

AS LIGAÇÕES QUÍMICAS PROPOSTAS POR LEWIS: UMA PERSPECTIVA EPISTEMOLÓGICA SOBRE A NATUREZA DESTE CONCEITO

Vitória S. da Silva^{a,*}, Fernanda K. D. da Silva^a, Jamily da S. dos Anjos^a, Alessandro Cury Soares^a e Bruno dos S. Pastoriza^a

^aCentro de Ciências Químicas, Farmacêuticas e de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, Campus Capão do Leão, 96160-000 Pelotas – RS, Brasil

Recebido: 23/07/2024; aceito: 27/01/2025; publicado online: 24/02/2025

THE CHEMICAL BONDS PROPOSED BY LEWIS: AN EPISTEMOLOGICAL VIEW OF THE NATURE OF THIS CONCEPT. The study problematizes choices and traditional organizations of the chemical content in chemistry classes. The problematization is developed through an epistemological perspective, situated in the field of Chemistry Education, focusing on the construction of the concept of Chemical Bonds. It includes discussions in the fields of history and epistemology, but mainly presents the conceptions that preceded the nature of the Chemical Bonds concept proposed by Gilbert Newton Lewis, aiding in the understanding of its nature. This facilitates the creation of strategies and methodological practices that contribute to the teaching and learning process. We conclude that this study has enabled us to construct a pathway to understand the existing knowledge of that time and what contributed to Lewis' proposal becoming the accepted theory by the scientific community of the time, persisting in Chemistry classes to this day.

Keywords: teaching; chemical bonds; epistemology.

INTRODUÇÃO

Na discussão sobre a fundamentalidade dos conceitos empregados na química, alguns deles são reiteradamente citados como os mais centrais. Sistematicamente aparecem as ideias de átomo, ligação química, forças intermoleculares, equilíbrio químico, entre outros, como as mais relevantes.^{1,2} Estas seriam ideias estruturadoras do pensamento químico.³ Com o objetivo de problematizar as escolhas e os modos de organizar o conhecimento em sala de aula, o presente texto se apresenta.

Desenvolvido a partir do foco em um desses conceitos centrais destacados pelos estudos, as Ligações Químicas (LQ),³ esse conceito será analisado a partir de uma perspectiva epistemológica, inspirada em Gaston Bachelard, com vistas a evidenciar processos, ideias e efeitos da construção desse conceito que têm potencialidade de serem integrados, revisitados e inseridos no contexto da ação docente em Química.

Ainda que relevantes as discussões sobre o enfoque histórico no campo do Ensino de Ciências, pela perspectiva deste trabalho a história é conduzida e permeada a partir da epistemologia.⁴ Isso implica em converter, conforme diz Bachelard,⁵ os fatos em ideias, que serão o campo profícuo da discussão epistemológica. Assim, conhecedores dos limites dessas aproximações e articulações, ao nos apropriarmos da epistemologia para problematizar a construção do conceito de LQ, desenvolvemos este texto em etapas. Primeiramente, apresentamos as relações histórico-epistemológicas que puderam ser mobilizadas por Lewis e outros sujeitos na composição do conceito de LQ. A segunda etapa traz um recorte nas produções de Lewis e sua contribuição na construção do conceito. Por fim, na terceira, apresentamos as considerações finais, nas quais traçamos relações entre o encadeamento de ideias de Lewis, suas teorizações e modelos produzidos e o Ensino de Química. Assim, após apresentar as articulações das ideias (perspectiva epistemológica), encaminhamos ao final do texto as articulações (didáticas) que entendemos poder

contribuir com a problematização das escolhas e dos modos tradicionais de organizar o conhecimento em sala de aula.

Nesta proposta, buscamos contribuir para uma discussão mais qualificada dos conceitos que são tomados como objetos de conhecimento no campo da Química e de seu Ensino, tanto em nível Médio quanto Superior. Ainda que nesses níveis seus objetivos educacionais sejam distintos, problematizar a gênese dos conhecimentos da ciência de referência – a química – implica em problematizar as suas bases a partir das quais organizam suas propostas. Assim, pela perspectiva adotada nesta pesquisa, é preciso reafirmar que aquilo que conhecemos hoje como conceito de LQ foi constituído por um processo histórico de produção de conhecimentos. Além disso, diferentes estudos, cujas abordagens variam entre o empirismo e o racionalismo epistemológico, transformam os fatos narrados pela história em ideias criadas, adaptadas, reconstruídas e trabalhadas pela ciência química.

Para dar conta do objetivo, este estudo fundamentou-se metodologicamente na análise documental. Foram examinados artigos, livros, panfletos e outros materiais. O corpus documental foi organizado em fontes primárias e fontes secundárias, com o intuito de construir uma “história epistemológica”. A análise das fontes secundárias buscou complementar e corroborar as discussões presentes nas fontes primárias.

É certo que a “ligação química” da ciência “pura e aplicada” da Química é distinta daquela “ligação química” tratada em ambientes de ensino e de aprendizagem. Contudo, mesmo distintas, apresentam relações, elementos, fatos e, principalmente, ideias que as conectam e que evidenciam que a produção dos conhecimentos escolares passa pela referência ao conhecimento produzido no campo da Ciência (inalcançável, inatingível e sumariamente diferente do campo escolar).⁶ Mesmo tendo sido proposto no início do século XX, percebemos que sua atualidade e relevância continuam presentes no contexto da química, cabendo a essa área problematizá-lo – e é a isso que nos propomos neste texto.

*e-mail: vitoriaschiavondasilva@gmail.com

Editor Associado responsável pelo artigo: Nyuara A. S. Mesquita

BREVE COMENTÁRIO SOBRE O ESTUDO EPISTEMOLÓGICO A PARTIR DE GASTON BACHELARD

Diante das diversas alternativas epistemológicas disponíveis para a escrita e discussão deste texto, optamos por nos embasar nas reflexões de Gaston Bachelard. Reconhecemos que, ao buscar compreender a construção de um conceito científico, é imprescindível superar a mera descrição dos fatos e adentrar o campo das ideias – e essa é uma proposição teórica desse autor no que tange ao trabalho da epistemologia. Nesse sentido, concordamos com a noção de que a história do desenvolvimento dos eventos deve ser acompanhada pela história do progresso dos valores racionais. Compreendemos que tais valores são moldados por um racionalismo abrangente, no qual a clareza das ideias e suas inter-relações desempenham um papel crucial na determinação de seu valor. Portanto, ao analisar a narrativa histórica, é essencial considerar não apenas os acontecimentos em si, mas também como esses eventos contribuíram para o avanço de outros conhecimentos. Assim, podemos compreender melhor as etapas evolutivas da verdade, partindo das convicções atuais para analisar retrospectivamente os caminhos percorridos em direção ao entendimento atual.

Bachelard⁵ enfatiza a necessidade de vincular a produção científica ao “novo espírito científico”, destacando que “o homem movido pelo espírito científico deseja saber, mas para, imediatamente, melhor questionar”. Não limitados a um conceito, compreendemos que utilizar a proposta bachelardiana como um elemento filosófico sobre a ciência implica em um modo de evidenciar a produção dos conhecimentos objeto de nosso estudo com fins de problematizar essa própria ciência. Isso é especialmente relevante quando consideramos que a Química, ao longo de sua história, tem sido moldada por indivíduos que ousaram duvidar das teorias existentes e, a partir dessas dúvidas, empreenderam estudos que contribuíram para os conhecimentos contemporâneos. Nessa perspectiva, a construção do conhecimento se dá através de rupturas, sendo uma das principais aquela entre senso comum e conhecimento científico,⁷ à visão unitária da realidade. Para Bachelard,

(...) será demasiado cômodo confiar-se uma vez mais a um realismo totalitário e unitário, e responder-nos: tudo é real, o elétron, o núcleo, o átomo, a molécula, a micela, o mineral, o planeta, o astro, a nebulosa. Em nosso ponto de vista, nem tudo é real da mesma maneira, a substância não tem, em todos os níveis, a mesma coerência; a existência não é uma função monótona; não pode se afirmar por toda parte e sempre no mesmo tom.⁸

A realidade de um objeto perceptível aos sentidos, tangível e com características físicas definidas não se equipara à realidade de uma molécula, a qual é tanto constituída como constituinte da teoria molecular subjacente. No entanto, é preciso ressaltar que essa distinção não implica em uma separação entre realidade e idealização. Quando discute sobre a constituição de moléculas, átomos e elétrons, embora não foque nas LQ em si, Bachelard^{7,8} permite evidenciar que esse conjunto de produções da Química não são meras concepções que utilizamos conforme os fatos o permitem, nem abstrações racionais utilizadas na formulação de teorias. Ao contrário, representam uma ordem de realidade distinta, que requer a aplicação da razão para ser compreendida.

A persistência do senso comum pode resultar no que Bachelard descreve como obstáculo epistemológico. Segundo Bachelard,⁵ estes obstáculos não estão relacionados a fatores externos, como a complexidade ou a transitoriedade dos fenômenos, nem se originam da fragilidade dos sentidos ou da mente humana. Em vez disso,

surgem intrinsecamente no próprio ato de conhecer, devido a lentidões e conflitos que emergem como resultado de um imperativo funcional. Bachelard identificou diversos destes obstáculos, tais como experiência primeira, conhecimento geral, verbal, animista, substancialista, conhecimento unitário e pragmático, que têm o potencial de obstruir o avanço do pensamento e retardar o progresso do conhecimento científico. Esses obstáculos serão abordados pelo professor, uma vez que, como citado brevemente por Bachelard, a noção de obstáculo epistemológico pode ser analisada tanto no desenvolvimento histórico do pensamento científico quanto na prática educacional.⁵ Portanto, é desejável que esses sejam identificados, permitindo ao professor desenvolver alternativas para superá-los e promover um avanço eficaz no processo de ensino e de aprendizagem.

Na construção do objeto de conhecimento nas ciências físicas, conhecido como o real científico, ocorre uma interação entre sujeito e objeto mediada pela técnica. A ciência não se limita à descrição, mas também à produção de fenômenos, sendo o instrumento mediador desses fenômenos resultado de um processo duplo, tanto instrumental quanto teórico. No entanto, é importante não interpretar essa relação como um subjetivismo absoluto. A influência do sujeito sobre o objeto é sempre mediada pela técnica, pelo aparato ou instrumento de medição utilizado. Não se trata de uma influência direta da psique individual do pesquisador sobre o objeto de estudo, que poderia gerar um relativismo sem controle. Portanto, para compreendermos a concepção de real nas ciências físicas, segundo Bachelard, é essencial ter uma clara compreensão do conceito de fenomenotécnica. É necessário considerar outros conceitos além dos visuais para desenvolver uma técnica de atuação científica no mundo e para criar fenômenos que não existem naturalmente na natureza através da fenomenotécnica. Somente ao desrealizar a experiência comum podemos alcançar um realismo na técnica científica.⁸

Uma boa competência na compreensão da ciência reside no domínio dos conceitos, na definição de teorias, na formulação de modelos e equações, na compreensão de suas relações sociais, materiais e até mesmo na análise de conceitos filosóficos. É nesse âmbito que este trabalho se insere. Reconhecemos que apenas os fatos em si são insuficientes; é na esfera das ideias, das inter-relações e discussões que se desenvolve um significado da ciência. Em linha com as reflexões de Bachelard, entendemos que a ciência não é uma mera coleção de observações, mas sim um processo contínuo de questionamento, revisão e construção de conhecimento. Através da análise crítica e do debate intelectual, é que se forjam os conceitos fundamentais, como o conceito de LQ. É assim que, neste trabalho, olharemos para um percurso histórico de fatos, mas de fatos selecionados por conta das ideias que trazem e que, em sua articulação, puderam constituir o que denominamos hoje como LQ. Embora nesta pesquisa consideremos a falácia do “retorno à origem”, podemos assumir que nos afiliamos a uma proposta que entende a “origem” como “um nascimento, como um começo, ao contrário do que fez a tradição metafísica que concebeu a origem como uma essência, como a verdade da coisa”.⁹ É por essa perspectiva que no processo de narrar fatos e ideias, o ponto de corte inicial é receptivo a variações, a possibilidades de alterações ou contestações. Todavia, como forma de legitimação, o ponto inicial escolhido se sustentará no exato momento em que permite, como condição de possibilidade, o encadeamento da série de ideias que a ele se associaram.

Bachelard compreende a construção do conhecimento científico como um processo que se afasta da simples descrição dos dados imediatos e sensíveis, evoluindo para uma forma cada vez mais abstrata, sem, contudo, desvincular-se da técnica. Para ele, a ciência não se limita à observação direta da realidade, mas está profundamente conectada ao desenvolvimento histórico e técnico da humanidade. Bachelard, assim, não busca definir a ciência, mas mostrar como os

conceitos científicos se produzem e se consolidam em diferentes momentos históricos, em resposta ao progresso da técnica e do pensamento racional. Por conta disso, na próxima seção buscaremos organizar as ideias que constituíram o entendimento científico das LQ propostas por Gilbert Lewis.

A SÉRIE DE FATOS QUE SE ORGANIZAM EM IDEIAS: DE UMA IDEIA DE MUNDO A UMA NOÇÃO DE LIGAÇÃO QUÍMICA

O processo de delimitação de uma “ligação” que é “química” remonta a momentos inaugurais daquilo que vai se constituindo como a própria “área da química”, com a produção de seus conceitos, seus procedimentos etc., que podem variar, neste estudo, entre os séculos XVII e XIX. Todavia, não é possível desconsiderar que uma área em constituição parte de elementos os quais já estariam mais consolidados, que seriam os possíveis sistemas de pensamento dominantes e, de meados do século XVII ao século XX, um desses sistemas era a física newtoniana. Os estudos de Isaac Newton foram, em grande medida, os construtores das ideias a partir das quais o próprio mundo passaria a ser pensado, seja ele grande e visível aos olhos, seja ele minúsculo e distante de nosso nível sensível.

Nos estudos de Newton emergiu a compreensão de que a matéria era formada por partículas denominadas corpúsculos, que exibiam forças de atração e repulsão. Naquele período, o foco da pesquisa estava voltado para a compreensão da natureza da matéria, e não para a compreensão da constituição das substâncias. Apesar de enfatizar a dinâmica física dos fenômenos, as alterações, transformações e composição da matéria não eram aprofundadas, sendo essa ênfase posteriormente abordada nos trabalhos de Lavoisier. Vale ressaltar que, naquela época, o próprio termo “ligação química” ainda não existia. Conforme expresso por Newton, uma compreensão inicial das interações químicas pode ser assim descrita:

Quando o sal de tártaro [carbonato de potássio, K_2CO_3] corre *per deliquium* [liquefaz-se], derramado na solução de qualquer metal, precipita este último e o faz cair no fundo do líquido na forma de lama, não prova isto que as partículas ácidas são atraídas mais fortemente pelo sal de tártaro do que pelo metal e, pela atração mais forte vão do metal para o sal de tártaro?¹⁰

Newton formula leis capazes de quantificar, de maneira matemática, as transformações que ocorriam no microcosmo. Ele buscava estabelecer paralelos com as leis que já havia proposto para o macrocosmo. Em Newton, observamos o auge do mecanicismo alcançado por meio de sua teoria da gravidade. O sucesso preditivo de suas leis de movimento o impulsiona a expandir sua aplicação além das dinâmicas planetárias, abrangendo diversos campos de estudo da física.

As articulações da criação do conceito de LQ demonstram possível influência dos estudos de Isaac Newton, mais especificamente a lei da gravitação universal, que é uma força fundamental de atração que age entre todos os objetos por causa de suas massas, e é proposta pela relação de quantidade de matéria de que são constituídos. A lei da gravitação universal diz que duas partículas quaisquer do Universo se atraem gravitacionalmente por meio de uma força que é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

$$\|\vec{F}\| = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Lei da gravitação de Newton

Deste modo, em 1785, Charles Augustin de Coulomb trouxe concepções parecidas com a lei da gravitação universal de Newton. Utilizando uma balança de torção, ele conseguiu quantificar a força elétrica (Figura 1).

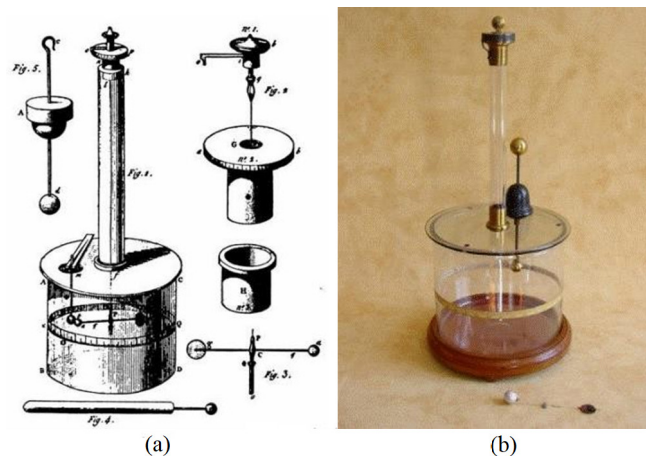


Figura 1. (a) Desenho esquemático da balança de torção de Charles Augustin de Coulomb¹¹ e (b) foto de protótipo real construído¹²

Por esses estudos foi possível a proposição da chamada lei de Coulomb, que colaborou no entendimento da interação elétrica entre cargas. De acordo com a Lei de Coulomb, a força de atração entre as partículas de cargas opostas é diretamente proporcional às suas cargas e inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre elas.

$$|F| = k_e \left| \frac{q_1 q_2}{r^2} \right| \quad (2)$$

Equação da Lei de Coulomb

Portanto, a lei de Coulomb (Equação 2) tem a mesma forma matemática da lei da gravitação universal (Equação 1) que descreve a atração entre duas massas, com a diferença de que a força elétrica pode ser atrativa ou repulsiva, enquanto a força gravitacional é sempre atrativa.¹³

Outro ponto que pode ser percebido entre os estudos de Coulomb e Newton diz respeito às partículas que constituem a matéria. Newton entendia essa constituição e associava às partículas as tendências de atração e repulsão, entretanto, o porquê de cada partícula possuir uma força de atração diferente não foi explicado, do mesmo modo como ele também não explica a seletividade da atração química entre elas. Já os estudos de Coulomb estabelecem que esta força de atração e repulsão entre as partículas que constituem a matéria possui relação com a carga elétrica. Assim, Coulomb forneceu uma explicação mais precisa e detalhada para esses fenômenos, superando as limitações do entendimento de Newton. Essa formulação permitiu uma análise mais rigorosa e previsível dos fenômenos elétricos, transformando a eletricidade em uma ciência baseada em princípios matemáticos, estabelecendo bases essenciais para a compreensão da matéria.

Próximo aos estudos de Coulomb, Antoine Lavoisier conduziu experimentos para demonstrar a conservação da massa durante reações químicas. Além disso, contribuiu significativamente para o futuro desenvolvimento da Lei das Proporções Definidas, investigando as proporções em que diferentes elementos reagem para formar compostos, essencial para o entendimento que se constrói as LQ. No ano de 1789, apresentou uma obra seminal intitulada “Tratado Elemental de Química”. Este livro não apenas foi assumido posteriormente como o marco do início da química moderna, mas também foi pioneiro ao estabelecer a teoria da conservação da massa,

lei das proporções definidas e desenvolver uma nomenclatura química sistemática. Lavoisier, contemporâneo de Coulomb, propõe algumas tabelas de afinidade, assumindo que de acordo com a temperatura a afinidade sofria alterações. No livro, o significado de afinidade e atração era dado como “uma ‘tendência para combinar’. As causas da afinidade permaneciam incompreendidas, mas as tabelas eram úteis principalmente no sentido de prever o resultado das reações”.¹⁴ Desse modo, nesse período a afinidade previa as reações, mas não as explicava.

A discussão sobre as tabelas de afinidade de Lavoisier e sua tentativa de explicar as causas da afinidade aponta para as limitações do conhecimento científico em sua época. Apesar dos avanços significativos proporcionados por Lavoisier, ainda havia áreas do conhecimento químico que permaneciam pouco compreendidas. Isso ressalta a natureza progressiva e iterativa da ciência, na qual novas propostas frequentemente levam a novas perguntas e áreas de investigação.

Nesse momento os pesquisadores entendiam o como da reação química, mas ainda não tinham condições de explicar o porquê. Até aqui se entende a combinação das partículas a partir da força eletrostática, ou seja, associando as partículas com cargas elétricas. As discussões teóricas giram em torno de uma questão que é a forma de contato entre as substâncias, misturas e combinações químicas, sendo a afinidade uma qualidade a ser “empregada”, mas não necessariamente “explicada”.

Com o conjunto da teoria corpuscular de Newton e os estudos a respeito da afinidade química, Dalton propõe alguns anos depois seu modelo atômico, ajudando a explicar as combinações químicas, quando busca justificar o contato entre os gases. Essa construção do modelo atômico de Dalton a partir do corpuscularismo newtoniano surge quando a ideia de Newton sobre o ar havia sido superada. A existência de um único fluido gasoso, o ar comum, já era entendida como limitada. Os estudiosos da época compreendiam que o ar poderia ser formado de vários tipos de ‘ares’. Foram necessários novos estudos que dessem conta de explicar essa nova teoria. O interesse de Dalton pelos fenômenos atmosféricos acabou por conduzi-lo a uma série de questões. Desse modo, conseguiu construir uma teoria atômica quantitativa mediante a utilização de dados procedentes de estudos sobre transformações químicas. Na obra significativa de Dalton, intitulada *Um Novo Sistema para a Filosofia Química*,¹⁵ a teoria atômica é apresentada em conjunto com uma citação de Lavoisier, evidenciando uma epistemologia característica da filosofia atômica.

Assim, “pode-se dizer que o pensamento newtoniano, e através dele o pensamento atomístico antigo, certamente inspirou Dalton quando este planejou seus experimentos sobre gases, dos quais emergiu, como consequência dedutiva, a teoria atômica”.¹⁶ A partir desse modelo atômico, mesmo que inicialmente tenha sofrido resistência, suas potencialidades puderam, com o tempo, evidenciar uma forma “possível [de] trabalhar quantitativamente os átomos, determinando suas massas e estabelecendo relações estequiométricas em bases sólidas, tirando a Química de seu estado eminentemente descritivo”.¹⁷

Antes da proposta de Dalton a Química se caracterizava por ter uma visão mais qualitativa para a explicação de “o quê” ocorria. Seus estudos resultaram na base conceitual do atomismo químico na relação entre as leis de combinações químicas, os pesos atômicos determinados e o esquema teórico proposto para explicá-los. Uma vez que a análise feita pelos cientistas sobre a união entre os átomos eram através dos sentidos, Dalton já demonstra em seus trabalhos detalhes que extrapolavam os sentidos, como por exemplo, desenhar as partículas em tamanhos diferentes, determinado o peso e modo de suas combinações – detalhes não comuns para a época.¹⁵

Uma discussão epistemológica influenciada pelo pensamento de Bachelard pode focar na ruptura com a visão qualitativa predominante na química anterior à proposta de Dalton e na valorização da experimentação e da construção de modelos teóricos. No contexto da química, a produção de propostas que enfatizavam uma virada da abordagem qualitativa para a quantitativa representada pelos estudos de Dalton é um exemplo claro dessa ruptura epistemológica. Seus experimentos e formulações teóricas basearam-se em medições quantitativas e análises rigorosas, contribuindo para uma compreensão mais precisa e sistemática das leis que regeriam as combinações químicas.

A construção da teoria atômica recebeu diversas contribuições de diferentes áreas, dentre elas a eletricidade. A partir desses estudos, o entendimento sobre a combinação entre dois átomos sofre uma grande mudança: até então, os cientistas da época acreditavam que as transformações químicas aconteciam devido à repulsão e atração entre os elementos de cargas opostas, seguindo os estudos de Coulomb. Contudo, com os estudos de Nicholson e Carlisle, assim como estudos anteriores de Alessandro Volta, que deram origem à pilha, ficou estabelecido que as forças elétricas eram capazes de formar reações químicas. Neste contexto, pôde-se imaginar que as forças da interação entre os átomos seriam de natureza elétrica, dando início aos estudos da eletroquímica, que alguns anos depois ajudam a Thomson na proposição do elétron.¹⁸

O modelo que elucidou de forma mais clara o comportamento elétrico de um átomo presumiu que determinados átomos eram naturalmente eletropositivos, enquanto outros eram eletronegativos. A atração entre eles foi postulada como explicação para a conhecida atração entre cargas diferentes em corpos grandes. Uma corrente elétrica separava um composto químico em seus elementos elementares constituintes, e uma célula elétrica gerava eletricidade mediante uma mudança química concomitante. A discussão exemplifica a importância da abertura à revisão de conceitos e teorias estabelecidas na construção do conhecimento científico. Pela perspectiva epistemológica, pode-se enfatizar a necessidade de uma postura crítica e inquisitiva em relação ao conhecimento existente, reconhecendo que o progresso científico muitas vezes requer uma quebra radical com ideias prévias.

Nesse sentido, buscando expandir as fronteiras do entendimento, em 1811, Berzelius desenvolveu uma teoria elétrica de atração mais sofisticada. Ele concebia cada átomo como composto por um ou mais polos elétricos, nos quais as cargas elétricas positivas e negativas residiam em partes opostas, semelhante aos polos de um ímã. A atração entre átomos decorria da neutralização das cargas elétricas opostas nos polos.¹⁸ Em 1881, Hermann von Helmholtz incentivou os químicos de sua época a revisitar as primeiras teorias de Berzelius, que propunham uma conexão direta entre as forças de atração e a eletricidade.

Avançando nessa linha de pensamento, o químico sueco, posteriormente laureado com o Nobel, Svante Arrhenius (1859-1927), argumentou em 1887 que seu experimento eletrolítico com soluções aquosas indicava que a força atrativa do átomo era de natureza elétrica. Arrhenius demonstrou que, em solução, as espécies químicas eletricamente ativas eram idênticas às espécies quimicamente ativas. Ele relacionou a atividade química e elétrica à presença de átomos carregados.

Apesar dos argumentos plausíveis de Arrhenius e Helmholtz, evidências conclusivas sobre o papel desempenhado pelas cargas elétricas na união dos átomos ainda estavam ausentes.¹⁸

Essa discussão ressalta a importância da cautela e da abertura à revisão de teorias estabelecidas na construção do conhecimento científico. Ainda que os argumentos de Arrhenius e Helmholtz fossem plausíveis com base em evidências disponíveis, elas não eram

conclusivas, demonstrando a necessidade de uma abordagem crítica e questionadora na interpretação dos dados experimentais.

Após alguns anos, havendo ainda uma necessidade de buscar modos de compreender com mais detalhes “como” se dá a formação dos compostos, surgem os estudos de Archibald Scott Couper, em 1850, propondo o termo ‘grau de afinidade’.¹⁴ Sendo uma propriedade inerente e comum aos elementos químicos, a proposição do grau de afinidade leva às pesquisas um modo a mais de justificar as fórmulas que até então eram construídas e, ainda, permite modificá-las no sentido de sua adequação.¹⁹

Nesse estágio, surge uma nova abordagem que promete lançar luz sobre a estrutura da matéria, proporcionando uma compreensão mais holística de seu funcionamento. Couper também foi o primeiro a adotar diagramas com traços para representar a chamada fórmula estrutural, ajudando na iniciativa das representações de como era a união entre os átomos formando as moléculas. Couper utilizou esta representação para demonstrar a união de átomos de carbono, destacando seu estudo das múltiplas valências do carbono. Sugeriu que cada valência do carbono fosse representada por um traço, dando origem à fórmula estrutural plana. Segundo de Andrade Neto *et al.*:²⁰

Couper introduz elementos representacionais que refletem o conceito de ligação, devido às suas experiências com situações-problema onde múltiplas valências poderiam ocorrer para o carbono. Assim, o conceito de composto químico incorporaria, portanto, o de ligação química (ou tipo de ligação química), permitindo a solução de uma gama maior de situações-problema que envolvia o conceito de valência. Mais uma vez, esta reconstrução representacional incorporava conceitos novos (ligação química) ao conceito de composto químico, bem como novos invariantes.²⁰

No desenvolvimento das ideias que permitiram construir o que chamamos hoje de LQ foram importantes os estudos de Frankland, Kekulé e Couper, uma vez que pelas discussões da época, centradas na questão da “união” dos compostos a partir de seu “grau de afinidade”, a noção de “valência” contribuiu para a compreensão de como a natureza organiza e transforma seus constituintes.

Kekulé e Couper, baseados no conceito de valência, buscam explicar a estrutura dos átomos, chamado na época de ‘fórmula constitucional’. Este período foi marcado por uma visão da importância de estudos voltados ao arranjo dos átomos. Em 1852, Frankland propôs que um átomo de um elemento possui uma capacidade específica para se combinar com átomos de outros elementos – uma valência precisa.²¹ Seis anos mais tarde, destacando o papel central da representação simbólica na construção e comunicação do conhecimento científico, de maneira independente, Kekulé e Couper introduziram a ideia de ligações de valência entre átomos, inclusive entre dois átomos de carbono, e indicaram que o carbono é quadrivalente. A introdução de diagramas e fórmulas estruturais permitiu aos cientistas visualizar e manipular as relações entre os átomos promovendo um pensamento abstrato e conceitual, facilitando o desenvolvimento de teorias mais abrangentes e precisas sobre a estrutura e propriedades dos compostos orgânicos.

Em 1861, Alexander Mikhailovich Butlerov introduz o termo ‘estrutura química’, e afirmou que a natureza Química da molécula é determinada não apenas pelo número e pelo tipo de átomos que a formam, mas também pela forma como esses átomos estão ligados uns aos outros.²¹ Percebe-se a partir daqui uma mudança no nível epistemológico relacionado à formação das moléculas. Se antes o foco estava nas quantidades, relações ponderais e na matemática, agora os estudos estavam direcionados ao entendimento da estrutura, de como era a localização entre os átomos no espaço. Butlerov notou

a importância de estudar a influência dos átomos em uma molécula, tanto conectados diretamente quanto por meio de outros átomos. Deste modo, para ele as moléculas não são estáticas, e seus átomos estão em movimento contínuo. Butlerov sugeriu que as propriedades de um composto estavam relacionadas à sua estrutura molecular e refletem a maneira pela qual os átomos estão ligados uns aos outros nas moléculas do composto.²²

Até este momento podemos resumir as concepções sobre a união entre os átomos em três etapas: a primeira delas se faz quando começaram os primeiros estudos que entendiam as aproximações químicas através de forças de atração e repulsão; a segunda entenderá que essa força de atração e repulsão terá relações com as cargas elétricas; e a última etapa é quando a noção de valência começa a ser utilizada para explicar a formação das substâncias.

Sendo assim, Alfred Werner, a partir de seus estudos e levando em consideração as informações de estudos anteriores, por volta de 1893, com o artigo intitulado “Contribuição para a constituição de compostos inorgânicos” estabeleceu pela primeira vez alguns conceitos como número de coordenação, valência primária e secundária.²³ Werner percebeu que alguns números de coordenação tinham certa regularidade, como os números seis, nos complexos de cobalto(III), e quatro, como nos complexos de platina(II). Desse modo, Werner usava o método da contagem de isômeros com os compostos orgânicos propondo as possíveis geometrias espaciais. Para isso, imaginava um átomo central ligado a seis grupos que estavam arranjados ao seu redor. Werner propôs que, no caso de um número de coordenação seis, as geometrias espaciais possíveis eram a hexagonal plana, a prismática trigonal e a octaédrica, representadas a partir da fórmula geral MA_4B_2 (Figura 2).

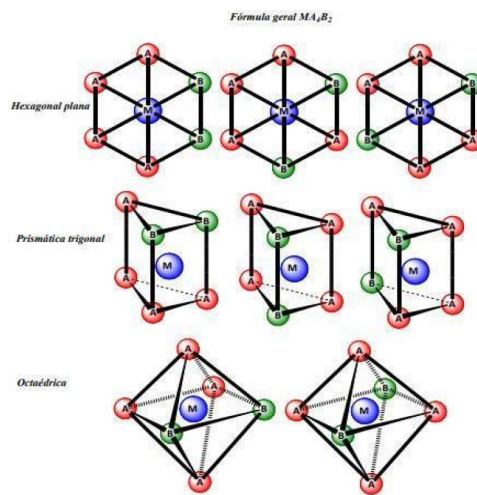


Figura 2. Representação gráfica dos isômeros geométricos previstos por Werner²⁴

Com base nas suas investigações empíricas, Werner concluiu que o número de isômeros previstos e que foram observados na prática correspondia à geometria octaédrica.²⁴ A respeito da teoria da coordenação, segundo Lewis:

A maioria dos casos de valência superior a quatro são encontrados nos complexos formados por sais metálicos. Um dos maiores serviços prestados por Werner constituiu na classificação e elucidação de tais complexos. Ele mostrou que um átomo, como o átomo de cromo, ou cobalto, está no centro de uma zona de coordenação na qual um certo número de radicais está ligado ao átomo central, e esse número é chamado de número de coordenação.²⁴

Werner amplia as discussões realizadas no trabalho anterior a respeito dos conceitos de número de coordenação, valência primária e secundária a partir de seus estudos nos complexos aminocobálticos. Santos *et al.*²⁵ apontam que:

Werner propôs que a valência primária representava o número de íons responsáveis por estabilizar e neutralizar a carga do centro metálico. Este tipo de valência era não direcional, teria caráter fortemente iônico e representaria o que hoje conhecemos como estado de oxidação do metal. O segundo tipo de valência representava o número de coordenação do metal, possuía direcionalidade geométrica e era responsável por conferir os contornos espaciais (a forma tridimensional) do complexo, e hoje é conhecida como esfera de coordenação do metal.²⁵

Werner supôs que, em complexos como $\text{CoCl}_3 \cdot 3\text{NH}_3$, o íon Co^{3+} ficaria no centro de um octaedro, com as moléculas de NH_3 (chamadas de ligantes) localizadas em três dos seis vértices, ligadas ao átomo central através das suas valências secundárias, constituindo o íon complexo hoje formulado como $[\text{Co}(\text{NH}_3)_3\text{Cl}_3]^{3+}$. Ainda segundo Werner, os três cloretos se ligariam ao cobalto através das respectivas valências primárias deste íon. Segundo Toma:²⁶

O primeiro passo que seria dado por Werner, para comprovar sua hipótese, foi distinguir entre os ânions ligantes que estão dentro ou fora da esfera de coordenação. Para isso, Werner fez uso das medidas de condutividade de forma criativa, construindo um quadro sistemático, no qual reuniu os dados de complexos correlatos de amina e nitrito de cobalto(III), e também de amina e cloreto de platina(IV), formando séries estequiométricas com variações bem definidas [...] O segundo passo a ser dado por Werner seria investigar a identidade e as características da esfera interna de coordenação, ou seja, do próprio complexo. Para isso, Werner voltou-se para a estereoquímica e, felizmente, nessa tarefa, os complexos de cobalto ajudaram bastante, pelas suas características favoráveis, como estabilidade, inércia, solubilidade, cristalinidade e cromaticidade. Nesses estudos ficou claro sua enorme capacidade de percepção espacial, incluindo a facilidade de lidar com os elementos de simetria das moléculas [...] Para avançar nessa direção, Werner decidiu examinar os derivados desse composto, obtidos pela perda de uma ou mais amônias, por meio de aquecimento térmico controlado [...] O aquecimento prolongado do complexo *purpúreo* levava à formação de um complexo de fórmula $\text{Co}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_3$, cuja medida de condutividade era coerente com $[\text{Co}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]\text{Cl}$. Entretanto, Werner observou que esse composto admitia duas formas distintas, coloração verde (praseo) ou violeta (vióleo). A existência dessas duas formas foi atribuída ao fenômeno de isomeria geométrica, relacionado ao fato de os ligantes ocuparem posições não equivalentes na esfera de coordenação. No caso da estereoquímica octaédrica existem apenas duas possibilidades, representadas pelos isômeros, *cis* e *trans*.²⁶

Werner tornou relevantes as discussões, no que se refere à teoria da coordenação, para o entendimento que temos atualmente sobre os complexos de coordenação, assim como para a construção de teorias sobre as LQ nesses compostos. Por volta do ano de 1890 Werner apresenta uma dissertação intitulada “Contribuições para a teoria de afinidade e valência” onde apresenta uma representação do átomo, mais especificamente o átomo de carbono (Figura 3):

Deixe que a esfera representada na fig. 1 represente um átomo de carbono e os pontos a, b, c e d representam as localizações de valência dos quatro átomos diferentes na molécula Cabcd. Como geralmente se supõe, estes átomos executarão certos movimentos periódicos, provavelmente no caminho das seções cônicas, em torno da localização de valência, movimentos que podem ser diminuídos ou aumentados por diversas influências. Todos os movimentos periódicos na esfera atômica, qualquer que seja, podem ser referidos a oscilações periódicas, em forma de pêndulo, ao redor do local da valência. Das muitas formas possíveis de oscilação, vamos selecionar uma das mais simples: os átomos cujos locais de valência são a, b, c, d podem oscilar em dois planos perpendiculares um ao outro, isto é, na direção das setas da Fig. 1. Pela introdução de calor ou por alguma outra influência externa, essas oscilações podem ser aumentadas.²⁷

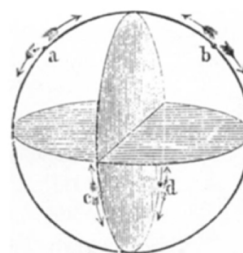


Figura 3. Representação de Alfred Werner dos átomos de carbono²⁷

Em resumo, o desenvolvimento da teoria da coordenação na química inorgânica, exemplificado pelas contribuições de Alfred Werner, representa um marco significativo na evolução do conhecimento científico. Por meio de metódicos estudos experimentais e análises teóricas inovadoras, Werner introduziu conceitos fundamentais, como o número de coordenação e as valências primária e secundária, que revolucionaram nossa compreensão dos complexos de coordenação. Sua abordagem pioneira incluiu a utilização criativa de métodos experimentais, como medidas de condutividade, e a proposição de modelos explicativos visualmente representativos, como os diagramas de isômeros geométricos. Ao promover uma ruptura epistemológica com concepções existentes até então e adotar uma postura crítica e questionadora, Werner abriu caminho para uma nova era na química inorgânica, destacando a importância da experimentação rigorosa, da visualização conceitual e da comunicação eficaz na construção do conhecimento científico.

Se, por um lado, o estudo dos complexos e suas cargas e características possibilitou uma discussão a respeito dos elementos espaciais, foi com Joseph John Thomson, mais especificamente no ano de 1897, que emergiu uma proposição que auxiliaria a explicar o “porquê” tais cargas poderia ocorrer. Em suas pesquisas sobre a condutividade elétrica de gases rarefeitos surgiu a ideia de que os átomos não eram, como anteriormente acreditados, indivisíveis. Em vez disso, continham partículas de eletricidade extremamente leves. Essas partículas subatômicas, mais tarde chamadas de elétrons, eram removíveis e transportavam uma carga negativa. No início do século XX, tornou-se cada vez mais claro que todos os átomos continham um ou mais elétrons idênticos, carregados negativamente, e que o elétron, devido à sua pequena massa, movia-se facilmente de um átomo para outro. O modelo atômico de Thomson ajudava a entender a combinação entre os elementos, suas propriedades periódicas e a natureza da interação elétrica da matéria. Como consequência, foi possível afirmar que “[...] com o elétron, a explicação científica ultrapassou o realismo, por assim dizer, no sentido de ter assimilado o real ao racional”.²⁸

O modelo atômico proposto por Thomson representou uma ruptura significativa com as concepções anteriores sobre a estrutura dos átomos, demonstrando a necessidade de revisão das teorias científicas existentes. A proposição dos elétrons desafiou a visão tradicional de átomos como entidades indivisíveis, levando a uma reconstrução do conhecimento científico sobre a composição da matéria. Nesse sentido, a assimilação do elétron como uma entidade subatômica fundamental exemplifica a capacidade da ciência de transcender o empirismo e incorporar conceitos abstratos para explicar fenômenos observáveis – e as ideias de Lewis se utilizarão centralmente dessa “novidade”.

Há a evidência do papel dinâmico da ciência na construção do conhecimento, destacando a importância da imaginação científica e da ruptura com paradigmas estabelecidos, quando se evidenciam transições de processos e abordagens realistas e empiristas para uma mais racional, que tanto Thomson implicará, quanto Lewis se utilizará.

Dos estudos até aqui analisados, é possível observar elementos em comum e algumas construções efetivamente novas. Por exemplo, anteriormente à proposta estrutural de Butlerov, Couper e Kekulé, as discussões eram sistematizadas a partir da questão de uma análise de um mundo sensível e muito herdeiro das discussões de Lavoisier. A partir das discussões desse trio temos uma significativa modificação da discussão: não mais a relação quantitativa, ou melhor, não “apenas” essa relação quantitativa, mas agora uma proposição posicional, que localiza as entidades atômicas (partículas simples) em determinada região do espaço. Todavia, até aqui, o que evidenciamos é uma determinação “do que há”, e não necessariamente da produção de uma discussão suficientemente elaborada sobre “como ocorre o processo de produção do que há”. Será na constituição de um modelo baseado em dados diretos, indiretos e em muita abstração, que se avançará para além de uma proposta que somente “prevê” a ocorrência de uma reação, mas que “explicará” como essa reação ocorre a partir das (relativamente) novas entidades criadas pela imaginação humana. Aqui entrará Lewis e seu grupo. A partir dele, será possível evidenciar dois grandes saltos: um no sentido explicativo e outro no sentido integrativo. O explicativo, conforme dito, avançará no modo de compreender o processo. O integrativo será resultado de seu momento histórico de quem vivencia e propõe um modelo ainda pautado num paradigma newtoniano e, na sequência, ao expandir e analisar seus limites a partir de uma nova construção denominada “quântica”, busca possíveis integrações entre esses mundos.

ALGUMAS CONTRIBUIÇÕES DE LEWIS: PONTOS DE DESTAQUE NA ANÁLISE DAS LIGAÇÕES QUÍMICAS

No início do século XX, quando Lewis iniciou o desenvolvimento de seu modelo de compartilhamento de pares de elétrons, a maioria dos cientistas já havia aceito a estrutura atomística da matéria e a natureza eletrônica das forças entre átomos. Lewis tentou “reconciliar as teorias concorrentes da ligação química e, em uma época em que a maioria dos químicos pertencia a uma escola ou outra, o ecletismo de Lewis era distinto”.²⁹ As teorias pelas quais Lewis foi considerado como reconciliador podem ser caracterizadas pelos estudos de Werner, defendendo que a “transferência de carga era um fenômeno puramente secundário, não uma característica fundamental da LQ”.³⁰ Ao mesmo tempo, pesquisadores como Thomson e Abegg discutiam a favor da ligação de valência, que corresponde à transferência de elétrons.

Assim Lewis une a química, que era organizada em dois ramos, inorgânica e orgânica, através dos tipos de LQ, chamando de “combinações químicas” polar e não polar, em suas palavras iniciais. Introduziu as discussões a respeito desses dois tipos de ligação e para isso era importante definições de termos e explicações mais claras

de teorias. De seus vários escritos, um deles pode ser considerado como o primeiro de um grupo de três artigos em que Lewis tratou da ideia de LQ. Publicado em 1913, esse primeiro texto é importante porque serve como uma introdução, que trilhou a caminhada para que fosse possível a publicação dos outros dois artigos, de 1916 e 1923, nos quais a teoria de Lewis sobre as LQ é apresentada de uma forma mais clara.

Portanto, as considerações que Lewis fez a respeito de sua própria teoria a tornaram relevante, assumindo que a ligação que existe entre dois átomos é sempre associada ao par de elétrons. Ele explica de forma clara a ligação não polar, na qual os elétrons são compartilhados por dois átomos de forma igualitária; quando isso não acontece, e de alguma forma os elétrons são deslocados para um átomo apenas, deixando de ser compartilhado igualmente, esta molécula forma polos negativo e positivo, enquanto no compartilhamento perfeito de elétrons a molécula não possui polos, uma vez que os elétrons são igualmente compartilhados.

A análise das propriedades e comportamentos das moléculas em função da distribuição dos elétrons reflete um esforço para compreender os fenômenos químicos de forma mais precisa e sistemática. A busca por uma compreensão mais profunda das interações entre átomos e moléculas, evidenciada pelo estudo das polaridades moleculares, ilustra o constante processo de revisão e refinamento das teorias científicas, conforme descrito por Bachelard⁵ como sendo um passo importante para o avanço do conhecimento científico.

A compreensão a respeito da combinação entre os átomos associa-se à Lei das proporções múltiplas de Dalton,³⁰ ou seja, essa ideia torna possível articular os pesos atômicos e os estudos sobre as combinações químicas. Essa definição de Dalton surge em consonância com a teoria atômica. Nos entendimentos de Lewis, os estudos sobre a Lei das proporções múltiplas é um passo importante para a compreensão da época sobre a valência, uma vez que depois dos estudos de Dalton uma especulação filosófica se transformou em fundamentação científica, tornando possível falar sobre os átomos e as moléculas.²³ Lewis aborda em sua discussão um ponto chave quando assume que, “aparentemente, devemos reconhecer a existência de dois tipos de combinação química que diferem, não apenas em grau, mas em tipo. Para ilustrar os dois tipos, podemos escolher um sal como o cloreto de potássio e um hidrocarboneto de parafina como o metano. O primeiro tipo pode ser chamado polar, o segundo não polar”.³¹ Por último define um terceiro tipo de ligação, o metálico: “No primeiro tipo, os elétrons ocupam posições fixas dentro do átomo. No segundo tipo, os elétrons se movem livremente de átomo para átomo dentro da molécula. No terceiro tipo, ou metálico, o elétron é livre para se mover mesmo fora da molécula”.³²

Lewis traz para suas discussões um princípio claramente eletrônico, referindo-se ao elétron como o “átomo da eletricidade”. É fundamental observar que a gênese de suas discussões articula propriedades das substâncias com teorizações. Nesse sentido, a discussão desse “átomo de eletricidade” é, por exemplo, trazida em termos das propriedades analisadas, como a constante dielétrica (passível de medição e de comparação no nível macroscópico de seus experimentos).³²

Lewis delineia as características conferidas às substâncias químicas por meio dessas interações; seus fundamentos estão intimamente relacionados aos conceitos eletrônicos, com destaque para o elétron, que é descrito como “o átomo da eletricidade”, e aos princípios estruturais subjacentes. Partindo exclusivamente de suas observações no campo da química, Lewis demonstra uma perspicácia ao inferir que uma ligação química pode ser conceituada como o compartilhamento de um par de elétrons, estabelecendo uma conexão entre seu modelo proposto e os princípios fundamentais da eletrostática clássica, aplicáveis a elétrons estacionários.

Podemos observar a dinâmica de ruptura e reconstrução epistemológica na abordagem de Lewis.⁵ Ao introduzir novos conceitos e categorias para classificar compostos químicos e ao integrar observações empíricas com teorizações abstratas, demonstra um movimento em direção a uma outra visão do mundo químico. Assim, nesse contexto, Lewis inicia a introdução de importantes pontos de discussão sobre o compartilhamento de elétrons. Partindo da lei de valência e contra-valência de Abegg, ele desenvolve o conceito do modelo do par compartilhado, também conhecido como teoria do átomo cúbico, para explorar a natureza das distintas propriedades entre esses compostos.

Deste modo, Lewis explica que “a nova teoria da valência inclui como um caso especial a transferência completa de elétrons de um átomo para o outro”.²⁴ Neste sentido, apresenta características das substâncias polares e não polares, afirmando que esta classificação poderia ser explicada somente a partir dos conhecimentos químicos, mas que o ideal seria explicar sua classificação a partir de uma teoria da estrutura atômica. Sendo assim, o autor começa a direcionar as discussões para o que foi chamado de “teoria do átomo cúbico”, que colabora para a compreensão de sua proposta, uma vez que apresenta um modelo atômico pensado para as LQ.

O átomo de Lewis era cúbico, estático, simplificado e sem equações matemáticas (Figura 4), apresentado em seu artigo, no qual os elétrons de valência de um átomo se distribuem pelos vértices de um cubo, variando de 0 a 8.

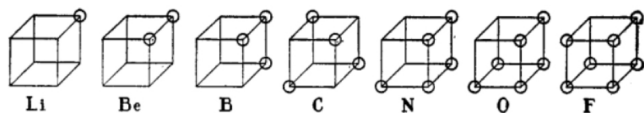


Figura 4. Modelo do átomo cúbico³¹

Na época, as contribuições de Lewis foram cruciais para os químicos entenderem melhor a formação dos compostos. Seu modelo atômico, baseado nas propostas de Thomson, se “distinguiu” do modelo proposto por Bohr, que surgiu mais tarde e foi amplamente aceito pela comunidade científica. Enquanto Bohr se concentrava nas órbitas eletrônicas, Lewis enfatizava as camadas eletrônicas e assumia a estática do átomo. Ele acreditava que, assim como as moléculas tinham uma estrutura rígida, os elétrons também compartilhavam dessa característica. No entanto, essa perspectiva foi revisada por Lewis em seu artigo de 1923, onde ele sugeriu que a teoria atômica de Bohr e sua própria teoria poderiam se complementar. Lewis argumentou que, embora a densidade do elétron na molécula fosse estática quando considerada como uma onda, ao ser tratada como uma partícula, o elétron poderia desenvolver movimento rápido.

Analisando de modo geral as regras estabelecidas por Lewis sobre a estrutura do átomo e a presença dos elétrons, é possível perceber alguns pontos que ajudam a entender a proposta que estava sendo apresentada, tendo Lewis feito isso por meio de seis regras para o átomo cúbico. Na primeira apresenta a existência de um núcleo que se mantém inalterado, lembrando a proposta de Thomson referente ao modelo atômico, sendo aqui esse “núcleo” entendido como toda a região de carga positiva do átomo e todas as demais camadas de elétrons que não fossem a mais externa. As primeiras regras de Lewis estabelecem a regra dos oito. Cabe destacar que o que Lewis denominou como a “regra dos oito” foi posteriormente renomeado por Langmuir como a “regra do octeto”, um termo que permanece em uso até os dias atuais, mesmo com suas tensões quando de sua proposição.³² Em seus postulados, “Lewis faz uma dissecação eficaz do átomo, foca na parte importante da camada de valência e estabelece a regra do octeto como um limite superior para mudança eletrônica”.³³ Nas últimas regras ele explica que, ainda que os elétrons

consigam trocar de posição na camada de valência, eles são mantidos em posição por estruturas rígidas, limitações que são causadas pela natureza do átomo e dos átomos a ele ligados. Ainda, por último, nega a validade da Lei de Coulomb no contexto das pequenas distâncias do átomo, presumindo que os elétrons emparelhados não se repelem. Sendo assim, existe uma distância de equilíbrio no qual os átomos permaneceriam em uma “linha que une os dois centros” e a partir desta distância exata, deste equilíbrio encontrado, ocorre a LQ.³¹

Lewis dedicou uma parte de suas discussões às moléculas que possuem mais de quatro pares de elétrons. Ele observou que, em moléculas como PCl_5 , SF_6 e UF_6 , o fato de existirem tão poucos compostos desse tipo, e somente quando os elementos altamente negativos cloro e flúor estão presentes, levou-o a sugerir que a regra do oito pode ser aplicada a essas substâncias de forma restrita. Lewis propôs que os átomos têm várias camadas, mas são relevantes à LQ uma primeira e uma segunda camada, e que os átomos altamente eletronegativos interagem com os pares de elétrons da segunda camada de outros átomos.

Lewis propõe a ligação simples e dupla entre os átomos, o compartilhamento de uma aresta representava uma ligação simples, mas se os átomos compartilhassem uma face pela fusão de dois cubos, aí haveria uma ligação dupla e quatro elétrons compartilhados (Figura 5).

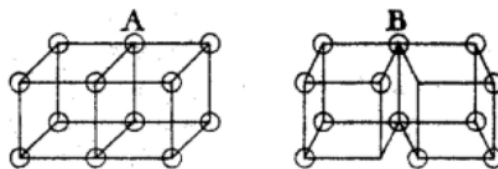


Figura 5. Representação de uma ligação dupla³¹

Sua proposta da “teoria do átomo cúbico” exemplifica como um modelo atômico simplificado é desenvolvido para explicar as LQ, que até então não seriam explicadas suficientemente pelos modelos vigentes.

A proposta das LQ apresentada por Lewis surge em um período em que a química orgânica e inorgânica se estruturavam com bases diferentes, e por esse motivo havia na época uma discussão entre os cientistas. As substâncias poderiam ser organizadas em três classes: os compostos inorgânicos se baseavam nos estudos de Berzelius que entendia a atração entre os átomos para formar as moléculas a partir de forças eletrostáticas. Os compostos orgânicos não obedeciam a teoria de Berzelius, mas seguiam os estudos de Kekulé e Couper entre outros, que explicavam as substâncias a partir do átomo de carbono “que teria suas valências dirigidas para os vértices de um tetraedro e as ligações simples, dupla e tripla se davam pela união do tetraedro através dos vértices, arestas ou faces, respectivamente”. E os compostos complexos que se caracterizavam pela associação dos compostos dos outros dois grupos, baseavam-se nos estudos de Werner, sobre a teoria de coordenação.³⁴

Além desses estudos, quando Lewis apresenta suas concepções sobre as ligações entre os átomos, a química já havia construído significativamente sua compreensão da constituição da matéria, incluindo a aceitação do átomo proposto por Dalton e do elétron proposto por Thomson. Portanto, ao examinarmos os três artigos de Lewis, podemos observar a integração desses estudos, juntamente com outros, na formulação de sua teoria. O reconhecimento das partículas atômicas, o ressurgimento do atomismo e sua consolidação, bem como a investigação sobre a composição da matéria, representam importantes marcos na produção da ciência como um todo, e também desempenham um papel fundamental na construção do conceito de LQ abordado neste trabalho.

CONSIDERAÇÕES E ARTICULAÇÕES

Os estudos apresentados e discutidos neste trabalho são relevantes não apenas como fatos, mas principalmente pela importância das ideias para entender as LQ. Em vez de seguir uma ordem cronológica ou apresentar exaustivamente todos os estudos que precederam e iniciaram o caminho para a compreensão das LQ por Lewis, nosso objetivo foi apontar um caminho possível e provável de ideias e estudos que fundamentam o conceito ainda ensinado no Ensino Médio e Superior.

Ao longo deste trabalho, destacamos como diferentes hipóteses e descrições experimentais contribuíram para a evolução do entendimento das LQ. Através da análise de modelos heurísticos propostos pelos químicos, demonstramos como essas ideias foram refinadas com o tempo, guiadas pela intuição e pela experiência, até se tornarem ferramentas robustas para a síntese de novos compostos e o planejamento de experimentos.

Além disso, enfatizamos a importância de considerar o contexto histórico e científico em que esses modelos foram desenvolvidos. Antes da formulação das leis da teoria quântica, os químicos já manipulavam o mundo material de maneiras inovadoras, utilizando uma espécie de “rede neural” de resultados experimentais que informavam e aprimoravam os modelos de ligação. Essa abordagem empírica e incremental pavimentou o caminho para as teorias modernas, destacando a natureza colaborativa do progresso científico.

Dessa forma, este trabalho não apenas revisita a trajetória histórica do desenvolvimento das ideias sobre LQ, mas também oferece uma reflexão sobre como essas ideias continuam a influenciar o ensino e a prática da química hoje. Isso possibilita aos estudantes compreender a natureza da ciência e seu processo de produção, permitindo aos professores discutir em sala de aula não apenas o conceito final, mas também a trajetória de sua construção. Ao mapear um possível percurso de ideias e estudos fundamentais, esperamos proporcionar à comunidade que compõe a área do Ensino de Química uma compreensão mais profunda do processo científico e das bases conceituais que sustentam a química contemporânea, reforçando a importância de ensinar esses conceitos de maneira que reflitam seu desenvolvimento histórico e experimental.

Embora já existam estudos que abordam a formação do conceito de ligação química em artigos científicos, teses e dissertações,^{18,34-38} as questões específicas tratadas neste trabalho ainda não foram exploradas pela literatura. Este estudo se diferencia ao construir um percurso que foca, não nos fatos históricos, mas nas ideias que surgiram em diferentes textos originais, fundamentado na epistemologia histórica de Gaston Bachelard. Essa abordagem permitiu uma análise aprofundada do desenvolvimento do conceito de ligação química, com uma atenção voltada às suas implicações no ensino contemporâneo.

Assim, revisita-se o conceito de ligação química a partir de uma perspectiva atual, o que oferece novas oportunidades para discutir o contexto da área e repensar o Ensino de Química. Embora a epistemologia bachelardiana não se ocupe diretamente da didática, ela oferece uma base teórica importante para as discussões históricas e epistemológicas aqui apresentadas. Mesmo que essas questões já tenham sido tratadas em algumas pesquisas, elas ainda não foram integradas ao Ensino de Química de maneira tão detalhada e contextualizada como neste trabalho. Neste contexto, recomenda-se a leitura do artigo de Lewis de 1916 para enriquecer as discussões sobre o conceito de LQ em sala de aula. Explorar um material histórico e original do pesquisador que propôs o conceito oferece tanto aos alunos quanto ao professor acesso a uma fonte frequentemente negligenciada no contexto educacional como já apontado na literatura.^{3,4} Isso rompe com o padrão de ensino repetitivo e, por vezes,

limitado, uma vez que os materiais didáticos passam por processos de adaptação antes de chegarem aos estudantes e aos professores. Por outro lado, a utilização de um texto histórico possibilita o início do processo educativo diretamente com a fonte primária, o que amplia as oportunidades para discussões mais profundas, conexões mais ricas e uma compreensão mais completa do conceito tratado em sala de aula. Isso ocorre ao mesmo tempo em que se superam possíveis obstáculos na aprendizagem dos estudantes, que podem surgir devido aos processos de adaptação didática resultantes da utilização frequente de fontes secundárias como referência para a discussão do conceito.

Neste sentido, Gaston Bachelard, filósofo da ciência, oferece uma perspectiva valiosa sobre a formação de conceitos científicos, enfatizando que o progresso científico não ocorre de maneira linear, mas através de rupturas epistemológicas e avanços que desafiam e superam paradigmas estabelecidos. Ao desenvolver essa visão ao ensino das LQ, podemos enriquecer a pedagogia da química, incentivando uma abordagem que reconheça e valorize o desenvolvimento histórico dos conceitos científicos.

Bachelard argumenta que o conhecimento científico se desenvolve através de uma série de “saltos” que rompem com o pensamento anterior, um processo que ele descreve como a substituição de um “obstáculo epistemológico” por uma nova compreensão. Ao ensinar a teoria de LQ de Lewis, é crucial contextualizar esse desenvolvimento dentro da trajetória histórica da química, mostrando como essa ideia emergiu de um contexto de desafios e inovações. Isso não só proporciona aos estudantes uma compreensão mais profunda e crítica da química, mas também os prepara para futuros avanços científicos, promovendo um pensamento flexível e inovador.

O conceito de LQ proposto por Gilbert Lewis, introduzido no início do século XX, marcou uma revolução no campo da química. Antes de Lewis, a compreensão das interações entre átomos não tinha uma explicação sistematizada e capaz de fazer previsões suficientes. Ao propor a ideia de que as LQ são formadas por pares de elétrons compartilhados entre átomos, Lewis forneceu uma explicação clara e intuitiva para a formação de moléculas. Este conceito facilitou a compreensão de inúmeras reações químicas e fenômenos moleculares, permitindo que os químicos previssem e explicassem comportamentos químicos com uma precisão até então inédita.

Além de esclarecer a formação das ligações covalentes, o modelo de Lewis também estabeleceu a base para o desenvolvimento de teorias mais avançadas, como a teoria dos orbitais moleculares e a teoria da ligação de valência. A simplicidade do modelo de Lewis tornou-o uma ferramenta pedagógica poderosa, que ainda hoje é amplamente utilizada no Ensino de Química, desde o nível básico até o avançado. Assim, o legado de Gilbert Lewis transcende sua época, continuando a influenciar e moldar a educação e a pesquisa em química.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio às pesquisas.

REFERÊNCIAS

1. Talanquer, V.; *J. Chem. Educ.* **2015**, 92, 3. [Crossref]
2. Taber, K.; *The Nature of the Chemical Concept: Reconstructing Chemical Knowledge in Teaching and Learning*, 3rd ed.; Royal Society of Chemistry: London, 2019.
3. Lima, M. E. C. C.; Barboza, L. C.; *Quim. Nova Esc.* **2005**, 21, 39. [Link] acessado em Fevereiro 2025
4. Moura, C. B.; *Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática* **2021**, 4, 1155. [Crossref]

5. Bachelard, G.; *A Formação do Espírito Científico: Contribuição para uma Psicanálise*, 1ª ed.; Contraponto: Rio de Janeiro, 1996.
6. Pastoriza, B.; Loguercio, R.; Mazzotti, T.; *Acta Scientiae* **2014**, *16*, 153. [Link] acessado em Fevereiro 2025
7. Bachelard, G.; *O Racionalismo Aplicado*, 1ª ed.; Zahar Editores: Rio de Janeiro, 1977.
8. Bachelard, G.; *A Filosofia do Não*, 1ª ed.; Abril Cultural: São Paulo, 1978.
9. Mota, T.; *Intuitio* **2008**, *1*, 308. [Link] acessado em Fevereiro 2025
10. Newton, I.; *Óptica*, 1ª ed.; Editura Academiei: Bucarest, 1970.
11. Beléndez, A.; *Revista Brasileira de Ensino de Física* **2008**, *30*, 2601. [Crossref]
12. A Eletricidade e a Lei de Coulomb: Resumo de Física Enem, <https://blogdoenem.com.br/eletricidade-e-a-lei-de-coulomb/>, acessado em Fevereiro 2025.
13. Villate, J. E.; *Eletricidade, Magnetismo e Circuitos*, 2ª ed.; Lightning Source Inc.: Porto, Portugal, 2015.
14. Justi, R. S.; *Quim. Nova Esc.* **1998**, *7*, 26. [Link] acessado em Fevereiro 2025
15. Dalton, J.; *A New System of Chemical Philosophy*, vol. 1, 1ª ed.; Cambridge University Press: London, 1808.
16. Maar, J. H.; *História da Química - Segunda Parte: De Lavoisier ao Sistema Periodico*, 2ª ed.; Papa-Livros: Florianópolis, 2011.
17. Filgueiras, C. A. L.; *Quim. Nova* **2016**, *39*, 1262. [Crossref]
18. Bezerra, A. S.; da Silva, R. R.; *Educación Química* **2001**, *12*, 179. [Crossref]
19. Larder, D. F.; *Ambix* **1971**, *18*, 26. [Crossref]
20. de Andrade Neto, A. S.; Raupp, D.; Moreira, M. A.; *Anais do VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*; Florianópolis, Brasil, 2009. [Link] acessado em Fevereiro 2025
21. Camel, T. O.; Koehler, C. B. G.; Filgueiras, C. A. L.; *Quim. Nova* **2009**, *32*, 543. [Crossref]
22. Pauling, L.; *Science* **1956**, *123*, 255. [Crossref]
23. de Farias, R. F.; *Quim. Nova Esc.* **2001**, *13*, 29. [Link] acessado em Fevereiro 2025
24. Lewis, G. N.; *Faraday Soc.* **1923**, *19*, 458. [Link] accessed in February 2025
25. Santos, L. M.; Sarto, L. E.; Bozza, G. F.; de Almeida, E. T.; *Rev. Virtual Quim.* **2014**, *6*, 1260. [Crossref]
26. Toma, H. E.; *Quim. Nova* **2014**, *37*, 574. [Crossref]
27. Werner, A.; Kauffman, G. B.; *Chymia* **1967**, *12*, 189. [Crossref]
28. Bachelard, G.; *O Pluralismo Coerente da Química Moderna*, 1ª ed.; Contraponto: São Paulo, 2009.
29. Kohler, R. E.; *The British Journal for the History of Science* **1975**, *8*, 233. [Crossref]
30. Filgueiras, C. A.; *Quim. Nova Esc.* **2004**, *20*, 38. [Link] acessado em Fevereiro 2025
31. Lewis, G. N.; *J. Am. Chem. Soc.* **1916**, *38*, 762. [Crossref]
32. Lewis, G. N.; *J. Am. Chem. Soc.* **1913**, *35*, 1448. [Crossref]
33. Shaik, S.; *J. Comput. Chem.* **2007**, *28*, 51. [Crossref]
34. Davanzo, C. U.; Chagas, A. P.; *Quim. Nova* **1993**, *16*, 152. [Link] acessado em Fevereiro 2025
35. Pazinato, M. S.; *Ligações Químicas: Investigação da Construção do Conhecimento no Ensino Médio*; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2016. [Link] acessado em Fevereiro 2025
36. Pinto, C. B.; *Ligações Químicas em Complexos de Metais de Transição: Estrutura e Densidade Eletrônica em Cristais*; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2022. [Link] acessado em Fevereiro 2025
37. Paralovo, J. L.; *Um Novo Olhar sobre as Ligações Químicas*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil, 2020. [Link] acessado em Fevereiro 2025
38. da Silva, J. C. O.; *Problemas de Aprendizagem sobre Ligações Químicas para Estudantes de Graduação*; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2010. [Link] acessado em Fevereiro 2025