéria porque a aprendizagem ocorre predominantemente no nível mais abstrato, o nível simbólico. Assim, o uso desse simbolismo (como fórmulas, estruturas moleculares, setas, pontos, números, letras, gráficos e equações) torna-se a “linguagem da química” única e fundamental para a melhor compreensão dos conceitos e dos fenômenos.

Tanto para ensinar quanto para aprender Química é preciso antes compreender toda essa linguagem.¹⁶⁻¹⁹ Mas, que linguagem é esta? Consideramos a linguagem química como uma atividade de interação que conecta o fenomenológico, o submicro e o representacional,²⁰ dada a problemática das setas como ferramenta de representação do ponto de vista do simbolismo químico, consequentemente, uma forma de linguagem. Inclusive, a linguagem da química é única no sentido de identificação, compreensão e, principalmente, correlação entre os níveis de estudo da matéria (o observável, o atômico e molecular e o simbólico).²¹ Criou-se esta linguagem justamente para correlacionar o imperceptível com o visível das transformações da matéria²² e toda linguagem é criada, desenvolvida de modo igual em que as estruturas do pensamento evoluem do tangível para o abstrato ou do abstrato para o tangível.²³ Em suma, a linguagem constitui uma herança de nossos ancestrais e é por meio dela que nos aproximamos da realidade.^{20,24}

Deste modo, à luz dos estudos de Taber,²¹ entender a linguagem da química é desafiador, justamente por envolver a relação do fenômeno experimentado em termos de descrições observacionais usando o simbolismo químico para representar os conceitos. As representações em Química podem ser aplicadas com uso de analogias e modelos que definam a construção teórica para a interpretação

*e-mail: wander.botero@iqb.ufal.br

de um fenômeno. O desenho de estruturas moleculares e fórmulas, por exemplo, representam a unificação de conceitos teóricos e experimentais.^{8,12} Pode-se afirmar que, em qualquer subárea na Química, há uma necessidade de relacionar o físico com o efêmero, o tangível com o “invisível” e com isso conectar as propriedades e o comportamento das substâncias a nossa volta com os átomos e moléculas que os compõem.¹⁶ Desta forma, usar um sistema de notação é fundamental para tornar essas conexões possíveis e evitar problemas de significados confusos, dúbios e por vezes errôneos. O uso de seta de duas pontas ($\leftrightarrow$) é um exemplo clássico disso, uma vez que representa um modelo explicativo de ressonância na estrutura do benzeno, determinada por técnicas instrumentais que elucidaram esse fenômeno.²²

Alguns conceitos apresentados em livros de Química de nível superior, relacionados aos diferentes usos das setas como em reações químicas e ligações, podem dificultar o aprendizado do aluno, causado pela ausência ou superficialidade do conteúdo apresentado nas obras.^{25,26} Por exemplo, sabe-se que as setas (simples, duplas, duas pontas, onduladas, curvadas, etc.) fazem parte do simbolismo essencial na Química e o uso delas em reações pode desempenhar uma série de ambiguidades, e assim confundir o entendimento do sistema reacional proposto. Apesar de hoje parecer existir um consenso e uma certa convenção no uso de setas, é possível encontrar em livros didáticos representações diferentes de uma mesma reação ou mecanismo.

A Figura 1 mostra três representações diferentes encontradas em livros de Química de nível superior, usando setas distintas, para uma reação entre um alceno e uma espécie metálica. O uso de seta de duas pontas, seta simples e seta dupla, podem significar ressonância ou tautomerismo, irreversibilidade da reação e equilíbrio, respectivamente. Esta diversificação em um mesmo sistema, evidencia que não existe uma convenção geral no uso dessas setas, o que pode ocasionar interpretações errôneas e equivocadas para uma mesma reação. Além disso, observa-se uma diferenciação na representação da ligação química do complexo formado entre o metal e o alceno, podendo levar ao aluno graduando de Química (Licenciado e Bacharel) confundir o entendimento das clássicas teorias de ligações em compostos de coordenação e organometálicos.

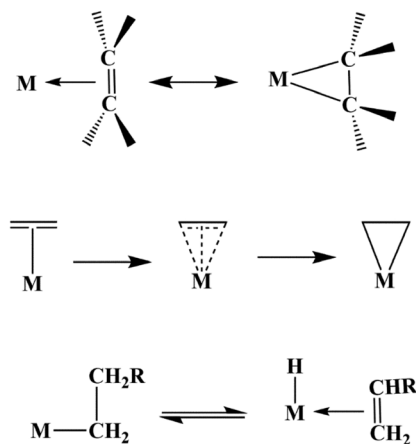


Figura 1. Uso de diferentes tipos de setas para uma mesma representação entre um alceno e uma espécie metálica (M): seta de duas pontas, seta simples e seta dupla²⁷⁻²⁹

Vale salientar que há uma diferença epistêmica entre a natureza do uso das setas na representação dos processos químicos, que envolve maior generalização e abstração porque é dependente de conceitos, e características de conhecimentos já experienciados ou vivenciados. Considerando que o aluno acessa conhecimentos prévios, que foram mediados por outras pessoas,³⁰ o nível fenomenológico

de Johnstone^{14,15,31} deixa de ser compreendido de forma unicamente perceptiva ou sensorial, assim como, o simbólico também deixa de ser considerado como somente uma forma de definição do observável e manifesta o sentido de representação de conceitos correlacionando os âmbitos macro e submicro.²¹ Portanto, entendemos que correlacionar os três níveis (macro, submicro e representacional) requer um certo grau de abstração e reforçamos a importância da seta como ferramenta de representação do ponto de vista do seu simbolismo, atribuindo-lhe uma função distintiva na concepção do pensamento químico.

Diante do exposto, as representações simbólicas são compostas de recursos que relacionam ou descrevem aspectos do mundo real sendo interpretadas com base em seu significado semântico codificado por convenções previamente aprendidas³² e o uso de setas (como símbolos munidos de conceitos) é amplamente utilizado para representar o conhecimento químico, seja em uma reação, equilíbrio químico, fenômeno de ressonância, ciclos catalíticos, mecanismos, ligações químicas, saltos eletrônicos e movimento dos elétrons. Sendo assim, para ter um bom aprendizado no conteúdo de Química, deve-se usar esses símbolos para explicar e demonstrar sem ambiguidades conceitos-chave, como, ressonância, equilíbrio, transferência de elétrons, ligações químicas, etc.³³⁻³⁵ Nesta perspectiva, devido à pouca relevância dada às setas no ensino de Química, este trabalho se apresenta para auxiliar alunos graduandos e professores que atuam na área a refletirem sobre o seu uso, como ferramenta de representação do ponto de vista do simbolismo químico.

REPRESENTAÇÃO NA APRENDIZAGEM EM QUÍMICA

Representações simbólicas comuns em Química incluem pictogramas, fórmulas, estruturas, equações, números, letras, pontos e setas. Para compreensão dos conceitos relacionados ao simbolismo químico é essencial que possamos aprender, descrever e discutir os diferentes modos de representação significativamente.¹⁶ Essa habilidade é muitas vezes referida como competência representativa e tem sido extensivamente descrita e caracterizada por Kozma *et al.*³⁶ Por sua vez, competência representativa pode ser entendida como um conhecimento prévio precário, e os alunos com baixa competência representativa tendem a se concentrar em características superficiais das representações. Esse conceito é de particular importância ao ensinar Química e diversos estudos relatam as dificuldades que os alunos têm em traduzir entre uma compreensão simbólica, micro- e macroscópica.^{5,14,37} Ainda, segundo os estudos de Kozma *et al.*,³⁶ para desenvolver ou aperfeiçoar esta competência, usamos nosso conhecimento de domínio, habilidades representacionais e as características das representações para criar agrupamentos com base teórica de situações-problema e raciocinar sobre uma respectiva solução. Desta forma, sistemas e ferramentas especializados de símbolos permitem aos alunos expressar sua compreensão de entidades e processos químicos microscópicos.

Muito esforço e tempo é aplicado na melhoria das habilidades de visualização dos alunos, pois apresentam dificuldade em entender várias representações simbólicas, explicar o porquê de uma representação ser apropriada para uma finalidade específica, identificar recursos exclusivos de uma representação, descrever e fazer conexões entre diferentes símbolos para um dado contexto.^{16,38-42} Deste modo, desenvolver a capacidade de interpretar representações simbólicas requer a habilidade de processar, avaliar e transformar informações em diferentes formatos.³⁵ Combinados, esses processos devem levar a uma melhor compreensão do conteúdo estudado e analisado. Acredita-se ainda que existem padrões (como, observação, raciocínio, modelagem e explicação) na maneira como os alunos desenvolvem suas habilidades e conhecimentos, objetivando a orientação na aprendizagem de conceitos químicos.⁴³⁻⁴⁶

Para os alunos internalizarem a “linguagem da química”, eles necessitam apropriar-se dos símbolos (como pictogramas, fórmulas, estruturas, equações, números, letras, pontos e setas) como forma de constituição do pensamento químico.^{18,24,30} Por exemplo, ao estudar algumas propriedades na Tabela Periódica os alunos podem saber por conhecimento empírico que prata (Ag), ouro (Au) e cobre (Cu) são todos metais. Mas, quando questionados a falar sobre quais são as suas propriedades, os alunos devem compreender e reportar diretamente ao simbolismo químico, citando que Ag, Au e Cu são metais de transição pertencentes ao bloco d, do Grupo 11B, períodos 4, 5 e 6, respectivamente, e que por isso apresentam propriedades semelhantes entre si. Neste sentido, é importante reconhecer que o simbolismo químico é um tipo de linguagem e que os alunos precisam de tempo para praticar a decodificação de seus símbolos, procurando predefinições que os ajudem aprender a usar essa linguagem.^{45,46}

A linguagem química é uma parte importante da Química e somente tornando explícito seu simbolismo é que podem tornar sua representação constitutiva.^{23,30,43,46} Nesta perspectiva, o processo de aprendizagem se coloca a partir de relações sociais, que é permeada pelo outro e pela linguagem.^{23,24,30} Por isso, para aprender química é necessária a comunicação e significação dessa linguagem.² Sendo assim, professores devem desenvolver estratégias de ensino e aprendizagem para superar os desafios da linguagem que encontram em textos de Química. Portanto, assegurar um símbolo para um conceito específico torna-se desafiador tanto para o professor quanto para o aluno, ou seja, atribuir um significado ao símbolo requer uma compreensão das convenções e da linguagem em Química.⁴⁶ De acordo com Bernholt *et al.*,⁴⁷ a linguagem envolve o significado, a função e a sintaxe das fórmulas, enquanto as dificuldades conceituais envolvem a má compreensão da junção entre o simbólico, micro- e macroscópico. Como disse Nakhleh,⁴⁸ “se o aluno não consegue interpretar um conceito químico em termos teórico-conceituais, então, este aluno não aprendeu Química”.

A ORIGEM DO SIMBOLISMO QUÍMICO E O USO DAS SETAS

Desde o início das civilizações antigas, o simbolismo químico é usado para uma variedade de funções diferentes: inicialmente, os símbolos foram introduzidos como abreviações convenientes para nomes químicos extensos; depois, na Idade Média, eles passaram a ser usados para esconder a verdadeira natureza dos materiais em reações químicas.⁴⁹ Importante destacar que nesses períodos históricos o que se tinha era uma certa simbologia e alguns desses símbolos foram adotados pela Química. No entanto, as origens do simbolismo químico e o significado de alguns símbolos ainda são incertos e acredita-se serem de origem chinesa e egípcia.⁵⁰ Rouvray⁴⁹ mostrou em seu trabalho que no final do século XVII importantes passos no desenvolvimento de um simbolismo químico de base científica estavam emergindo e um fluxo de novas ideias foram se formando progressivamente a partir do pensamento alquímico, tornando um sistema de notação padronizado cada vez mais concreto.

Notavelmente, as setas foram primeiramente relacionadas ao conhecimento químico como símbolos alquímicos representando elementos ou compostos (Figura 2). Por sua vez, o simbolismo de setas em reações químicas foi bastante relutante e criticado pelos químicos da época. Essas críticas passam a surgir desde o uso do sinal de igualdade por Antoine L. Lavoisier,^{51,52} conectando reagentes e produtos, até as propostas por Jacobus H. van't Hoff, em 1884,⁵³ da substituição do sinal de igualdade pela seta dupla, para enfatizar a reversibilidade de algumas reações. John C. Hessler

e Albert L. Smith,⁵⁴ em 1902, com o primeiro livro publicado (*Essentials of Chemistry for Secondary Schools*) usaram setas simples em equações químicas. A relutância em adotar o novo simbolismo foi exemplificada em uma revisão de Alexander Smith⁵⁵ (*General Inorganic Chemistry*), publicado em 1906. Em meio a um comentário, Lawrence Bigelow⁵⁶ escreveu: “...the substitution of a single arrow for the equality mark is an innovation which the reviewer frankly doesn't like”, traduzindo “...a substituição de uma única seta para a marca de igualdade é uma inovação que o revisor francamente não gosta”.

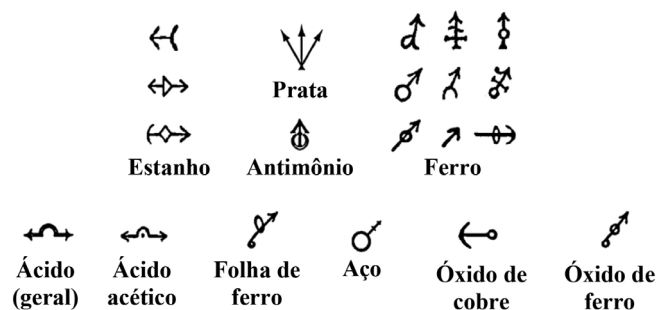


Figura 2. Algumas simbologias de setas usadas pelos alquimistas como representação de elementos e substâncias químicas (fonte: adaptado de Rouvray e Valerdi)^{49,50}

A Figura 3 mostra um esquema cronológico simplificado do surgimento desses símbolos em equações químicas, mostrando alguns dos autores que contribuíram para o seu uso. É importante ressaltar que os símbolos discutidos aqui só foram aceitos pela comunidade química em um momento específico da história, quando o conhecimento e a nomenclatura estavam consolidados. A esse respeito, Jean Beguin, em 1615, e Antoine L. Lavoisier, em 1827, foram precursores para a introdução da equação química e do simbolismo para representação de uma reação, respectivamente, embora suas propostas tenham sido praticamente ignoradas por décadas.^{49,57} Após a incorporação do simbolismo nos livros de Química existe um período de indução, em que os autores passaram a adotar ou criticar seu uso, e que isto impactou no consenso quanto a sua permanência.⁵⁸

Por volta de 1827, período caracterizado pelo uso do sinal de igualdade conectando reagentes aos produtos nas equações químicas, Lavoisier simboliza como parte de uma equação matemática na qual se pode calcular as proporções das espécies envolvidas.⁵⁸ A representação de van't Hoff, em 1884,⁵³ propôs o uso de setas duplas para enfatizar a reversibilidade de uma reação e introduzindo o conceito de equilíbrio químico ao formalismo da Química. No entanto, há relatos de que o sinal de “igual” foi usado quase exclusivamente para descrever reações químicas até aproximadamente 1890.⁵⁸ Nota-se que o desuso do sinal de igualdade nas equações químicas não corresponde apenas a preferência de um simbolismo alternativo, mas estabelece um avanço conceitual significativo. Isso porque adotar o sinal de igualdade, como usado em equações matemáticas, propõe uma relação direta entre reagentes e produtos, já a seta implica claramente em um senso de direção e de diferenciação às espécies envolvidas.

A partir do século XX, surgiram setas de diferentes formas e estilos como aquela de duas pontas inserida por Fritz G. Arndt, em 1924, um químico alemão, para simbolizar estruturas de ressonância e do fenômeno de tautomerismo. Por último, a seta retróssintética que direciona de produtos para reagentes, introduzida pelo químico americano Elias James Corey, em 1971.⁵⁸

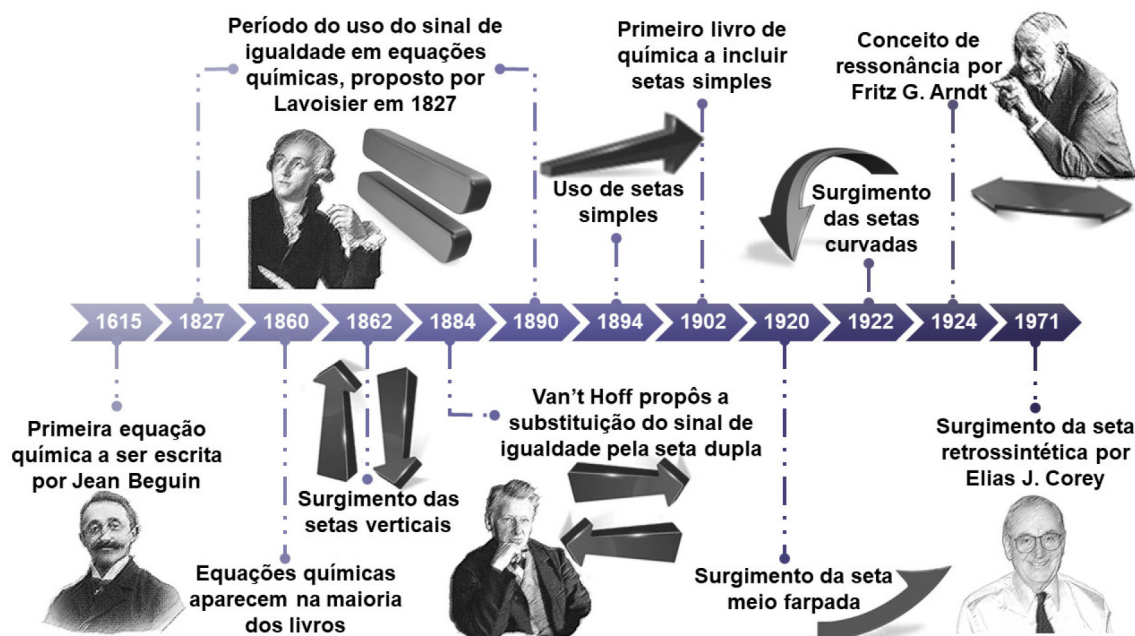


Figura 3. Linha do tempo: esquema do surgimento das equações químicas e o simbolismo dos diferentes tipos de setas

AS SETAS EM QUÍMICA: CONCEITO CIENTÍFICO POR TRÁS DO SEU SIMBOLISMO

O uso do simbolismo, ao escrever uma reação química ou mecanismo reacional, é um dos mais importantes meios de atribuição de significados em Química. Letras e números substituem as descrições dos reagentes e produtos e a(s) seta(s) normalmente direciona(m) a reação ou desempenha(m) uma ampla variedade de funções. A Figura 4 mostra os diferentes tipos de setas usadas nas representações de reações e mecanismos reacionais.

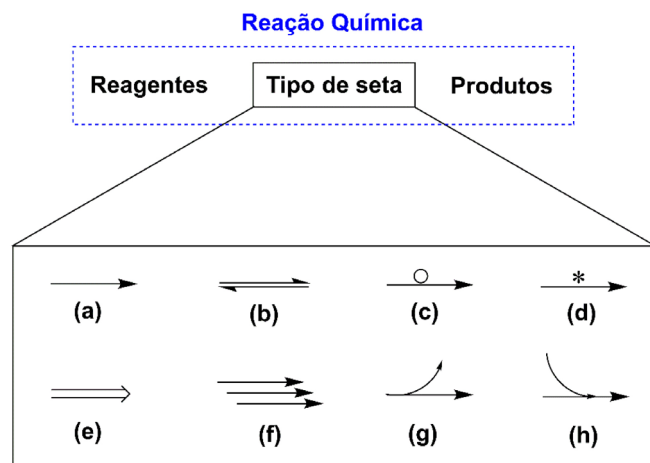


Figura 4. Esquema hipotético de uma reação química e o simbolismo no uso de diferentes tipos de setas: (a) seta simples ou única; (b) seta dupla; (c) seta com círculo em cima, usada na inversão de Walden; (d) seta com asterisco em cima, usada na reação de fragmentação quando a reação é confirmada pela observação de um pico metaestável em um espectro de massa; (e) seta retrossintética; (f) setas múltiplas, usadas como elipse em várias etapas intermediárias; (g) seta bifurcada e (h) seta de fusão, usadas na descrição de mecanismos

A função distintiva das setas na concepção do pensamento químico se refere a sua representação como forma de apropriação do conceito de reação química, o que muitas vezes é confundido

e aplicado erroneamente. A União Internacional da Química Pura e Aplicada (IUPAC - *International Union of Pure and Applied Chemistry*), em seu Livro Verde, estabelece que a “representação simbólica de uma reação química na qual as entidades reagentes são dadas no lado esquerdo e as entidades do produto no lado direito. Símbolos diferentes são usados para conectar os reagentes e produtos”. Definições deste tipo dificultam o aprendizado e atuam como obstáculo epistemológico para o entendimento do próprio conceito de reação. Essa representação estrita compromete sua correlação com o fenomenológico e submicro, pois não leva em consideração o movimento das moléculas ou como os sistemas químicos podem mudar ao longo do tempo. Ferguson e Bodner,⁵⁹ relataram que essa visão segmentada de “lados” em uma reação acaba ocasionando problemas com relação à formalidade, convenções no seu uso e a real representação dessas setas nas diferentes reações e mecanismos que são estudados.

Nesse sentido, é feita uma descrição sobre os conceitos associados às setas em Química, seu valor como ferramenta de representação e as divergências dos significados, dependendo do ponto de vista do simbolismo químico.

Setas horizontais

Quase como um símbolo padrão para as reações químicas, as setas simples (Figura 4a) são codificadas como reações que se processam em um único sentido. Comumente visualizada nas tradicionais reações orgânicas de adição, eliminação e substituição, como, por exemplo, na hidrogenação catalítica de hidrocarbonetos acíclicos insaturados a alcanos (Figura 5a). Na desidratação intermolecular de álcoois produzindo éter (Figura 5b) e na monocloração do metano a um haleto orgânico saturado (Figura 5c). Além destes exemplos, as setas simples também são observadas nos mecanismos de reações inorgânicas,⁶⁰ como nos mecanismos associativos em complexos, formando uma espécie química intermediária. A Figura 5d, exemplifica uma importante reação para formação do complexo *cis*-diaminodicloroplatina(II) ou cisplatina, um composto inorgânico de geometria planar que apresenta atividade antitumoral, e que segue o mecanismo associativo de troca de ligantes com formação de um intermediário bipiramidal triangular.

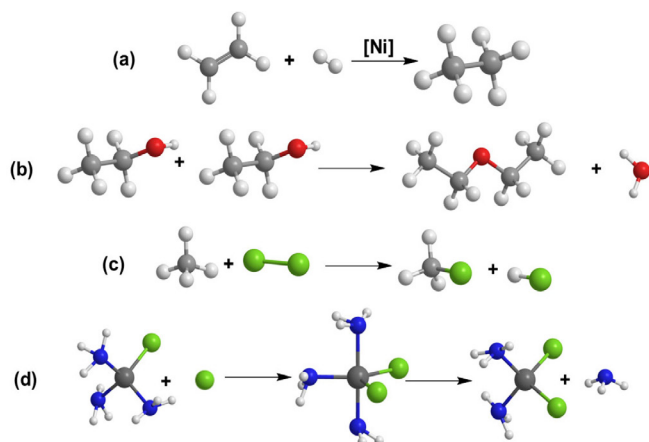


Figura 5. Uso de setas simples em reações químicas: (a) hidrogenação, (b) desidratação, (c) halogenação e (d) mecanismo inorgânico de associação. Cores dos átomos: O em vermelho, H em branco, N em azul, C em cinza e Cl em verde

As setas horizontais receberam uma variedade de outros significados em Química, além de seu uso extensivo em reações, por exemplo, na formação simbolizada de reagentes $\rightarrow$ produtos e também pode ser usada na representação de uma ligação química, como na formação de complexos. Na Figura 6a, a seta simples simboliza uma ligação covalente coordenada entre o trifluoreto de boro (BF_3), sendo considerado um ácido de Lewis, e a amônia (NH_3), que se comporta como uma base de Lewis, formando o borano de amônia.

Outros simbolismos em Química são possíveis com algumas pequenas alterações no formato da seta horizontal e, consequentemente, seus conceitos são distintos. Reações mais elaboradas com o uso de setas duplas podem representar estado de equilíbrio, como na reação de autoionização da água simbolizada pelo uso da seta dupla meio farpada (Figura 6b), ou que a reação é reversível, representada na Figura 6c de uma típica reação de óxido-redução na etapa de transferência de elétrons ao longo de uma ponte formada por um ligante. Também o uso da seta horizontal foi associado como simbolismo do conceito de ressonância.^{26,33} O exemplo da Figura 6d mostra as estruturas hipotéticas do íon carbonato, ou seja, não representam a realidade visto que o íon carbonato é um híbrido delas. Neste caso, a seta de duas pontas ($\leftrightarrow$) é usada para simbolizar descrições alternativas da estrutura eletrônica de uma

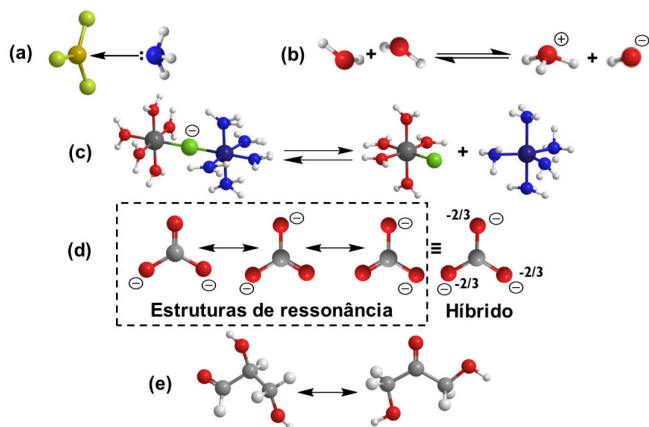


Figura 6. Diferentes usos de setas horizontais: (a) ligação coordenada, (b) equilíbrio, (c) reversibilidade, (d) ressonância e (e) interconversão. Cores dos átomos: O em vermelho, H em branco, N em azul, C em cinza, Cl em verde, B em dourado, F em verde claro, Cr em cinza escuro e Co em azul escuro

mesma molécula. O mesmo simbolismo pode ser empregado em um processo químico que interconverte duas espécies, conhecido como tautomerismo. Tipicamente a interconversão de dois isômeros ocorre via um deslocamento simultâneo de uma ligação dupla, como, por exemplo, o tautomerismo observado entre o 2,3-dihidroxiopropanal e o 1,3-dihidroxiopropanona (Figura 6e), reação comum em processos de conversão de açúcares.⁶¹ Um cuidado tem que ser tomado para identificar essas distinções, considerando o sistema analisado e sempre que possível deixar claro no contexto de qual representação se trata, evitando erros conceituais.

Seta do tipo apresentada na Figura 7a pode simbolizar um efeito indutivo ou polarização da ligação em uma molécula, com a cabeça ou sentido apontando para o elemento mais eletronegativo da ligação. Seta cruzada (Figura 7b) é comumente usada para indicar a direção do momento dipolar em uma molécula, com a cabeça apontando para o polo negativo e a cauda para o polo positivo (embora a IUPAC recomende definir um momento dipolar na direção oposta). Seta dupla com um lóbulo pendente (Figura 7c), proposta por Hoffmann,⁶² para indicar analogia isolobal, conceito que se refere às propriedades de simetria, energia e a forma aproximada dos orbitais de fronteira em fragmentos semelhantes. Segundo o Livro de Ouro da IUPAC, a ocorrência de uma inversão de Walden durante uma transformação química pode ser indicada na reação pela seta mostrada na Figura 7d em vez de uma seta simples apontando de reagentes aos produtos. Por último, quando uma reação de fragmentação é escrita com um asterisco sobre a seta (Figura 7e) significa que foi confirmada pela observação de um pico metaestável em um espectro de massa.

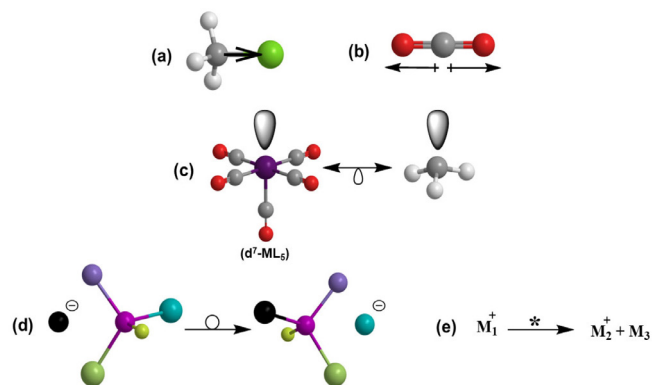


Figura 7. Diferentes usos de setas horizontais: (a) e (b) setas mostrando a polarização da ligação C–Cl e o momento de dipolo do CO_2 , respectivamente; (c) e (d) setas indicando analogia isolobal e inversão de Walden em compostos hipotéticos, respectivamente; (e) reação de fragmentação confirmada em um espectro de massa. Cores dos átomos em (a) e (b): O em vermelho, H em branco, C em cinza e Cl em verde

Setas curvadas

Parece óbvio perceber o grau de abstração implícito nas setas curvadas, na qual a ponta direciona a reação e o eixo é substituído por uma curva que descreve a entrada ou saída de uma espécie química, como também, a trajetória de um elétron em um mecanismo reacional. Para além dessa descrição aparentemente simplista, as setas curvas também são usadas em operações de simetria como simbolismo de uma ação realizada em uma molécula que a deixa em uma configuração indistinguível da configuração original. Um exemplo, é a rotação de 180° da molécula de água em torno da bissetriz do ângulo H–O–H no qual a operação de rotação é executada (Figura 8a).

Seguindo no simbolismo das setas em reações químicas, diferentes formas podem ser utilizadas para indicar o deslocamento de elétrons em um mecanismo, como as setas curvadas ou encarcacoladas,

capazes de indicar o deslocamento de pares de elétrons e as setas em forma de anzol, as quais substituem as setas curvas quando se deseja referir ao deslocamento de apenas um único elétron em moléculas orgânicas e inorgânicas.^{40,58,63} É comum essa simbologia representando o movimento dos elétrons em reações de quebra heterolítica e homolítica formando espécies químicas carregadas ou radicais. Esse processo é facilmente observado na cisão das ligações C–C em uma cadeia polimérica: a quebra homolítica (Figura 8b) corresponde à quebra da ligação covalente, com um elétron permanecendo ligado a cada fragmento, formando dois radicais livres. Na quebra heterolítica (Figura 8c) o par de elétrons fica ligado a um dos fragmentos, que apresenta carga negativa por ter excesso de elétrons e será um ânion, e o outro fragmento ficará deficiente de elétrons, com carga positiva e será um cátion.⁶⁴

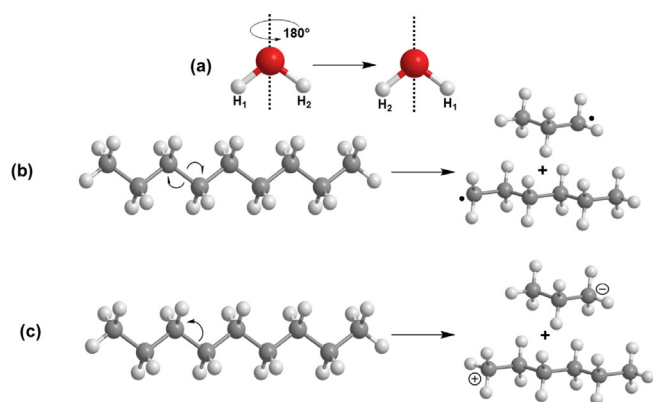


Figura 8. Diferentes usos de setas curvas: (a) seta curva simples simbolizando que houve uma operação de simetria na molécula de H_2O ; (b) seta em forma de anzol mostrando o movimento de um único elétron em uma reação hipotética de quebra homolítica; (c) seta curva simples mostrando o movimento de um par de elétrons em uma reação hipotética de quebra heterolítica. Cores dos átomos: O em vermelho, H em branco e C em cinza

Outros tipos de setas curvas podem ter diferentes significados quando inseridas em diferentes passos em um ciclo catalítico.^{63,65,66} Cada seta curva no ciclo hipotético da Figura 9 tem seu simbolismo associado a um conceito: a seta bifurcada, no passo inicial, indica a eliminação redutiva de dois ligantes do complexo hipotético $[ML_5]$ para produzir uma espécie ativa $[ML_3]$. Logo após, a seta de fusão simboliza tanto a entrada do substrato S ao ciclo que irá reagir com a espécie ativa $[ML_3]$, passo conhecido como adição oxidativa, quanto a direção da reação para gerar uma espécie do tipo $[ML_3S]$. Esta espécie pode se submeter a uma segunda perda do ligante L para gerar outra espécie $[ML_2S]$. Posteriormente, a seta de fusão indica a adição oxidativa de LP para formar $[ML_3SP]$, que, no último passo, a seta bifurcada simboliza uma eliminação redutiva do produto formado SP; e em cada ciclo subsequente, a espécie catalítica $[ML_5]$ é regenerada. Este esquema genérico simboliza praticamente todos os processos industriais catalisados por organometálicos, como, por exemplo, hidroformilação de alcenos em aldeídos;⁶⁷ carbonilação do metanol para produção de ácido acético, típicos processos Monsanto e Cativa;⁶⁸ produção de aldeídos pelo processo Wacker ou Smidt⁶⁹ e hidrogenação de alceno a alceno usando os catalisadores de Wilkinson.⁷⁰

Setas verticais ou onduladas

Em Química, setas verticais podem significar a evolução de um gás (Figura 10a) ou a formação de precipitado (Figura 10b) em uma reação,⁷¹ ou estão relacionadas ao conceito de spin codificados em um clássico diagrama de energia dos orbitais moleculares (Figura 10c).

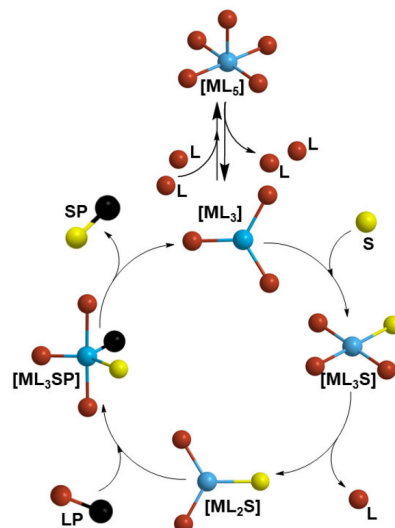


Figura 9. Esquema hipotético de um ciclo catalítico em que as setas curvas bifurcada e de fusão indicam etapas reacionais distintas: adição oxidativa, dissociação, migração, funcionalização e eliminação redutiva

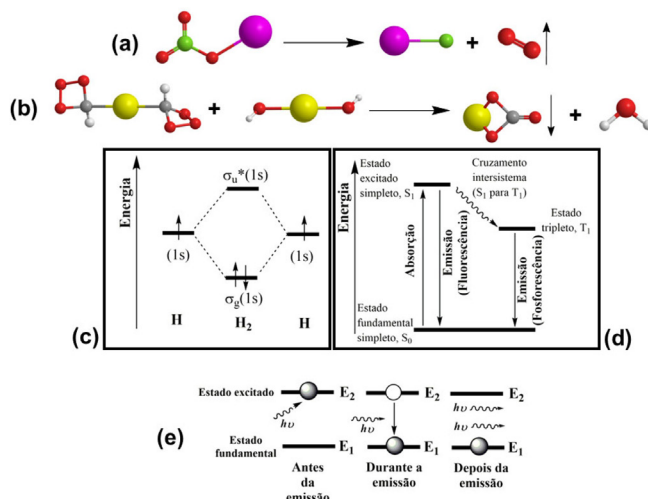


Figura 10. Diferentes usos de setas verticais: (a) seta $\uparrow$ indicando a evolução do gás oxigênio; (b) seta $\downarrow$ indicando a formação de um precipitado; (c) diagrama de energia dos orbitais para a formação da molécula de H_2 ; (d) transições radiativas e não radiativas ilustradas pelas setas retílineas e onduladas, respectivamente; (e) quando um fóton atinge um elétron no estado excitado E_2 ele estimula aquele elétron a emitir um outro fóton e mudar para o estado E_1 . Cores dos átomos: O em vermelho, H em branco, C em cinza, K em lilás, Cl em verde e Ca em amarelo

Tal esquema representa a descrição de dois elétrons emparelhados em um orbital com direção da seta $\uparrow$ correspondente a $m_s = +1/2$ e da seta $\downarrow$ correspondente a $m_s = -1/2$.⁷² O uso da seta meio farpada também é comum como simbologia do elétron nesses gráficos de energia de orbitais. Nestes casos, mais uma vez, há uma falta de convenção das setas como simbolismo químico. Além disso, como visto anteriormente, a seta meio farpada pode indicar o deslocamento de apenas um único elétron quando se apresenta de forma curva (Figura 8b) ou estado de equilíbrio quando estiver na posição horizontal (Figura 6b).

Por último, setas onduladas também podem representar conceitos opostos dependendo do contexto em que são usadas, seja luz emitida ou decaimento sem radiação. Por exemplo, processos de excitação e decaimento são representados por diferentes tipos de setas no diagrama de Jablonski⁷³ (Figura 10d), no qual as transições são

representadas por: radiativas (setas retilíneas) e as não radiativas (setas onduladas). Este último parece ser uma escolha paradoxal, porque há uma tendência em associar as setas onduladas à natureza ondulatória da luz, conforme usado em um diagrama de emissão estimulada de radiação (Figura 10e).

Estes são alguns dos exemplos que podem gerar ambiguidade ou confusão no momento de aplicá-los, pois as setas em Química transmitem muito mais informações do que sentidos estritamente icônicos e que, muitas vezes, carregam um grau significativo de abstração. Por isso, o problema que existe na representação dessas setas, da inexistência de uma convenção associada à falta de rigor e padronização entre diferentes autores, pode gerar lacunas no aprendizado do aluno e a reprodução de um conceito impreciso e errado.

CONCLUSÃO

Como foi considerado em estudos aqui referenciados, alunos munidos de conhecimento químico precário tendem a enfrentar dificuldades quando confrontam representações simbólicas. Nesta perspectiva, este trabalho visou analisar os diferentes tipos de setas (horizontais, curvadas, verticais ou onduladas) usadas na linguagem da Química, tornando-se uma ferramenta de auxílio para desmistificar conceitos que possam induzir ao erro ou levar a ambiguidades. Essa percepção mostra que as setas se apresentam muito mais que simples símbolos de abstração ou direcionamentos de uma reação, por exemplo, mas sim, elas se tornam uma representação de conceitos-chave da Química. Para os alunos desenvolverem suas competências representativas na linguagem química, o contato direto com os símbolos químicos, mediação e significação para a apropriação desta linguagem são essenciais. Contudo, ressalta-se que quando se utiliza setas em Química, deve-se considerar o porquê precisamente é necessária e o que ela significa e, principalmente, qual o conceito científico por trás do seu simbolismo. Espera-se que essa abordagem possa ser um material de apoio no sentido de auxiliar aqueles que necessitam compreender significativamente o contexto das setas inseridas em conceitos químicos, principalmente, aos profissionais que atuam nos cursos de formação inicial de professores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CAPES, CNPq, FAPESP, FAPEMA e às instituições UFMA, UFG e UFAL.

REFERÊNCIAS

1. Wartha, E. J.; Rezende, D. B.; *Investigações em Ensino de Ciências* **2011**, 16, 275. [Link] acessado em Outubro 2023
2. Francisco, W.; Campaner, J. V. O.; Nascimento, H. C. H.; *Educ. Quím.* **2020**, 31, 105. [Crossref]
3. Reinaldo, T. A. S.; *Representação em Química: Relações entre Níveis do Conhecimento e seus Signos para Apropriação da Linguagem Química*; Dissertação Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Brasil, 2019. [Link] acessado em Outubro 2023
4. Ben-Zvi, R.; Eylon, B. S.; Silberstein, J.; *J. Chem. Educ.* **1986**, 63, 64. [Crossref]
5. Gabel, D.; *J. Chem. Educ.* **1999**, 76, 548. [Crossref]
6. Keig, P. F.; Rubba, P. A.; *J. Res. Sci. Teach.* **1993**, 30, 883. [Crossref]
7. Kozma, R. B.; Russell, J.; *J. Res. Sci. Teach.* **1997**, 34, 949. [Crossref]
8. Kozma, R.; *Learning and Instruction* **2003**, 13, 205. [Crossref]
9. Chandrasegaran, A. L.; Treagust, D. F.; Mocerino, M.; *Research in Science Education* **2008**, 38, 237. [Crossref]
10. Gilbert, J. K.; Treagust, D. F. Em *Multiple Representations in Chemical Education*; Gilbert, J. K.; Treagust, D., eds; Springer: Dordrecht, 2009, p. 1. [Crossref]
11. Meijer, M. R.; Bulte, A. M. W.; Pilot, A. Em *Concepts of Matter in Science Education*; Tsapalis, G.; Sevan, H., eds.; Springer: Dordrecht, 2013, p. 419. [Crossref]
12. Berg, A.; Orraryd, D.; Pettersson, A. J.; Hultén, M.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2019**, 20, 710. [Crossref]
13. Wu, H. K.; Krajcik, J. S.; Soloway, E.; *J. Res. Sci. Teach.* **2001**, 38, 821. [Crossref]
14. Johnstone, A. H.; *Journal of Computer Assisted Learning* **1991**, 7, 75. [Crossref]
15. Johnstone, A. H.; *J. Chem. Educ.* **1993**, 70, 701. [Crossref]
16. Grove, N. P.; Cooper, M. M.; Rush, K. M.; *J. Chem. Educ.* **2012**, 89, 844. [Crossref]
17. Roque, N. F.; Silva, J. L. P. B.; *Quím. Nova* **2008**, 31, 921. [Crossref]
18. Schnetzler, R. P.; Antunes-Souza, T.; *Quím. Nova* **2019**, 42, 947. [Crossref]
19. Pauletti, F.; Fenner, R. S. F.; Rosa, M. P. A.; *Revista Perspectiva* **2013**, 37, 7. [Link] acessado em Outubro 2023
20. Bakhtin, M.; *Estética da Criação Verbal*, 6ª ed.; WMF Martins Fontes: São Paulo, 2011.
21. Taber, K. S.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2013**, 14, 156. [Crossref]
22. Hoffmann, R.; Laszlo, P.; *Angew. Chem., Int. Ed.* **1991**, 30, 1. [Crossref]
23. Vigotski, L. S.; *Pensamento e Linguagem*, 4ª ed.; Martins Fontes: São Paulo, 2008.
24. Vigotski, L. S.; Luria, A. R.; Leontiev, A. N.; *Linguagem, Desenvolvimento e Aprendizagem*, 13ª ed.; Ícone: São Paulo, 2017.
25. Leite, H. S. A.; Porto, P. A.; *Quím. Nova* **2015**, 38, 580. [Crossref]
26. Kim, T.; Wright, L. K.; Miller, K.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2019**, 20, 659. [Crossref]
27. Housecroft, C.; Sharpe, A. G.; *Química Inorgânica*, 4ª ed.; LTC: Rio de Janeiro, 2013.
28. Shriver, D. F.; Atkins, P. W.; *Química Inorgânica*, 4ª ed.; Bookman: Porto Alegre, 2008.
29. Farias, R. F.; *Química de Coordenação: Fundamentos e Atualidades*, 2ª ed.; Átomo: São Paulo, 2009.
30. Vigotski, L. S.; *A Formação Social da Mente: O Desenvolvimento dos Processos Psicológicos Superiores*, 7ª ed.; Martins Fontes: São Paulo, 2007.
31. Johnstone, A. H.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2006**, 7, 49. [Crossref]
32. Rau, M. A.; Michaelis, J. E.; Fay, N.; *Computers & Education* **2015**, 82, 460. [Crossref]
33. Campaigne, E.; *J. Chem. Educ.* **1959**, 36, 336. [Crossref]
34. Cintas, P.; *Angew. Chem.* **2004**, 116, 6012. [Crossref]
35. Farhat, N. J.; Stanford, C.; Ruder, S. M.; *J. Chem. Educ.* **2019**, 96, 865. [Crossref]
36. Kozma, R.; Chin, E.; Russell, J.; Marx, N.; *Journal of the Learning Sciences* **2000**, 9, 105. [Crossref]
37. Talanquer, V.; *J. Chem. Educ.* **2016**, 93, 3. [Crossref]
38. Stieff, M.; Scopelitis, S.; Lira, M. E.; Desutter, D.; *Sci. Educ.* **2016**, 100, 344. [Crossref]
39. Galloway, K. R.; Stoyanovich, C.; Flynn, A. B.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2017**, 18, 353. [Crossref]
40. Flynn, A. B.; Featherstone, R. B.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2017**, 18, 64. [Crossref]
41. Tiettmeyer, J. M.; Coleman, A. F.; Balok, R. S.; Gampp, T. W.; Duffy, P. L.; Mazzarone, K. M.; Grove, N. P.; *J. Chem. Educ.* **2017**, 94, 282. [Crossref]
42. Cooper, M. M.; Grove, N.; Underwood, S. M.; Klymkowsky, M. W.; *J. Chem. Educ.* **2010**, 87, 869. [Crossref]
43. Cardellini, L.; *Educ. Quím.* **2012**, 23, 305. [Crossref]
44. Abir, A.; Yehudit, D. J.; *Educ. Quím.* **2013**, 24, 37. [Crossref]

45. Claesgens, J.; Scalise, K.; Stacy, A.; *Educ. Quim.* **2013**, *24*, 407. [Crossref]
46. Wood, J.; Donnelly-Hermosillo, D. F.; *Computers & Education* **2019**, *141*, 103615. [Crossref]
47. Bernholt, S.; Fischer, I.; Heuer, S.; Taskin, V.; Martens, J.; Parchmann, I.; *CHEMKON* **2012**, *19*, 171. [Crossref]
48. Nakhleh, M. B.; *J. Chem. Educ.* **1992**, *69*, 191. [Crossref]
49. Rouvray, D. H.; *Endeavour* **1977**, *1*, 23. [Crossref]
50. Muria y Valerdi, A.; *Los Signos Químicos su Génesis y Transformación a Través de la Historia*, 12^a ed.; Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona: Barcelona, 1916.
51. Leicester, H. M.; *Panorama Histórico de la Química*; First Alhambra: Madrid, 1967.
52. Lavoisier, A. L.; *Traité Élémentaire de Chimie*; Chez Cuchet: Paris, 1789.
53. van't Hoff, J. H.; *Etudes de Dynamique Chimique*; Frederik Muller: Amsterdam, 1884.
54. Hessler, J. C.; Smith, A. L.; *Essentials of Chemistry*; B. H. Sanborn & Co.: Boston, 1902.
55. Smith, A. L.; *General Inorganic Chemistry*; The Century Co.: New York, 1906.
56. Bigelow, S. L.; *J. Am. Chem. Soc.* **1906**, *28*, 1081. [Crossref]
57. Wiswesser, W. J.; *J. Chem. Inf. Model.* **1985**, *25*, 258. [Crossref]
58. Alvarez, S.; *Angew. Chem., Int. Ed.* **2012**, *51*, 590. [Crossref]
59. Ferguson, R.; Bodner, G. M.; *Chem. Educ. Res. Pract.* **2008**, *9*, 102. [Crossref]
60. Berg, S.; Ghosh, A.; *J. Chem. Educ.* **2013**, *90*, 1446. [Crossref]
61. dos Santos, T. G.; Assis, G. C.; Silva, A. O. S.; Meneghetti, S. M. P.; *Rev. Virtual Quim.* **2021**, *13*, 1. [Crossref]
62. Hoffmann, R.; *Angew. Chem., Int. Ed.* **1982**, *21*, 711. [Crossref]
63. Berg, S.; Ghosh, A.; *J. Chem. Educ.* **2011**, *88*, 1663. [Crossref]
64. Spinacé, M. A. S.; de Paoli, M. A.; *Quim. Nova* **2005**, *28*, 65. [Crossref]
65. Parshall, G. W.; *J. Mol. Catal.* **1978**, *4*, 243. [Crossref]
66. Vidossich, P.; Lledós, A.; *ChemTexts* **2017**, *3*, 17. [Crossref]
67. Liu, B.; Wang, Y.; Huang, N.; Lan, X.; Xie, Z.; Chen, J. G.; Wang, T.; *Chem* **2022**, *8*, 2630. [Crossref]
68. Sunley, G. J.; Watson, D. J.; *Catal. Today* **2000**, *58*, 293. [Crossref]
69. Muzart, J.; *Tetrahedron* **2021**, *87*, 132024. [Crossref]
70. Richter, B.; Deelman, B. J.; van Koten, G.; *J. Mol. Catal. A: Chem.* **1999**, *145*, 317. [Crossref]
71. Lakshminarayanan, A.; *Resonance* **2010**, *15*, 51. [Crossref]
72. Subramanian, N.; de Oliveira, S. F.; *Quim. Nova* **1997**, *20*, 313. [Crossref]
73. Frackowiak, D.; *J. Photochem. Photobiol., B* **1988**, *2*, 399. [Crossref]