

A construção coletiva da ligação química por químicos: um estudo sobre a emergência de um fato científico

The collective construction of the chemical bond by chemists: a study on the emergence of a scientific fact

Isis Lidiane Norato de Souza | Universidade Federal do Paraná

souzaisis182@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9461-370X>

Joanez Aparecida Aires | Universidade Federal do Paraná

joanez.ufpr@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-2925-0826>

RESUMO Este estudo teve como objetivo analisar quais foram os estilos de pensamento que permearam a percepção orientada de Linus Pauling, Gilbert Lewis, Irving Langmuir, Richard Abegg, Walther Kossel, enquanto construíam o conceito da ligação química. Para análise de dados foi usada a epistemologia de Fleck. A ligação química fundamentada como um par de elétrons compartilhado foi um processo de construção do coletivo e estilo de pensamento de químicos, que tiveram conflitos ora entre si, ora entre coletivos de pensamentos próximos, como os físicos. Houve também trabalho cooperativo entre os químicos, o que fortaleceu a teoria da ligação de valência (tlv) e o não reducionismo da química à física.

Palavras-chave história da química – ligação química – epistemologia da ciência – Ludwik Fleck (1896-1961).

ABSTRACT This study aimed to analyze the thought styles that permeated the guided perception of Linus Pauling, Gilbert Lewis, Irving Langmuir, Richard Abegg, Walther Kossel, while they were building the concept of chemical bond. Fleck's epistemology was used for data analysis. The chemical bond based on a shared electron pair was a construction process that involved the collective and the thinking style of chemists, who had conflicts sometimes among themselves, sometimes between nearly collectives of thoughts, such as physicists. There was also cooperative work among chemists, which strengthened the valence bond theory (VBT) and the non-reductionism of chemistry to physics.

Keywords history of chemistry – chemical bond – epistemology of science – Ludwik Fleck (1896-1961).

Introdução

Neste artigo é apresentado um estudo sobre a história da construção do conhecimento relacionado à natureza da ligação química.¹ O objetivo é analisar quais foram os estilos de pensamento que permearam a percepção orientada dos químicos Linus Pauling, Gilbert Lewis, Irving Langmuir, Richard Abegg, Walther Kossel etc., enquanto construíram o entendimento sobre a estrutura da ligação química.

Para a compreensão de como ocorreu a construção do conhecimento sobre a ligação química foi utilizada a epistemologia de Fleck. A razão desta escolha consiste no fato que uma das principais características desta epistemologia diz respeito ao caráter sociológico do pensamento; como exemplo, a ciência é construída a partir de um trabalho coletivo e não individualmente. Na perspectiva fleckiana, existe um terceiro fator que permeia o sujeito (pesquisador) e o objeto de pesquisa (a ser conhecido), a saber: o estado do conhecimento. O "estilo de pensar" traduz o significado deste estado, o qual norteia a percepção dos cientistas e está intrínseco no coletivo de pensamento.

De acordo com Condé (2012), o médico e microbiologista Ludwik Fleck (1896-1961) foi pioneiro na abordagem da historicidade da ciência ao analisar como surgiu o conceito da sífilis a partir de um estudo de caso na história da medicina, ao qual chamou de fato científico. Por meio do estudo da emergência deste fato, Fleck realizou uma série de análises dos aspectos históricos, sociais e epistemológicos que podem ser ampliados para o estudo de outros fatos na ciência, uma vez que sua interpretação se dá sobre a construção do conhecimento científico. Nesse sentido, conforme Condé (2017), este médico estabeleceu um modelo epistemológico do funcionamento da ciência, trazendo a ideia de que o resultado final do conhecimento científico possui influência do contexto social e do percurso histórico.

O processo do conhecimento na epistemologia fleckiana não é individual, mas é resultado da atividade social. Assim, Fleck (2010 [1935], p. 82) define o coletivo de pensamento como:

a comunidade das pessoas que trocam pensamentos ou se encontram numa situação de influência recíproca de pensamentos, temos, em cada uma dessas pessoas, um portador do desenvolvimento histórico de uma área de pensamento, de um determinado estado do saber e da cultura, ou seja, de um estilo específico de pensamento (destaque no original).

Nesse sentido, o coletivo de pensamento pode ser instantâneo e se dissolver quando as pessoas deixarem de compartilhar suas ideias, ou pode ser duradouro como é o caso de instituições de pesquisas, sociedades científicas, grupos de pesquisas. Nestes casos, Schäfer e Schnelle (2010) interpretam que a ciência em Fleck é uma atividade organizada pelas comunidades de pesquisadores, as quais constituem os "coletivos de pensamento", identificados como o conjunto de normas, regras e práticas destinadas a explicar um fenômeno. Os círculos esotéricos (de especialistas) possuem uma das posições que constituem os trânsitos simultaneamente epistemológicos, sociais e comunicacionais, que compõem, mantêm ou transformam os estilos de pensamento.

1 Termo utilizado por Linus Pauling ao se referir às ligações químicas, comumente escrito na documentação por ele deixada.

O estilo de pensamento é para Fleck (2010 [1935], p. 149) como regras para o pensamento. Na atmosfera do estilo ocorrem dois lados inseparáveis: a disposição para o sentir seletivo e o agir direcionado. Estes podem ser traduzidos como formas de expressão que serão usadas na religião, na ciência, na arte, nos costumes, de acordo com os meios coletivos correspondentes. Nesse sentido, "*podemos, portanto, definir o estilo de pensamento como percepção direcionada em conjunção com o processamento correspondente no plano mental e objetivo*" (p.149; destaque no original). Fleck explica ainda que o estilo de pensamento é composto por características comuns dos problemas que interessam a um coletivo de pensamento. Dele fazem parte também os julgamentos e os métodos utilizados nos meios de conhecimento.

Condé (2017) contribui com o entendimento de que o estilo de pensamento é, para a sua comunidade científica, como a capacidade de perceber os problemas e articular soluções para resolvê-los, tendo como base os valores e as práticas do sistema de referência em que está constituído determinado estilo de pensamento.

De acordo com Condé (2018), o "estilo de pensamento" se constitui em um longo contexto histórico de transformações. Todavia, quando há a adesão do sujeito a um novo estilo de pensamento, algum traço do estilo antigo sempre permanece na sua concepção. Sendo assim, essas mudanças lentas e gradativas são vistas por Fleck (2010 [1935]) como mutações no estilo de pensamento, em sentido de evolução, e não como revoluções científicas de perspectiva kuhniana, que provocam mudança de paradigma com ruptura abrupta no modo de pensar (Kuhn, 2011).

Em suma, para Fleck (2010 [1935]) as mudanças e transformações ocorrem de modo mais gradativo, no sentido evolucionário. Por isto, Condé (2005) esclarece que o percurso histórico na obra fleckiana se faz tão necessário na compreensão do processo de construção do conhecimento.

A comunicação em trânsito para Fleck (2010 [1935]) nunca acontece sem transformação, pois há sempre uma modificação conforme o estilo. Por exemplo, no tráfego intracoletivo de ideias ocorre o fortalecimento das opiniões e no tráfego intercoletivo de ideias há uma mudança fundamental. Fleck nos conta ainda que a principal ideia no tráfego intercoletivo de pensamento, o significado epistemológico mais importante, é a alteração no estilo de pensamento, o que ocasionará alteração na disposição à percepção direcionada, possibilitando a criação de novos fatos.

[...] qualquer tráfego intercoletivo de pensamentos traz consigo um deslocamento ou uma alteração dos valores de pensamento. Do mesmo modo que a atmosfera (*Stimmung*) comum dentro do coletivo de pensamento leva a um fortalecimento dos valores de pensamento, a mudança de atmosfera durante a migração intercoletiva provoca uma mudança desses valores em toda sua escala de possibilidades: da pequena mudança matizada, passando pela mudança completa do sentido até a aniquilação de qualquer sentido (Fleck, 2010 [1935], p. 161).

No tráfego intracoletivo de ideias ocorre o fortalecimento das formações de pensamento, como visto anteriormente. Este acontece porque ocorre a confiança nos iniciados, a dependência por parte destes da opinião pública, a solidariedade intelectual dos pares, os quais são forças sociais que proporcionam formações de pensamentos e adequação ao estilo. Como exemplo, quando há uma relação de subordinação mental, como de um aluno para um professor, ou

numa relação entre elite e multidão. Nesse caso, há a confiança de um lado e a necessidade de dependência da opinião pública do outro. Compreende-se que ocorre um sentimento de solidariedade de pensamento, o que produz uma ideia recíproca entre os indivíduos.

Ademais, Fleck (2010, [1935] p. 144; destaque no original) considera o fato científico como *"primeiro um sinal de resistência no pensamento inicial caótico, depois uma certa coerção de pensamento e, finalmente uma forma (Gestalt) a ser percebida de maneira imediata"*. É uma construção que depende do percurso histórico e da cosmovisão de determinado grupo em seu contexto científico e histórico. Em Fleck, o fato científico está relacionado ao estilo de pensamento. Por estes motivos, Pfuetzenreiter (2002) afirma que a epistemologia fleckiana possui um posicionamento crítico em relação ao empirismo lógico, que enxergava o fato científico como algo fixo, permanente e independente da opinião subjetiva do cientista.

Caminhos da pesquisa

Esta pesquisa possui abordagem qualitativa, com objetivos exploratórios e explicativos. Conforme Severino (2007), estes objetivos, além de registrar e analisar os fenômenos estudados, buscam identificar suas causas por meio da interpretação pelos métodos qualitativos. Trata-se de uma pesquisa em história da ciência, específica para a linha educação, história, filosofia e sociologia da ciência (HFSC). O tipo de pesquisa é documental, com utilização de fontes primárias e secundárias. As análises dessas fontes, tais como videoaulas, áudios, manuscritos, correspondências e artigos científicos clássicos etc., foram realizadas por meio de análise epistemológica de Ludwik Fleck.²

As fontes primárias utilizadas neste estudo estão apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1: Fontes primárias analisadas

Código	Material consultado	Descrição de fontes primárias
A1	Áudio	"A short autobiography." 1977. (1'57"). ["Uma breve autobiografia" tradução nossa]
A2	Áudio	"Chemists develop their methods." 1977. (4'48"). ["Os químicos desenvolvem seus métodos" tradução nossa]
A3	Áudio	"Research by G.N. Lewis." 1983. (1'). ["Sobre a pesquisa de G.N. Lewis" tradução nossa]
A4	Áudio	"Research by Irving Langmuir." 1983. (2' 30"). ["Sobre a pesquisa de Irving Langmuir" tradução nossa]
0 V1	Vídeo	"Valence and molecular structure: Lecture 1, Part 1." 1957. (5'35"). ["Valência e estrutura molecular: lição 1, parte 1" tradução nossa]
V2	Vídeo	"Lecture 1. Part 2" 1957. (5'47"). [Lição 1, parte 2]
V3	Vídeo	"Lecture 1. Part 3" 1957. (5'55'). [Lição 1, parte 3]

2 A escolha por Fleck se deve aos crescentes estudos de sua epistemologia na área de ensino de ciências. Lorenzetti, Muenchen, Slongo (2013, 2018) mencionam que Fleck vem ganhando espaço nos estudos referentes às mudanças do estilo de pensamento. Utiliza-se também este conceito para identificação ou formação de estilos de pensamento em campos científicos. Há esforços para utilização desta epistemologia para a formação de professores e adequação de suas práticas pedagógicas. Os primeiros estudos sobre a epistemologia de Fleck nesta área iniciaram-se com Delizoicov et al. (2002) ao afirmar que este referencial pode investigar problemas no ensino de ciências.

Código	Material consultado	Descrição de fontes primárias
V4	Vídeo	"Lecture 1. Part 4" 1957. (6'05"). [Lição 1, parte 4]
V5	Vídeo	"Lecture 1. Part 5" 1957. (6'53"). [Lição 1, parte 5]
C1	Correspondência	Letter from Linus Pauling to Arnold Sommerfeld. 1925. [Carta de L. Pauling para A. Sommerfeld, tradução nossa]
C2	Correspondência	Letter from Linus Pauling to the Research Fellowship Board of the National Research Council. 1925 [Carta de Linus Pauling para órgãos de fomento à pesquisa, tradução nossa]
C3	Correspondência	Letter from Linus Pauling to A. A. Noyes. 1926
C4	Correspondência	Letter from L. Pauling and Ava Helen to A. A. Noyes. 1926
C5	Correspondência	Letter from Linus Pauling to A. A. Noyes. 1926
C6	Correspondência	Letter from Linus Pauling to G.N. Lewis. 1928.
C7	Correspondência	Letter from G.N. Lewis to Linus Pauling. 1928.
C8	Correspondência	Letter from Linus Pauling to G.N. Lewis. 1929.
C9	Correspondência	Letter from G.N. Lewis to Linus Pauling. 1929.
C10	Correspondência	'Letter from G.N. Lewis to Linus Pauling. 1930.
M1	Manuscrito	"The development of the hemicalf the hemical bond." 1983. ["O desenvolvimento da concepção da ligação química", tradução nossa]
P1	Artigo científico	LEWIS, G. N. "The atom and molecule". 1916. ["O átomo e a molécula", tradução nossa]
P2	Artigo científico	PAULING, L. "The shared-electron hemical bond". 1928. ["A ligação química do par de elétron compartilhado", tradução nossa]
P3	Artigo científico	PAULING, L. "The nature of the hemical bond." 1992. ["A natureza da ligação química", tradução nossa]
L1	Livro científico	LEWIS, G.N. <i>Valence and the structure of atoms and molecules</i> . 1923. [<i>Valência e a estrutura de átomos e moléculas</i> , tradução nossa]

Fonte: Elaborado pelas autoras com base em fontes primárias consultadas por meio do sítio eletrônico da Oregon State University (OSU Libraries, s.d.).

Para análise das fontes primárias foram utilizadas categorias da epistemologia de Ludwik Fleck (1896-1961), de acordo com a obra *Gênese e desenvolvimento de um fato científico* (Fleck, 2010 [1935]), as quais estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2: Categorias de análises da epistemologia de Fleck (2010)

Categorias	Interpretação – Como compreendemos cada categoria
Coletivo de pensamento	Em relação à ciência, o coletivo de pensamento pode ser institucionalizado, como por exemplo a comunidade científica ou grupos de pesquisa. Este conceito pode ser compreendido como o conjunto de regras, valores, normas, conduta, princípios, os quais permeiam os estilos específicos de pensamento.
Estilo de pensamento	É uma percepção direcionada, modo <i>Gestalt</i> de observar um objeto, fato, fenômeno. É uma forma particular de perceber o objeto a ser conhecido. Representa o estado do conhecimento de um coletivo de pensamento e é um pensamento coercitivo ao sujeito.
Mutações de estilo de pensamento	Representa as transformações ou mudanças que ocorrem no estilo de pensamento. Fleck percebe o conhecimento de maneira análoga à ideia de evolução biológica, que ocorre naturalmente, de maneira lenta e gradativa.
Círculo esotérico	Círculo de especialistas de determinada área, que possuem a mesma linguagem, o mesmo modo de se entender. Circula neste o saber especializado.

Categorias	Interpretação – Como compreendemos cada categoria
Tráfego intracoletivo de ideias	Comunicação ou circulação de pensamento que ocorre no interior de um coletivo de pensamento, assegurando a extensão do estilo de pensamento, pressupõem-se o fortalecimento de ideias e a formação de novos membros do grupo.
Tráfego intercoletivo de ideias	Circulação de pensamento que ocorre entre dois ou mais coletivos de pensamento, contribuindo com a transformação do estilo de pensamento. Pressupõem-se mudança fundamental (a mudança envolvida pode ser pequena ou ocorrer de forma completa).
Harmonia das ilusões	Tradição científica enraizada no estilo de pensar que impede o(a) pesquisador(a) de perceber um novo <i>estilo de pensamento</i> ou a emergência de um <i>fato científico</i> .
Protoideia	São ideias mais ou menos vagas que circulam entre coletivos de pensamento até se tornarem cada vez mais ricas em conteúdo científico. Fleck usou como exemplo na sua obra o sangue sífilítico, pois esta protoideia circulou pelo saber popular até ganhar espaço na cultura científica. Na química, Fleck usou o exemplo da ideia de átomo dos filósofos gregos como protoideia do conceito de átomo atual.

Fonte: Elaborado pelas autoras com base em Fleck (2010 [1935]).

A pesquisa bibliográfica foi utilizada para mapear as contribuições historiográficas. Para as fontes secundárias foi usada a ferramenta “*current bibliography*” da revista *Isis*, especializada em história da ciência. Os termos de busca usados foram: “Linus Pauling” e “*Chemical bond*”. Nesta busca foram encontrados 11 resultados, sendo: cinco artigos, uma entrevista com Linus Pauling, duas teses, dois capítulos de livros e um livro. Dos itens de busca, o livro correspondeu a uma biografia, *Linus Pauling: scientist and peacemaker* [cientista e pacificador], referindo-se ao seu ativismo político na época da Guerra Fria (Mead e Hager, 2001). Os dois capítulos de livros corresponderam aos estudos de Pauling relacionados ao DNA, no final de sua carreira. As duas teses são referentes às pesquisas de Martha L. Harris (2007) e Ana Simões (2008), autoras de dois dos cinco artigos pesquisados.

As fontes secundárias foram utilizadas como mapeamento do contexto coletivo de Linus Pauling e seus contemporâneos, debates entre a teoria da ligação de valência e a teoria do orbital molecular, além da formação do estilo de pensamento em torno da ligação química. Artigos de fontes secundárias nacionais também foram utilizados, além de livros técnico-científicos relacionados à temática desta pesquisa. Todas as fontes secundárias receberam tratamento de análise por epistemologia de Fleck (2010 [1935]), tal como as fontes primárias, descrita no Quadro 2.

O contexto coletivo de Linus Pauling

Quais foram os coletivos de pensamento dos quais Linus Pauling participou?

Em 1917, conforme Hager (1998), Pauling lecionava química no laboratório da universidade, ainda na graduação e, enquanto folheava os livros na estante do laboratório, teve contato com um artigo de Lewis, de 1916. Após leitura, Pauling ficou surpreso com a existência da ligação química que mantinha os átomos unidos. Ao refletir sobre o conteúdo daquele artigo, Linus Pauling decidiu ser químico e estudar sobre a ligação química e a estrutura das moléculas. Nesse sentido, foi o trabalho de Lewis que o inspirou, inicialmente, a dedicar sua vida à química. Além do artigo de Lewis, Pauling também se inspirou em artigos de Irving Langmuir, de 1919. Como declarado por Pauling:

Eu fiquei interessando na questão da natureza da ligação química depois de ter lido o artigo de 1916 sobre o par de elétrons compartilhados, por G. N. Lewis, e os vários artigos de 1919 e 1920, de Irving Langmuir, sobre esse assunto (OSU Libraries, s.d., p. 5; tradução nossa).

Numa análise fleckiana, Pauling estava sendo iniciado naquele coletivo de pensamento, compreendendo o estilo de pensamento sobre a ligação química, fundamentada como um par de elétrons compartilhados. O interesse de pesquisa deste químico, consoante White (1980), era compreender como os átomos são unidos dentro da ligação, a que distância estão um do outro nesta ligação e muitos outros detalhes a respeito do átomo.

Compreendemos que Pauling participou de dois coletivos de pensamento enquanto pesquisador de ciência naturais. Um relacionado à sua formação em química, com influências dos químicos Arthur A. Noyes, Roscoe Dickinson, Gilbert Lewis e Irving Langmuir no seu país de origem (EUA). E outro relacionado à física teórica, em especial à teoria quântica, marcante para a ciência do século XX, desenvolvida na Europa. Conforme o website de Oregon State University Libraries (OSU Libraries, s.d.), Pauling considerava que a química atômica e molecular exigia esse conhecimento da nova física, pois a teoria quântica, por meio de uma matemática avançada, poderia compor novos modos de pensar para a teoria da ligação, podendo proporcionar, inclusive, o desenvolvimento da química quântica.

Segundo Harris (2007), os métodos físicos da mecânica quântica, espectroscopia e cristalografia, haviam proporcionado aos químicos uma compreensão mais apurada do tamanho da estrutura de átomos e moléculas. Além disso, ainda de acordo com Harris (2007), Pauling considerou o conceito de ressonância inovador, o qual poderia complementar e ampliar o 'estilo' do conhecimento químico.

Segundo Filgueiras (2016), Lewis e Noyes (professores de Pauling) trabalharam juntos no Massachusetts Institute of Technology (MIT) em 1905, ambos se conheciam. De acordo com Harris (2007), Lewis desenvolveu sua ideia sobre valência nos anos iniciais de sua carreira, especialmente no grupo de pesquisa progressiva no MIT. Lewis mudou-se em 1912, quando se tornou chefe do departamento de química da Universidade da Califórnia. Como conhecia as ideias de Lewis, provavelmente Noyes compartilhava o mesmo coletivo e estilo de pensamento e viu em Pauling potencial para o desenvolvimento de sua pesquisa.

Pauling recebeu o seu título de doutor sob a orientação de Roscoe Dickinson, primeiro doutor em química do California Institute of Technology, que literalmente o pegou pela mão e lhe ensinou cristalografia. Arthur Amos Noyes foi recrutado do MIT para dirigir o Gates Chemical Laboratory exatamente 3 anos antes do ingresso de Pauling como estudante na recente [e] energizada Caltech (Greenberg, 2009, p. 335).

Com a oportunidade de apoio para estudar na Europa, Linus Pauling conheceu a dimensão matemática da teoria quântica. Esta experiência de participar das discussões da nova física o ajudou a reestruturar a química e investigar sobre as ligações químicas, o que contribuiu para uma nova compreensão, tanto da estrutura como do comportamento de toda a matéria (OSU Libraries, s.d.). Dessa maneira, com base em Fleck (2010 [1935]), depreende-se que Linus Pauling estava formalizando o estilo de pensamento e um novo estado de conhecimento químico estava sendo produzido, uma vez que se construía uma explicação detalhada sobre as estruturas das moléculas, tendo como base a nova teoria atômica.

Conforme OSU Libraries (s.d.), Pauling conversou pessoalmente com vários pesquisadores durante sua permanência no Instituto de Física Teórica na Universidade de Munique, entre 1926 e 1927. A ciência que aprendera em Munique, Copenhague e Zurique foi a nova abordagem da teoria quântica, que compartilhou com Niels Bohr (do modelo atômico e da controvérsia com Einstein), Erwin Schrödinger (da equação da onda), Werner Heisenberg (do princípio da incerteza) e Wolfgang Pauli (do princípio da exclusão). Dessa maneira, podemos perceber a influência entre coletivos de pensamento, pois Pauling considerava que o tratamento dado aos átomos, moléculas e íons deveria receber um olhar químico por meio da química molecular e estrutural, e não apenas físico, com equações de onda, porém sem explicações sobre a estrutura das ligações propriamente. Tornava-se possível, desse modo, as trocas de pensamentos e as influências recíprocas, visto que o processo de conhecimento não é um processo individual, mas sim uma atividade social.

Para White (1980), era muito interessante conhecer o círculo de cientistas daquela época, bem como discutir novas ideias sobre os átomos e moléculas. Uma das novas ideias envolvia a mecânica quântica, definida como uma teoria matemática para explicar o movimento de elétrons dentro dos átomos e moléculas, responsáveis pela formação da ligação química.

Para Nye (2015), Pauling (1901-1994) viveu quase todo o século XX, e a química era o centro da sua vida. Como a química é uma ciência de fronteira, Pauling se movia de uma área para outra, ou seja, nas interfaces entre química e física e entre a química e a biologia. Buscava sempre algo novo, novas tendências na ciência. Dessa forma, trabalhou com cristalografia de raio-X, mecânica estatística, mecânica quântica, difração de elétrons, estudos termodinâmicos de moléculas, a química da vida e biologia molecular, imunologia, estudos estruturais dos metais etc. No entanto, nunca esqueceu os problemas de pesquisa relacionados à ligação química.

Segundo Maksic e Orville-Thomas (1999), nenhum outro cientista fez tantas contribuições em ramos diferentes da química e disciplinas de fronteira como Linus Pauling. Além disso, a ligação química é uma das três bases mais importantes da química clássica, junto com a noção de átomos e a estrutura molecular. Esta última reflete uma infinidade de propriedades das moléculas armazenadas em seus parâmetros estruturais, tamanho, forma e simetria. Pauling foi o pioneiro da química quântica na era pré-computacional, o que significa, em termos fleckianos, que este químico introduziu ideias para posteriores transformações no estilo de pensamento. Ajudando, dessa forma, a química contemporânea a formalizar uma nova teoria científica, a saber: a teoria da ligação de valência (TLV).

Vemos dois momentos em que houve um tráfego intracoletivo de ideias no contexto coletivo de Pauling. O primeiro foi quando o químico ingressou na universidade e estava aprendendo as concepções daquele coletivo de pensamento, como ao conhecer a teoria da ligação. O segundo momento é quando Pauling viaja a Europa e troca pensamentos com os físicos que estudavam a teoria quântica, em alta no início do século XX.

A noção de valência como protoideia da ligação química

A química, no início do século XIX, foi marcada pelos estudos dos produtos naturais. Segundo Nogueira e Porto (2019a), o conceito de valência foi desenvolvido porque havia a necessidade de síntese e caracterização de compostos orgânicos, requisitos da indústria farmacêutica, em

alta na Alemanha. Encontramos nesse caso, um fator externalista que influenciou a pesquisa científica acerca da noção de valência devido à necessidade de representação estrutural dos compostos.

De acordo com Araujo Neto (2007), trabalharam com a noção de valência na pesquisa em química orgânica Justus Liebig (1803-1873), Friedrich Wöhler (1800-1882), Jean Dumas (1800-1884) e August Laurent (1808-1853). Além desses nomes, destacou-se a pesquisa de Edward Frankland (1825-1899), responsável pela identificação das combinações dos metais com radicais orgânicos.

Em meados do século XIX, conforme Nogueira e Porto (2019a), cresceram os estudos sobre a atomicidade, compreendida na época como uma afinidade entre dois elementos. Destacaram-se nesse período os trabalhos de Friedrich August Kekulé (1829-1896), Alexander Butlerov (1828-1886), Frankland, Archibald Couper (1831-1892), Alfred Werner (1866-1919), entre outros. Muitos outros nomes também participaram dessa construção, caracterizada como uma contribuição de muitos autores.

Da epistemologia fleckiana identificamos o caráter coletivo da pesquisa científica, com apresentação de vários nomes que trabalharam para compreensão da noção de valência, além de uma história evolutiva em torno deste conceito. Houve ideias mais ou menos confusas, até que se consolidasse o conceito de valência. Alguns conceitos sobre a noção de valência sofreram embates entre cientistas, em outros casos concordância, até que se formulasse um entendimento mais científico, característico de uma 'protoideia'. A evolução do conceito de valência, segundo Nogueira e Porto (2019b) esteve relacionada ao estudo da ligação química, periodicidade e estrutura química.

O conceito de valência era relacionado com uma capacidade de 'força' ou poder de combinação. As bases de pesquisa eram especialmente empíricas, com fórmulas experimentais. No século XIX, não se conhecia a existência do elétron e se seguia a explicação da valência pela hipótese atômica de Dalton, na qual o átomo seria a menor partícula da matéria. Existia ainda a controvérsia científica de atomistas *versus* antiatomistas.

No início do século XX, após o reconhecimento da comunidade científica sobre a existência do elétron e consequente comprovação experimental do átomo, a valência ganhou espaço nas explicações de como os átomos se uniam, por meio da teoria do par de elétrons compartilhados de Gilbert Lewis (1875-1946) e da teoria atômica de Thomson. Ou seja, o elétron estava relacionado à valência e, posteriormente, à ligação química. As concepções sobre valência passaram por dois estilos de pensamento neste período. Um antes da existência do elétron e outro após este, com a comprovação do átomo. Nesse sentido, Lewis formulou explicações para a valência tendo como base o estilo de pensamento que dava relevância para a presença do elétron, com base na teoria atômica de Thomson.

Formação do estilo de pensamento sobre a ligação do par de elétrons compartilhados

De acordo com Filgueiras (2016), Lewis propôs a primeira teoria de ligação química, a qual agrupava todos os tipos de ligação em um único conceito. Nesse sentido, Lewis pensava de

maneira ampla sobre como e por que os átomos se ligam para formar os compostos, possibilitando discussões para um novo estilo de pensamento na área da química.

A teoria da ligação proposta por Lewis foi fundamentada sobre o conceito de par de elétrons. Lewis antecipou ainda, segundo Filgueiras (2016), a influência do par de elétrons não ligantes para a geometria da molécula:

Eu propus representar toda ligação como um par de elétrons ligados conjuntamente por dois átomos. [...] Estejamos lidando com compostos orgânicos ou inorgânicos, a ligação química é sempre o par de elétrons. Por mais importante que seja o par de elétrons para a teoria total da valência, deve-se observar que tal par não é fundamentalmente diferente de outros pares que não formam ligações (Lewis, 1923 *apud* Filgueiras, 2016, p. 1266-1267).

Na perspectiva de Lewis (1923, p. 30), as principais características da estrutura do átomo seriam: 1) os elétrons no átomo estão arranjados em cubos concêntricos; 2) o átomo neutro de cada elemento contém um elétron a mais que o átomo neutro do precedente; 3) os gases raros possuem oito elétrons no cubo e este será o núcleo sobre o qual é construído o maior grupo de elétrons do próximo período, ou seja, o gás nobre como caroço dos elementos do próximo período; e 4) os elétrons de um cubo externo incompleto podem ser dados a outro átomo, como por exemplo o Mg^{2+} (Mg^{++} , conforme notação de Lewis), ou elétrons podem ser retirados de outros átomos para completar o cubo, como o caso do cloreto, Cl^- . Representando, dessa maneira, “valência positiva e negativa”.

Algumas possibilidades de rearranjos de elétrons para o átomo de Lewis são apresentadas na Figura 1.

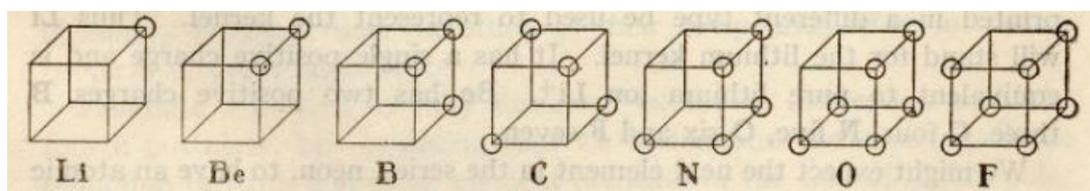


Figura 1: Os átomos de Lewis

Estão representadas imagens da estrutura atômica dos elementos da “primeira linha” (segundo período da tabela periódica). Os círculos localizados nos vértices representam os elétrons na camada externa do átomo neutro. Tal estrutura foi utilizada por Lewis (1916) para explicar os comportamentos dos elementos químicos.

Fonte: Lewis (1916).

Nessa representação de Lewis, o átomo de lítio (Li), por exemplo, teria o caroço [He], completando o grupo de dois, e um elétron no grupo de oito, o qual poderia ser doado para alcançar estabilidade semelhante ao hélio.

De acordo com OSU Libraries (s.d.) e Filgueiras (2016), é no segundo artigo do ano de 1916, “O átomo e a molécula”, que Lewis explica duas concepções fundamentais para teoria da ligação. A primeira é que a ligação química consiste em dois elétrons mantidos unidos por dois átomos. Nesta, os elétrons na maioria dos átomos podem ser colocados nos cantos de um cubo. Às vezes, esses átomos cúbicos compartilham bordas um com o outro, representando um par de elétrons. Outra concepção é sobre o caráter polar parcial da ligação que mantém os átomos unidos. Os compostos polares eram compreendidos como compostos iônicos, nos

quais os elétrons estariam mantidos por forças fracas, de modo que conseguiriam se mover para o átomo de origem. No entanto, nos compostos não polares os elétrons não teriam essa movimentação e não poderiam se locomover para as posições originais.

Conforme Greenberg (2009), em Lewis o compartilhamento de uma aresta (com dois elétrons) formava uma ligação simples entre dois átomos cúbicos, como uma molécula de iodo (I_2). Tal representação está apresentada na Figura 2.

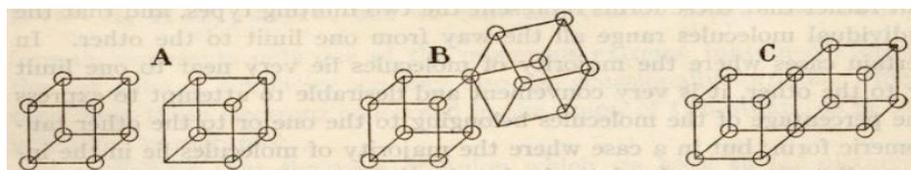


Figura 2: Etapas do compartilhamento de uma aresta Fonte: Lewis (1916).

Representação das etapas de uma ligação simples, com dois elétrons compartilhados. São compartilhadas apenas as arestas em uma ligação simples.

Ou seja, Greenberg (2009) explica que, na concepção de Lewis, 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. Exemplos de ligação simples e ligação dupla estão apresentados na Figura 3.

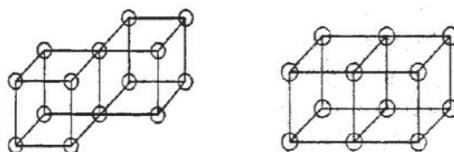


Figura 3: Ligação simples (a esquerda) e ligação dupla (a direita)

Fonte: Nogueira e Porto (2019a).

De acordo com Nogueira e Porto (2019a), o átomo de Lewis era cúbico, estático, simplificado e sem equações matemáticas, vindo a sofrer muitas críticas pelo modo de pensar do coletivo de pensamento referente aos físicos. A percepção dos físicos, que usavam a teoria quântica, estava direcionada a entender como os elétrons se movimentavam enquanto partícula dentro dos átomos. Já Lewis (1916), por sua vez, fundamentava a ligação química como a valência formada por um par de elétrons, com percepções puramente químicas. Temos aqui um exemplo contendo dois estilos de pensamento distintos que transitam entre si suas compreensões específicas em torno do átomo e conseqüentemente, as possibilidades de ligações. Há nesse caso, a circulação intercoletiva de ideias entre dois coletivos de pensamento distintos, porém próximos, que trocam pensamentos, críticas, debates, podendo corroborar para alguma transformação no estilo de pensamento, ou alguma mudança fundamental.

Na ligação química de Lewis não havia distinção entre ligação iônica ou covalente. Desse modo, na "valência iônica" ocorreria o composto polar, por haver formação de íons positivos e negativos, e no segundo caso, a formação era não polar. Como exemplo, Lewis (1923, p. 79) explicou a formação de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) da seguinte maneira: "quando o cálcio e o cloro se unem, o átomo de cálcio emite dois elétrons a cada átomo de cloro e estes adquirem

um elétron cada um, assumindo o estado iônico, na qual cada átomo possui o grupo de oito na sua camada mais externa”.

Além de Lewis, Irving Langmuir, químico americano, contribuiu para compreensão da ligação de compartilhamento de elétrons por meio de seu artigo publicado em 1919. Conforme Gugliotti (2001), Langmuir participou da construção do conhecimento científico em relação à teoria da ligação após ler dois artigos. Um dos artigos refere-se ao de Gilbert N. Lewis e o outro ao de Walther Kossel (1888-1956), físico-químico alemão, orientando de Arnold Sommerfeld; ambos os artigos foram publicados em 1916.

Ambos eram similares, baseados nas hipóteses de Abegg, mas a teoria de Lewis era a mais completa. Lewis imaginava um átomo estático, com elétrons arranjados em camadas cúbicas em torno do núcleo. A sua teoria, aplicável aos átomos mais leves, era conhecida como “regra dos oito” (nome este dado em função da já conhecida “regra dos dois”). Langmuir refinou e desenvolveu as ideias de Lewis, criando sua própria teoria quântica. Na teoria de Langmuir, que poderia ser aplicada também aos átomos mais pesados e explicava a estabilidade dos gases nobres, os elétrons estavam arranjados em camadas concêntricas em torno do núcleo. Este modelo obteve melhor aceitação tanto pelos químicos como pelos físicos e foi chamado por Langmuir de “regra do octeto” para não ser confundido com o de Lewis (Gugliotti, 2001, p. 569).

Segundo Nogueira e Porto (2019a), Lewis utilizou as contribuições de Richard Abegg (1868-1910), químico alemão, o qual propunha a distribuição de valência, para propor a representação dos elétrons de valência nos elementos. Além disso, o trabalho de Abegg foi a primeira publicação que considerava a estabilidade dos gases nobres. Para Lewis (1923), tal publicação ocorreu no artigo de 1904, “Valência e o sistema periódico: tentativa de uma teoria dos compostos moleculares”. A regra de oito elétrons foi renomeada de regra do octeto por Langmuir, permanecendo esse termo até nossos dias.

Nogueira e Porto (2019a) comentam que os principais conceitos sobre a valência, envolvendo o sistema periódico são: 1) a igualdade entre o número máximo de valência de um elemento e o número do grupo no qual este elemento está localizado na tabela periódica; 2) a relação da valência com a eletroquímica, em termos de carga positiva (cátion) ou negativa (ânion) do elemento, fornecendo dessa maneira um caráter positivo ou negativo para a valência, simbolizando a quantidade de elétrons presentes nos átomos. Desse modo, a teoria do octeto possibilitou a aceitação do número máximo de valência como oito, o que já era aceito e defendido por alguns químicos da época, tendo por base o empirismo. Isto é, por meio da observação dos compostos já conhecidos até aquele momento. Consolidava-se o estilo de pensamento dos químicos que percebiam oito elétrons na última camada de valência.

De acordo com Pacheco e Freitas-Reis (2020), a regra dos oito indicava que o átomo neutro possuía uma camada externa com o mesmo número de elétrons do excesso de cargas positivas correspondentes aos números dos grupos da tabela periódica. Essa quantidade poderia variar de zero a oito. Por volta de 1910, por meio dos esforços de Thomson (da teoria atômica que comprovou a existência do elétron), de Abegg e do grupo de pesquisa de Lewis no MIT, já existia o estado do conhecimento de que todos os átomos continham uma partícula negativa, ou seja o elétron, em seu interior e uma segunda partícula com massa maior e com carga positiva. Assim, a transferência eletrônica entre os átomos ocasionava uma força de atração capaz de mantê-los unidos.

O artigo de Kossel não teve circulação tão grande quanto o de Lewis, no entanto deixou contribuições para a teoria da ligação. Conforme Greenberg (2009), Kossel colaborou com a ideia de que os átomos utilizavam seus elétrons de valência para realizar a ligação. Dessa maneira, havia o entendimento que os átomos tendiam a atingir a mesma estrutura eletrônica dos gases raros. Nesse sentido, de acordo com Greenberg (2009), para Kossel os átomos adotam a camada de valência do gás inerte mais próximo por perda ou ganho de elétron.

Segundo Lewis (1923), Kossel assumiu os grupos sucessivos do átomo como anéis concêntricos ao redor do núcleo. Concordando, o próprio Lewis (1923) assume que estes grupos constituem camadas concêntricas, formando uma estrutura tridimensional ao redor do átomo central. Tanto no artigo de Kossel como no de Lewis, os grupos de elétrons deveriam atingir o mais alto grau de simetria e estabilidade como nos átomos do gás nobre. Isto é, hélio com seu grupo de dois ([He] 2); neônio com seus grupos de dois e de oito ([Ne] 2-8), argônio com seus grupos de dois, oito e oito ([Ar] 2-8-8) e assim por diante. Outros átomos foram considerados como tendo uma forte tendência a desistir de elétrons ou a absorver elétrons de maneira a imitar a estrutura do gás nobre mais próximo. As propostas de estruturas para os átomos de Kossel e de Lewis estão representadas na Figura 4.

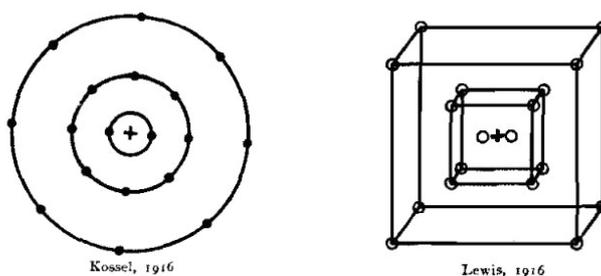


Figura 4: Representação dos átomos de Lewis (à esquerda) e Kossel (à direita)

Fonte: Lewis (1923).

Langmuir utilizou as ideias de valência presentes nos artigos de Kossel e de Lewis. Dessa maneira, conforme Gugliotti (2001, p. 569), Langmuir pensou em um modelo de átomo em que "os elétrons estariam arranjados em camadas concêntricas em torno do núcleo", o que permitia aproximação ao átomo de Bohr. Talvez por essas razões as contribuições de Langmuir tenham recebido aceitação tanto de químicos quanto de físicos.

Tendo por base a epistemologia de Fleck (2010 [1935]), ao pensar em outro modelo atômico que não fosse estático, Langmuir pôde complementar o conhecimento científico de dois coletivos de pensamento distintos. Ou seja, um relacionado à teoria da ligação (do estilo de pensamento de químicos, como Lewis e Kossel) e outro ao átomo de Bohr (do estilo de pensamento dos físicos). A junção de Langmuir representou uma circulação intercoletiva de ideias, cuja aceitação pelos físicos foi unânime, pois representava o estilo de pensamento daquele coletivo em 1919 (antes que surgisse o princípio da incerteza de Heisenberg e a dualidade onda-partícula). A principal ideia de Langmuir ao teorizar a química com base nos conceitos da física, provavelmente serviu como exemplo para Pauling complementar a química estrutural com a nova física. Tendo em vista as intenções de pesquisas de Pauling encontradas nas fontes primárias de OSU Libraries (s.d.). Pauling demonstrava muito interesse em encaixar os estilos de pensamento da química na nova teoria quântica; são bastante perceptíveis essas intenções nas fontes primárias, nos materiais históricos produzidos pelo próprio cientista.

Como ampliação da teoria estrutural atômica, Gugliotti (2001) menciona que a maneira como Langmuir realizou o arranjo dos elétrons dentro do átomo parecia prenunciar a química quântica. Se de fato tais conceitos anunciam uma transformação do estilo de pensamento da comunidade científica, então podemos dizer que Langmuir colaborou com a construção do desenvolvimento moderno da química.

Da mesma forma, Pereira et al. (2017) defendem que o artigo de Lewis "O átomo e a molécula" (*"The atom and the molecule"*), que trouxe as noções de ligação de par de elétrons, representou uma base para o desenvolvimento da teoria de ligação de valência (TLV), publicada em 1927.

A Teoria da Ligação de Valência descreve a formação de pares eletrônicos de valência compartilhados pelos orbitais atômicos sem que os mesmos percam suas características. Esta teoria foi desenvolvida inicialmente com o intuito de se utilizar os conceitos da recente mecânica quântica desenvolvida por Heisenberg e Schrödinger para explicar as ligações químicas (Pereira et al., 2017, p. 23).

As contribuições dos cientistas mencionados nos revelam o caráter coletivo da pesquisa no processo de construção da ligação química. Schäfer e Schnelle (2010) afirmam que, para Fleck, o pensamento individual de um cientista não dá suporte para o desenvolvimento de um fato científico, tal suporte vem do trabalho coletivo.

De acordo com Gugliotti (2001), Linus Pauling comentou, em 1984, que os artigos de Langmuir trouxeram muitas contribuições e adições à teoria do par de elétrons compartilhados. Contudo Lewis, como antagonista, não o deu o devido crédito.

A teoria do par de elétrons compartilhados foi amplamente divulgada nos EUA pelo químico Irving Langmuir (1881-1957), que realizou várias conferências explicando essa nova teoria e a chamada regra do octeto, a qual indicava o número de elétrons da última camada dos átomos e que seriam utilizados para formar os pares eletrônicos. Essas conferências fizeram com que muitos creditassem a teoria a Langmuir e não a Lewis, o que gerou um desconforto entre os dois (Nogueira e Porto, 2019a, p. 125).

A rivalidade entre Lewis e Langmuir

Irving Langmuir³ recebeu o Prêmio Nobel em 1932, enquanto Gilbert Lewis foi indicado 35 vezes e nunca foi contemplado.

A rivalidade entre Lewis e Langmuir foi de tão grande proporção que Lewis sofreu um infarto e veio a falecer após a concessão de uma honra a Langmuir em sua própria universidade, no Instituto de Química da Universidade da Califórnia em Berkeley, na qual Lewis era diretor

3 Irving Langmuir foi o primeiro químico não acadêmico a receber um Prêmio Nobel pela sua atuação no campo da química de superfície. cursou engenharia metalúrgica, recebendo graduação em 1903. Tornou-se PhD em química pela Universidade de Göttingen na Alemanha, em 1906. Teve como orientador Walther Nerst (rival de Lewis). Sua tese foi sobre dissociação de gases em contato com filamentos aquecidos. Chegou a trabalhar como professor de Departamento de Química nos EUA, porém durante curto intervalo de tempo, apenas três anos. Teve grande êxito profissional na indústria, a General Electric (GE). Após 1921, Langmuir parou de se dedicar à estrutura atômica, pois recebeu muitas críticas por não participar de grupos de pesquisa do meio acadêmico, em especial da físico-química (Gugliotti, 2001; Viana, 2017).

desde o início de sua carreira científica. Irving Langmuir foi convidado por essa universidade para ministrar palestras e receber homenagem por suas contribuições para a ligação química. O último doutorando de Lewis testemunhou que a causa de sua morte teria sido um problema cardíaco, ocasionado pela afronta de ter que conviver, em algum momento, com Irving Langmuir.

[...] Lewis havia ido almoçar com um “distinto visitante” [...] ninguém menos que Irving Langmuir [...] em 23 de março de 1946, no dia da morte de Lewis, Berkeley havia conferido a Langmuir um título honorário. Este também havia sido convidado a proferir uma série de conferências na universidade. A premiação ocorreu no período da manhã e Lewis não esteve presente. Aparentemente, [...] Wendell Latimer e Joel Hildebrand arranjaram um almoço privado na tentativa de aproximar os dois eminentes químicos. Nada se sabe do que pudesse ter ocorrido naquele almoço. O certo é que pouco depois Gilbert Lewis jazia morto em seu laboratório (Filgueiras, 2016, p. 1264).

Conforme Pauling (1992), a leitura que Lewis fazia dos significados apresentados por Langmuir no seu artigo de 1919 era apenas uma reafirmação do que ele já havia escrito anteriormente. Podemos interpretar que Gilbert Lewis estava tão enraizado na teoria da ligação, que diante da sua percepção orientada, e coerção no estilo de pensamento, enxergava apenas repetições e nenhuma novidade na obra de Langmuir. Em outras palavras, Lewis estava imerso na harmonia das ilusões, cujo sistema de opinião estava solidamente elaborado e fechado, seguindo uma tendência à persistência no sistema de opinião, ou seja, resistente diante de tudo que o contradiga.

Por outro lado, Lewis teve amizade e cooperou com Linus Pauling, fatores também de condicionamento social, que impactam na formação de percepções no coletivo e estilo de pensamento. Ambos trocaram correspondência nos anos em que a mecânica quântica ganhava grande reconhecimento frente à comunidade científica europeia, na primeira metade do século XX. Enquanto esteve junto a Lewis, ministrando aulas e estudando, Pauling escreveu os artigos que contribuíram para a compreensão sobre a teoria da ligação.

A correspondência entre Linus Pauling e Gilbert Lewis

Linus Pauling escreve para Gilbert N. Lewis com o objetivo de atualizá-lo sobre suas pesquisas científicas, em 7 de março de 1928. Nesta correspondência, segundo OSU Libraries (s.d., não paginado), Pauling conta o que havia lido no artigo de Fritz London (1900-1954). Este foi um físico americano, nascido na Alemanha, conhecido pelas publicações com Heitler, as quais deram origem à teoria do orbital molecular (TOM), teoria concorrente à da ligação de valência (Harris, 2007). Em seguida, Pauling descreve o que pretende escrever e publicar depois dessas percepções.⁴ Uma versão traduzida da correspondência C6 é apresentada no Quadro 3.

4 Correspondência. In: OSU Libraries (s.d.). *Linus Pauling and the nature of the chemical bond*. Letter from Linus Pauling to G.N. Lewis. Disponível em: <http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/corr/corr216.1-lp-lewis-19280307.html>. Acesso em: 25 mar. 2022.

Quadro 3: Correspondência de Linus Pauling para Gilbert N. Lewis (C6)**Tradução da correspondência de Pauling para Lewis**

Caro professor Lewis:

Você sem dúvida viu o artigo recente de London no *Zeitschrift für Physik* e observou que os resultados que derivam da mecânica quântica em relação ao compartilhamento de elétrons são o principal equivalente às regras que você havia postulado anteriormente. Obviamente, é sua prerrogativa apontar isso, mas na crença de que provavelmente não o faria, tomei a liberdade de me referir ao fato na primeira parte de uma nota relativa a alguns desenvolvimentos adicionais da teoria que foram enviados para os *Proceedings of the National Academy* (uma cópia está incluída). Se isso não atender a sua aprovação, farei as alterações que desejar. No artigo mais longo, referente ao *Journal of the American Chemical Society*, apontarei com mais detalhes a fundamentação dada a sua teoria pela mecânica quântica. Me agrada muito que no novo modelo atômico as características salientes do átomo de Lewis tenham sido reproduzidas tanto quanto as do átomo de Bohr.

Nas aulas que tenho ministrado este ano sobre mecânica das ondas com aplicações químicas, revi minuciosamente o trabalho sobre molécula de hidrogênio e íon molecular e corriji vários erros significativos. Além disso, realizei os cálculos dando a interação de dois átomos de hélio. O professor Noyes sugeriu que esse material talvez devesse ser publicado na *Chemical Reviews*, e eu escrevi para o professor Wendt para ver se ele deseja a publicação para a edição de maio. Este tratamento quantitativo das moléculas mais simples é fundamental para a consideração posterior da ligação química em geral.

Traduzi a dissertação de Goudsmit e, agora, estamos ampliando-a para formar uma monografia "O modelo atômico e a estrutura dos espectros de linha", que penso aparecerá durante o verão. Trabalhei com Goudsmit em Copenhague em problemas espectrais e achei um conhecimento da teoria espectral muito útil para solucionar o problema que mais me interessa – a natureza da ligação química.

Fonte: OSU Libraries (s.d.; não paginado; tradução nossa).

No contexto desta carta, Pauling está verificando se as regras que Lewis havia postulado sobre o compartilhamento de elétrons continuam correspondendo às expectativas frente ao novo modelo atômico, com base na mecânica quântica. Havia rumores entre a comunidade científica que o modelo de Lewis não era satisfatório, pois não explicava profundamente o comportamento dos elétrons dentro do átomo. Além disso, a comunidade química, após artigo de Langmuir de 1919, apoiava a explicação do comportamento do elétron no átomo de Bohr, o qual seria brevemente descartado segundo o coletivo de pensamento dos físicos europeus.

Mesmo diante de dúvidas, o modelo de átomo de Bohr começa a ganhar refutação dentro do coletivo de pensamento de alguns físicos europeus por causa do princípio da incerteza de Heisenberg, publicado em 1927. Neste, considera-se a probabilidade de o elétron estar presente no átomo, uma vez que não se pode estimar medidas simultâneas, como a posição e o momento de uma partícula, sem que haja erros fundamentais e então o movimento circular ou elíptico do elétron no átomo foi questionado. O princípio da incerteza possibilitou abertura para discussões sobre o comportamento dual da matéria. Conforme Hollauer (2008, p. 55), "nessa interpretação adotam-se conceitos ondulatórios nos quais atribui-se uma probabilidade de encontrar uma partícula em uma determinada posição".

Diante desse contexto científico, a grande novidade que Linus Pauling tinha para contar ao seu correspondente era a de que o modelo de ligação química adotado por Lewis não entrava em conflito com a nova teoria científica. Como mencionado em OSU Libraries (s.d., não paginado): "Alegro-me muito que no novo modelo atômico as características salientes do átomo de Lewis tenham sido reproduzidas tanto quanto as do átomo de Bohr".

Após estudar dois semestres no Instituto de Física Teórica na Universidade de Munique, em 1926 e 1927, Linus Pauling sabia quais eram os periódicos mais consultados pelos físicos

como, por exemplo, o *Zeitschrift für Physik* comentado na carta. Considerando que os artigos publicados realizam papel de circular as pressuposições científicas dentro do círculo esotérico, possibilitando a disseminação do pensamento e posteriormente, o fortalecimento do estilo de pensamento, Pauling tinha nestes a principal fonte de informação referente àquela comunidade científica. Desse modo, ao ler frequentemente tal periódico, Linus Pauling estava inserido naquele círculo esotérico, ou seja, no círculo de especialistas na área no qual circula o saber especializado.

A principal informação lida no artigo científico de London foi que os resultados derivados da mecânica quântica a respeito do compartilhamento de elétrons eram equivalentes aos postulados por Lewis. Dessa forma, Linus Pauling conta a Gilbert N. Lewis que irá escrever um artigo sobre essa correlação. Nesse sentido, em nota publicada pela Academia de Ciências, Pauling menciona que as considerações de London sobre as estruturas eletrônicas eram equivalentes às suposições que Lewis havia formulado em 1916, cuja base foram evidências puramente químicas. De acordo com Pauling (1928, p. 360), “as estruturas eletrônicas compartilhadas atribuídas por Lewis para moléculas como H_2 , F_2 , Cl_2 , CH_4 etc., também são encontradas por London”.

Pauling (1928) articulava com Lewis as possibilidades de formação de ligação de elétrons compartilhados. Esta ligação era conhecida como composto não polar, por não formar íons positivo e negativo, tal como acontecia na “valência iônica”. Como exemplo, a molécula de HF (fluoreto de hidrogênio) era considerada por London como um composto polar, formado a partir dos íons H^+ e F^- . Além disso, Pauling declara que muito provavelmente as moléculas HCl, HBr e HI eram não polares (no sentido de não serem iônicas). Eram investigados os possíveis números de ligações compartilhadas para um átomo da primeira linha (o segundo período da tabela periódica nos nossos dias). Para estes, o número de ligações compartilhadas não passava de quatro e para o hidrogênio não passava de uma ligação.

Consequentemente, Schäfer e Schnelle (2010), tendo por base Fleck (2010 [1935]), observam que a correlação entre os dois coletivos de pensamento pode dar consistência para o estado do conhecimento e assim, desenvolver o estilo de pensamento sobre o assunto (nesse caso, a ligação química), seja por meio da complementação, ampliação ou transformação deste.

Pauling e Lewis compartilhavam o mesmo “estilo de pensar” quanto à ideia de ligação química. Embora Pauling estivesse se familiarizando com o estilo de pensamento dos físicos europeus sobre a nova teoria atômica e compartilhando essa com Lewis. Desse modo, vemos uma comunicação dentro do círculo esotérico entre coletivos de pensamento distintos, com possibilidade para construção de um novo conhecimento por meio de mutações no estilo de pensamento (Fleck, 2010 [1935]).

Dessa maneira, Pauling e Lewis estiveram em meio à circulação intercoletiva de ideias (ou tráfego intercoletivo de ideias) ao articular as possibilidades de ligações de elétrons compartilhados e complementar essas ideias entre os dois estilos.

Podemos saber que Linus Pauling tinha em Gilbert N. Lewis uma rede de apoio já que, além de o chamar de professor, confessa ao final da carta que os conselhos dados por Lewis eram sempre bons, como o bem-sucedido conselho de ir estudar na Europa. Além de pedir autorização a Lewis para publicar um artigo sobre a junção que havia percebido, Pauling esclarece que se Lewis não aprovasse sua ideia, poderia modificar a escrita do referido artigo. Podemos enxergar nesse quesito a abertura para circulação de ideias no sentido de solidificar a teoria da ligação em estudo. Ou seja, Pauling tinha em Lewis esperança para fundamentar a ligação química à

luz da nova física. A teoria quântica estava presente no cenário científico naquele período e, por isso, Linus Pauling buscava entendê-la para aplicá-la na química estrutural.

Sobretudo, as ideias articuladas nessa correspondência nos mostram que estava emergindo o conhecimento sobre a teoria da ligação. Ou seja, os conceitos são construídos a partir das condições do coletivo do conhecimento, seja pela circulação de ideias, trocas de informações e do trabalho cooperativo entre os cientistas pertencentes ao mesmo coletivo e estilo de pensamento.

A resposta de Gilbert Lewis para Linus Pauling

Em resposta a Pauling, Lewis escreve para discutir pesquisas recentes em mecânica quântica e química estrutural, em 1º de maio de 1928.⁵ Trechos do conteúdo da correspondência C7 estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Correspondência de Gilbert N. Lewis para Linus Pauling (C7)

Tradução da resposta de Lewis para Pauling

[...] Eu estava, entretanto, muito interessado no seu artigo, assim como estive no artigo de London, e há muito em ambos os artigos com o que eu concordo. O sucesso do princípio de Pauli na interpretação de espectros complexos parecia não dar aos físicos nenhuma desculpa para não aceitar em sua totalidade a teoria dos elétrons emparelhados, acoplados, independentemente de constituírem ou não uma ligação, pela neutralidade mútua de seus momentos magnéticos; e é interessante ver se será possível obter fatos do princípio de Pauli ou da nova mecânica com relação a compostos químicos que ainda não são conhecidos ou ainda não são interpretados pelos químicos. É claro que o problema fundamental após o emparelhamento de elétrons é aceito: por que podemos ter apenas um par na camada K e apenas quatro pares na camada L etc.?

Lamento que, em um aspecto, minha ideia de valência nunca tenha sido totalmente aceita. Era uma parte essencial da minha teoria original que os dois elétrons em uma ligação perdessem completamente sua identidade e não pudessem ser rastreados até o átomo ou átomos específicos de onde vieram; além disso, esse par de elétrons é a única coisa que justifica a denominação "uma ligação". O fracasso em reconhecer esse princípio é responsável por grande parte da confusão que prevalece atualmente na Inglaterra sobre esse assunto, no qual ainda se fala em ligações polares, semipolares, e assim por diante. Penso que tanto no artigo de London como no seu é dada muita ênfase à origem dos elétrons emparelhados.

Estou certo de que você e London estão errados ao pensar que o hidrogênio não tem duas ligações, mas isso ocorre porque nenhum de vocês considerou a possibilidade de que em uma molécula altamente polar, a ligação que liga o hidrogênio possa não estar no nível K, mas no nível L. Esta questão é discutida brevemente no meu livro *Valence*.

Fonte: OSU Libraries (s.d., não paginado; tradução nossa).

Nesta correspondência, Lewis comenta que o princípio de Pauli respaldou a aceitação da teoria dos elétrons emparelhados para com os físicos, após interpretação de espectros complexos. Lewis revela acreditar também que novos fatos do princípio de Pauli podem desvendar compostos químicos ainda não estudados, tornando mais compreensível o referido princípio para a "natureza da ligação química". Neste aspecto, pode ser compreendido que o comportamento do elétron é o fato científico (foco de estudos) dos químicos americanos. Lewis definiu que um par de elétrons justifica uma ligação e Pauling buscava compreender o comportamento do elétron frente à nova teoria quântica. Mais precisamente, ao par de elétrons emparelhados com spins opostos publicado no artigo de London.

5 Correspondência. In: OSU Libraries (s.d.). *Linus Pauling and the nature of the chemical bond*. Letter from G. N. Lewis to Linus Pauling. Disponível em: <http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/corr/corr216.1-lewis-lp-19280501.html>. Acesso em: 25 mar. 2022.

O químico Lewis explicava a ligação química tendo como fundamento o conceito de par de elétrons. De acordo com Filgueiras (2016), o átomo teria um par de elétrons em sua camada de valência variando até oito elétrons, conforme disposição das arestas no modelo atômico cúbico.

O princípio da exclusão de Pauli proibia a ocupação dos mesmos números quânticos por duas partículas no sistema. Assim, "dois elétrons em um átomo/molécula não poderão possuir os quatro números quânticos iguais" (Hollauer, 2008, p. 235). Ou seja, n , l , m_l e m_s . Portanto, os dois elétrons emparelhados possuem spins opostos.

Conforme Hollauer (2008), o princípio da exclusão de Pauli, o qual proibia que o orbital contivesse mais que dois elétrons, possibilitou a ocupação de orbitais de mais alta energia, favorecendo a ligação química. Tais explicações com respaldo na nova física deram sustentação para a teoria de ligação de Lewis, uma vez que confirmava um par de elétrons para cada orbital.

Como exemplo, no vídeo V4, Pauling explica o princípio de exclusão de Pauli considerando o átomo de hélio (He), com carga nuclear de +2. Neste, pode haver um elétron em um orbital 1s e por sua vez, um segundo elétron também no mesmo orbital, 1s, desde que com spin oposto. Desse modo, um deles terá spin positivo e o outro spin negativo. Há um momento magnético permanente associado ao spin do elétron. Um terceiro elétron em um átomo, como o lítio (Li), terá que ocupar outro orbital, pois o orbital 1s está completamente ocupado quando possui dois elétrons emparelhados. Assim, a distribuição eletrônica do lítio pode ser representada como [He] 2s¹.

As discussões envolvendo as percepções de Pauling e Lewis, nos possibilitam compreender uma troca entre ambos, evidenciada pelas cartas, que possibilita transformações nos estilos de pensamento. Trata-se de estilos de pensamento próximos, pois se estivessem distantes, as comunicações entre eles seriam incomensuráveis. Está ocorrendo também a circulação intercoletiva de ideias (ou o tráfego intercoletivo de ideias), uma vez que ambos trocam informações científicas, contribuições um com o outro e até mesmo frustrações. Como quando Lewis lamenta sobre sua ideia de valência nunca ter sido totalmente aceita. Em termos fleckianos, existiam na oposição de pensamentos estilos de pensamento distintos, pois os físicos, especialmente Heitler e London, possuíam outro estilo de pensamento. Além disso, Linus Pauling apresentou a Lewis os conhecimentos científicos que estavam sendo construídos pelos físicos europeus, os quais complementavam a teoria da ligação proposta por Lewis (OSU Libraries, s.d.).

Sabendo da relevância do trabalho de Pauling para respaldar os postulados da ligação química, Lewis comenta: "Eu estava, entretanto, muito interessado no seu artigo, assim como estive no artigo de London, e há muito em ambos os artigos com o que eu concordo" (OSU Libraries, s.d., não paginado).

Podemos perceber que os princípios da ligação química estavam mais consolidados em Lewis que em Pauling, uma vez que aquele comenta com confiança os pressupostos do princípio de Pauli sobre o emparelhamento de elétrons, algo que não é comentado na carta de Pauling. Ou seja, o pareamento de elétron com spins opostos, em um mesmo orbital, confirmava a teoria da ligação proposta por Lewis em 1916.

Assim, vemos que Lewis está mais enraizado em sua teoria, sendo dessa maneira mais resistente às mudanças que confrontam os princípios destacados por ele como essenciais para a ligação química. Nesse sentido, a concepção desta teoria penetra de tal maneira que qualquer contradição se torna impensável, inimaginável. Estando o cientista, portanto, na perspectiva

fleckiana, vivendo a harmonia das ilusões. Por exemplo, ao afirmar que o átomo de hidrogênio realiza duas ligações: “Estou certo de que você e London estão errados ao pensar que o hidrogênio não tem duas ligações” (OSU Libraries, s.d., não paginado).

Embora quisesse conversar pessoalmente com Pauling e debater sobre a ligação de compartilhamento de elétrons, Lewis é mais resistente às mudanças no estilo de pensamento.

Desse modo, Fleck (2010 [1935]) afirma que quando um sistema de opinião é formado e fechado, no sentido de algo consistente, solidificado, este persiste e resiste contra tudo que o contradiga, visto que as concepções não são sistemas lógicos. Além disso, cada época tem sua concepção característica, por vezes dominante, em outras permanece com restos de concepções passadas e, ainda, com predisposições futuras. As concepções se conservam por meio da harmonia das ilusões.

Lewis estava tão certo da possibilidade de duas ligações de hidrogênio que, posteriormente, Pauling (1928) expõe uma ideia para “estrutura iônica”, com um átomo de hidrogênio e dois fluoretos, numa tentativa de explicar que o hidrogênio podia realizar duas ligações. Nesta, o próton (H^+) mantém os dois íons fluoretos juntos por forças eletrostáticas (incluindo polarização). O composto nesse caso seria polar, por formar íons H^+ e F^- . Ou seja, ainda não estava formalizado o conceito de covalência, que sugeriria o compartilhamento de elétrons. Esta “estrutura iônica” é apresentada na Figura 5.

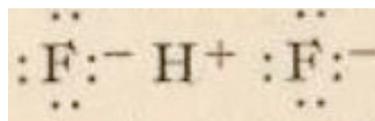


Figura 5: Concepção de Lewis para duas ligações de hidrogênio

Fonte: Pauling (1928).

Confronto de pensamentos: química versus física

A teoria de ligação, articulada pelos químicos e desenvolvida com critérios puramente químicos, sofria críticas por ser considerada simples demais, sem uma linguagem matemática avançada que a caracterizasse. Conforme Harris (2007), em 1927 os físicos Walter Heitler e Fritz London mostraram que a ligação de valência, uma ligação entre dois átomos formada pelo compartilhamento de um par de elétrons entre eles, poderia ser explicada usando a mecânica de ondas de Erwin Schrödinger. Dessa forma, tal trabalho ilustrou que a estabilidade formada pela ligação do par de elétrons era devida ao fenômeno de ressonância da mecânica clássica. Assim, o mecanismo da ligação poderia ser explicado por teoria puramente física, e a química poderia ser reduzida à física.

Todavia, Harris (2007) sugere que filósofos da química moderna têm argumentado com um ponto de vista antirreducionista, enfatizando que a prática química com métodos diagramáticos a torna autônoma da física. Esses argumentos mostram que há mais na prática da química do que pode ser capturado pela matemática da equação de onda.

Simões (2008) afirma que Charles Alfred Coulson (1910-1974) se apropriou dos conceitos de hibridização de Pauling e de sobreposição e os traduziu para o “orbital molecular”, ao escrever sobre “teoria quântica da ligação química”, em 1941. Assim, Coulson explicou diagramas de

formação das ligações de água, etileno e benzeno. Em consonância a Pauling, Coulson enfatizou a junção dos resultados experimentais e intuição química na sugestão de desenvolvimentos matemáticos particulares. Coulson simpatizava com o método do “orbital molecular” e não tentou refutar a ligação de valência. Sobretudo, reconheceu que a ressonância era uma das maneiras mais poderosas pelas quais a intuição química o levou a encontrar funções de onda.

A princípio, Linus Pauling criticou o foco dos estudos dos físicos, pois estes se interessavam exclusivamente em resoluções matemáticas e dessa maneira, acreditavam que a base para a explicação do mundo estaria ligada às equações, deixando a química reduzida à física e simplificando a própria natureza em equações.

Eu gosto de físicos – eles são homens e mulheres muito inteligentes, mas eles não apreciam a vida tanto quanto deveriam, porque a maioria deles não conhece muita química. Dirac disse há muito tempo (ele deve estar cansado de repetir essa afirmação) que a equação de onda de “Schrödinger” abrange uma grande parte da física e toda a química. Este é o problema com os físicos – eles não sabem muito sobre o mundo – eles conhecem apenas as equações. Nós, químicos, temos a sorte de a química ter se desenvolvido antes que a equação de onda de Schrödinger fosse descoberta.⁶ Se isso não tivesse ocorrido, a química estaria no mesmo estado da física nuclear hoje. As equações poderiam ser resolvidas, dando números de acordo com as observações experimentais, mas não haveria muita compreensão⁷ (OSU Libraries, s.d., não paginado; tradução nossa).

Portanto, havia esse embate de químicos *versus* físicos no tratamento da ligação do par de elétrons compartilhados. No entanto, tal como apresentado por Harris (2007), houve uma ênfase no caráter interdisciplinar no ambiente em que a ligação química se desenvolveu, atingindo os campos híbridos da primeira físico-química no final do século XIX e no início do século XX.

Na ligação de valência, tratada por Heitler e London, as ligações entre átomos são formadas pela sobreposição de orbitais atômicos individuais, os quais permitem um par de elétrons compartilhados entre duas camadas de elétrons. Esta noção do par de elétrons havia sido proposta por Lewis, no contexto de um átomo em forma de cubo, e desenvolvida por Irving Langmuir. Depois, Linus Pauling realizou um tratamento mecânico-quântico, além do feito por John Clarke Slater (1900-1976), físico teórico americano, os quais independentemente derivaram a estrutura tetragonal do átomo de carbono pelo novo método de 1931. Desse modo, Harris (2007) afirma que, por meio de esforços de Pauling em conjunto com Lewis, o método da ligação de valência tornou-se amplamente utilizado até a década de 1950. A partir deste período, o método orbital molecular alcançou uma aceitação mais ampla, após disputas prolongadas entre partidários das teorias rivais.

Conforme Harris (2007), Lewis postulou a ligação de valência dentro de uma estrutura de atomismo químico e a estabeleceu como um trabalho de química, embora reconhecesse a necessidade de uma exposição física do par de elétrons. Assim, os esforços de Pauling, ao utilizar

6 No trecho citado, as palavras de Linus Pauling estão fidedignas ao mencionado pelo próprio cientista, por isso o termo “descoberta” foi colocado na citação. Contudo, este termo não condiz com a nova filosofia da ciência, tampouco com a epistemologia fleckiana. O termo pelo qual o substituiríamos seria: “antes que o conceito da equação de onda de Schrödinger fosse construído”.

7 Manuscrito de Linus Pauling – “*The development of the concept of the chemical bond*”. Disponível em: <http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/notes/1983s.1.html>. Acesso em: 25 mar. 2022.

Heitler e London, bem como ao usar a teoria de ressonância para fundamentar os estudos de Lewis, fizeram da ligação química um trabalho físico-químico completo que preservou as ideias da valência clássica.

De acordo com Nascimento (2008), o trabalho de Heitler e London mostrou que a molécula de hidrogênio (H_2) poderia ser mais estável que os átomos isolados. Heitler e London mostraram que a energia potencial para um sistema H_2 exibia um valor mínimo de energia menor que a soma dos átomos isolados, então a formação da molécula de hidrogênio era mais provável de acontecer do que os átomos permanecerem isolados. Tais fatores marcaram o início da química quântica.

Segundo Simões (2008), a aceitação da “natureza da ligação química” na comunidade química se deu por causa da assertiva da físico-química nos EUA, da qual Gilbert Lewis foi um dos expoentes.

Considerações finais

A proposta desta pesquisa foi analisar quais foram os estilos de pensamento que permearam a percepção orientada dos químicos Linus Pauling, Gilbert Lewis, Irving Langmuir, Richard Abegg, Kossel etc., ao construírem sua compreensão sobre a ligação química. Esse delineamento da história da química se refere à primeira metade do século XX. Esta análise foi realizada por meio da epistemologia de Fleck e sua ideia de historicidade da ciência. Ou seja, utilizou-se Fleck (2010 [1935]) como fundamentação teórica e como método de análise desse episódio histórico.

A percepção direcionada em torno do estilo de pensamento dos químicos era de que um par de elétrons formaria uma ligação. Este pensamento os levou a acreditar que a teoria quântica poderia confirmar tal suposição. Embora os químicos e físicos pertencessem a estilos de pensamento distintos, estes eram próximos, pois seus membros conseguiam articular argumentos, discussões e controvérsias. Pauling teve a oportunidade de conhecer o estilo de pensamento sobre a teoria quântica diretamente com os pesquisadores que a estudavam. Além do pesquisador pertencer ao coletivo e estilo de pensamento dos químicos, ao discutir as teorias e seus desdobramentos, se torna um veículo do tráfego intercoletivo de ideias, onde a circulação de pensamentos entre coletivos de pensamento próximos permite transformações no estilo de pensamento e a criação de novos fatos.

As contribuições da epistemologia de Fleck para a educação em ciências vão além do caráter coletivo da ciência. Há visões de ciência em Fleck que podem contribuir para compreensões mais elaboradas sobre o empreendimento científico e para a natureza da ciência. Como exemplos: 1) *a importância da tradição histórica*, uma vez que o conhecimento nunca começa do zero, visto que há sempre um conhecimento anterior para dar suporte a algo novo. Em específico, vimos na história da ligação química que a noção de valência foi uma protoideia para a teoria da ligação. Este aspecto revela o caráter histórico e dinâmico da ciência. 2) *O conhecimento é provisório*, sendo a ciência um esforço humano para entender os fenômenos, fatos, e podem ocorrer trânsitos de pensamentos. O conhecimento pode sofrer mutações de estilos de pensamento por intermédio das trocas de pensamento que podem acontecer entre estilos de pensamento próximos, numa circulação intercoletiva de ideias, proporcionando criação de novos fatos ou até mesmo a circulação intracoletiva de ideias pode fortalecer pensamento entre coletivos. 3) *A observação de um objeto, fato ou fenômeno é influenciada pela teoria*. Como exemplo, na

história da ligação química vimos que Lewis utilizava a teoria atômica de Thomson para explicar a formação do par de elétrons compartilhados através dos elétrons de valência. 4) *A circulação de ideias interdisciplinares dos círculos esotéricos (de especialistas), produz uma unificação do conhecimento científico*. Irving Langmuir juntou a teoria da ligação de Lewis, referente ao estilo de pensamento dos químicos, e o átomo de Bohr, referente ao estilo de pensamento dos físicos, para explicar outros rearranjos da ligação e suas contribuições foram aceitas pelo modo de pensar em ambos os coletivos de pensamento.

Referências bibliográficas

- ARAUJO NETO, W.N. A noção clássica de valência e o limiar da representação estrutural. *Química Nova na Escola*, São Paulo, v. 1, n. 7, p. 13-24, dez. 2007. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/07/a04.pdf>. Acesso em: 1 set. 2022.
- CONDÉ, M.L.L. Paradigma versus estilo de pensamento na história da ciência. In: FIGUEIREDO, B.G.; CONDÉ, M.L. *Ciência, história e teoria*. Belo Horizonte: Argvmentvm, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319963248_Paradigma_versus_estilo_de_pensamento_na_historia_da_ciencia. Acesso em: 24 mar. 2022.
- CONDÉ, M.L.L. *Ludwik Fleck: estilos de pensamento na ciência*. Belo Horizonte: Fino Traço, 2012.
- CONDÉ, M.L.L. *Um papel para a história: o problema da historicidade da ciência*. Curitiba: Editora UFPR, 2017.
- CONDÉ, M.L.L. Mutações no estilo de pensamento: Ludwik Fleck e o modelo biológico na historiografia da ciência. *Revista de Filosofia Moderna e Contemporânea*, v. 6, n. 1, p. 155-186, jul. 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/fmc/article/view/20236>. Acesso em: 24 mar. 2022.
- DELIZOICOV, D. et al. Sociogênese do conhecimento e pesquisa em ensino: contribuições a partir do referencial fleckiano. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 1, p. 52-69, 2002. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10054>. Acesso em: 24 mar. 2022.
- FILGUEIRAS, C.A.L. Gilbert Lewis e o centenário da teoria de ligação por par de elétrons. *Química Nova*, v. 39, n. 10, p. 1262-1268, 2016. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=6532. Acesso em: 26 mar. 2022.
- FLECK, L. *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*. Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010.
- GONÇALVES-MAIA, R. *Linus Pauling: a natureza da ligação química*. Lisboa: Colibri, 2017.
- GREENBERG, A. *Uma breve história da química: da alquimia às ciências moleculares modernas*. São Paulo: Edgard Blucher, 2009.
- GUGLIOTTI, M. Irving Langmuir: o milagre da ciência. *Química Nova*, v. 24, n. 4, p. 568-572, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/JLGgCzSgr4ghxRxQq4mxZ5c/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- HAGER, T. *Linus Pauling and the chemistry of life*. New York: Oxford University Press, 1998.
- HARRIS, M.L. Chemical reductionism revisited: Lewis, Pauling and the physico-chemical nature of the chemical bond. *Studies in History and Philosophy of Science*, v. 1, n. 39, p. 78-90, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003936810700088X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- HOLLAUER, E. *Química quântica*. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 2011.

- LEWIS, G.N. The atom and the molecule. *Journal of the American Chemical Society*, v. 38, n. 4, p. 762-785, 1916. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja02261a002>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- LEWIS, G.N. *Valence and the structure of atoms and molecules*. New York: The Chemical Catalog Company, 1923. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.5000430107>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- LORENZETTI, L.; MUENCHEN, C.; SLONGO, I.I.P. A recepção da epistemologia de Fleck pela pesquisa em educação em ciências no Brasil. *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 15, n. 3, p. 181-197, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/HPtNKZkPdKf9gPNtQLVxcVB/?format=html>. Acesso em: 31 ago. 2022.
- LORENZETTI, L.; MUENCHEN, C.; SLONGO, I.I.P. A crescente presença da epistemologia de Ludwik Fleck na pesquisa em Educação em ciências no Brasil. *Revista Brasileira de Ciências e Tecnologia*, v. 11, n. 11, p. 373-404, 2018. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbect/article/view/6041/pdf>. Acesso em: 31 ago. 2022.
- MAKSIC, Z.; ORVILLE-THOMAS, W.J. *Pauling's legacy: modern modelling of the chemical bond*. New York: Elsevier, 1999.
- NASCIMENTO, M.A.C. The nature of the chemical bond. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 19, n. 2, p. 245-256, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/XfCs6756Nh97VQbHPbTSGm/abstract/?lang=en>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- MEAD, C.; HAGER, T. *Linus Pauling: scientist and peacemaker*. Corvallis: Oregon State University Press, 2001.
- NOGUEIRA, H.S.A.; PORTO, P.A. Entre tipos e radicais: a construção do conceito de valência. *Química Nova*, v. 42, n. 1, p. 117-127, 2019a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/QnjMYMnrwSTgfVWDNDdfBh/?lang=pt>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- NOGUEIRA, H.S.A.; PORTO, P.A. O conceito de valência em livros didáticos de química geral entre as décadas de 1890 e 1940. *Química Nova*, v. 42, n. 2, p. 237-248, 2019b. Disponível em: <http://static.sites.s bq.org.br/quimicanova.s bq.org.br/pdf/v42n2a15.pdf>. Acesso em: 1 set. 2022.
- NYE, M.Y. A carrer at the center: Linus Pauling and the transformation of chemical science in the twentieth century. In: International Workshop on the History of Chemistry, 2015, Tokyo. *Anais...* Corvallis: Oregon State University, 2015. p. 77-89. Disponível em: <http://kagakushi.org/iwhc2015/papers/11.NyeMaryJo.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- OSU LIBRARIES. *Linus Pauling and the nature of the chemical bond: a documentary history (1925-1954)*. Corvallis: Special Collections and Archives Research Center/Oregon State University Libraries, s.d. (Digital library). Disponível em: <http://scarc.library.oregonstate.edu/coll/pauling/bond/index.html>. Acesso em: 25 mar. 2022.
- PACHECO, L.L.; FREITAS-REIS, I. As tendências de pesquisa de Gilbert Lewis: um químico para além da teoria das ligações químicas. *Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul*, p. 466-476, 2020. Disponível em: http://www.afhic.com/wp-content/uploads/2020/04/466_AFHIC_Seleccion-AFHIC.pdf. Acesso em: 29 ago. 2022.
- PAULING, L. The shared-electron chemical bond. *National Academy of Science*, v. 14, n. 4, p. 359-362, 1928. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1085493/>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- PAULING, L. The nature of the chemical bond. *Journal of the Chemical Education*, Washington, v. 69, n. 7, p. 519-521, 1992.
- PEREIRA, C.F.C.; ROCHA, A.B.; TAMIASSO-MARTINHON, P.; ROCHA, A.S.; SOUSA, C. Contextualização histórico-filosófica de orbitais atômicos e moleculares. *História da Ciência e Ensino*, v. 16, n. 1, p. 18-35, 2017. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/hcensino/article/view/33034>. Acesso em: 26 mar. 2022.
- PFUETZENREITER, M.R. A epistemologia de Ludwik Fleck como referencial para a pesquisa no ensino na área de saúde. *Ciência e Educação*, v. 8, n. 2, p. 147-159, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/7SvRRG6FmwksqbVMHCsJDGz/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 24 mar. 2022.
- SCHÄFER, L.; SCHNELLE, T. Fundamentação da perspectiva sociológica de Ludwik Fleck na teoria da ciência. In: FLECK, L. *Gênese e desenvolvimento de um fato científico*. Belo Horizonte: Fabrefactum, 2010. p. 1-36.

SEVERINO, A.J. *Metodologia do trabalho científico*. 23ª ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SIMÕES, A. A quantum chemical dialogue mediated by textbooks: Pauling's the nature of the chemical bond and Coulson's Valence. *Notes & Records of the Royal Society*, v. 1, n. 62, p. 259-269, 2008. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rsnr.2007.0051>. Acesso em: 25 mar. 2022.

VIANA, H.E.B. Aspectos da natureza da ciência nas pesquisas de Irving Langmuir (1881-1957) relacionadas com a estrutura da matéria. In: MOURA, B.A.; FORATO, T.C.M. *Histórias das ciências, epistemologia, gênero e arte: ensaios para a formação de professores*. São Bernardo do Campo: Editora UFABC, 2017. p. 37-51.

WHITE, F.M. *Linus Pauling: scientist and crusader*. New York: Walker, 1980.

Recebido em abril de 2022

Aceito em setembro de 2022