



Estratégia Para Identificar Erros Conceituais de Química: Incompreensões em Torno da Aprendizagem de Geometria Molecular

Kleyfton Soares da Silva  • Paulo Rogério Miranda Correia 

Resumo

Estudos acerca de erros conceituais de geometria molecular foram majoritariamente realizados no âmbito internacional e revelaram concepções errôneas importantes para a compreensão das dificuldades de aprendizagem. No entanto, não há pesquisas explorando erros conceituais associados à percepção espacial das moléculas no estudo da geometria molecular. O objetivo desta pesquisa foi identificar e avaliar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio da elaboração e aplicação de um teste diagnóstico de dois níveis. Utilizou-se uma metodologia mista para a categorização e análise dos dados coletados de 55 estudantes ingressantes no nível superior (graduação em biotecnologia) de uma universidade pública. O estudo revelou erros importantes acerca das noções de geometria molecular e nos convidam a refletir sobre estratégias didáticas para os diferentes níveis de ensino (médio e superior). Verificou-se que estudantes possuem dificuldades para entender diferentes aspectos de múltiplas representações, afetando negativamente a compreensão da transição entre uma representação bidimensional e tridimensional. As duas primeiras questões do teste diagnóstico de dois níveis permitiram identificar cinco erros conceituais associados com a percepção tridimensional das moléculas, evidenciando que estudantes possuem concepções equivocadas acerca da relação entre a disposição espacial e os princípios que a fundamenta.

Palavras-chave: moléculas em 3D, múltiplas representações, percepção espacial, visualização

Strategy for Identifying Conceptual Errors in Chemistry: Misunderstandings Around the Molecular Geometry Learning

Abstract

Studies on conceptual errors in molecular geometry have mainly been conducted internationally and have revealed important misconceptions that affect learning difficulties. However, there is a lack of research exploring conceptual errors associated with spatial perception of molecules in the study of molecular geometry. The aim of this research was to identify and evaluate conceptual errors associated with the learning of molecular geometry through the development and application of a two-level diagnostic test. A mixed methodology was used to categorize and analyze the data collected from 55 biotechnology undergraduate students at a public university. The study revealed significant errors concerning the concepts of molecular geometry and invites us to reflect on teaching strategies for different levels of education (high school and higher education). It was found that students have difficulties in understanding different aspects of multiple representations, negatively impacting their understanding of the transition between a two-dimensional and three-dimensional representation. The first two questions of the two-level diagnostic test allowed the identification of five conceptual errors associated with the three-dimensional perception of molecules, demonstrating that students hold misconceptions regarding the relationship between spatial arrangement and its underlying principles.

Keywords: 3D molecules, multiple representations, spatial perception, visualization

Estrategia Para Identificar Errores Conceptuales en Química: Malentendidos en Torno al Aprendizaje de la Geometría Molecular

Resumen

Los estudios sobre errores conceptuales en geometría molecular se realizaron en su mayoría a nivel internacional y revelaron conceptos erróneos importantes para comprender las dificultades de aprendizaje. Sin embargo, no existen investigaciones que exploren los errores conceptuales asociados a la percepción espacial de las moléculas en el estudio de la geometría molecular. El objetivo de esta investigación fue identificar y evaluar los errores conceptuales asociados al aprendizaje de la geometría molecular a través del diseño y aplicación de una prueba diagnóstica de dos niveles. Se utilizó una metodología mixta para la categorización y análisis de los datos recolectados de 55 estudiantes que ingresan al nivel superior (graduación en biotecnología) de una universidad pública. El estudio reveló importantes errores sobre las nociones de geometría molecular e invita a reflexionar sobre estrategias didácticas para los diferentes niveles educativos (media y superior). Se encontró que estudiantes tienen dificultades para comprender diferentes aspectos de las representaciones múltiples, afectando negativamente la comprensión de la transición entre una representación bidimensional y tridimensional. Las dos primeras preguntas de la prueba de diagnóstico de dos niveles identificaron cinco errores conceptuales asociados con la percepción tridimensional de las moléculas, lo que demuestra que algunos estudiantes tienen conceptos erróneos sobre la relación entre la disposición espacial y los principios que la sustentan.

Palabras clave: moléculas en 3D, múltiples representaciones, percepción espacial, visualización

Introdução

As dificuldades de aprendizagem associadas à geometria molecular têm sido estudadas sob diferentes perspectivas. A necessidade de trabalhar o conteúdo para relacionar as propriedades das substâncias com a estrutura molecular (Stowe et al., 2019) e/ou para facilitar a visualização de moléculas por meio de recursos alternativos (Silva & Fonseca, 2021) tem impulsionado, portanto, o desenvolvimento de estratégias didáticas importantes.

Com o aumento de pesquisas acerca da aprendizagem de geometria molecular, a questão da visualização e desenvolvimento de habilidades espaciais para lidar com a noção de moléculas tridimensionais recebeu uma atenção considerável. Devido ao acesso cada vez mais facilitado aos recursos tecnológicos, atualmente, aplicativos digitais prometem minimizar as dificuldades de visualização de estruturas tridimensionais para que a aprendizagem faça mais sentido. O problema é que, ao longo do processo educativo, estudantes vão adquirindo concepções equivocadas que passam a fazer parte do repertório conceitual deles(as), dificultando a compreensão do assunto.

A situação colocada é que mesmo após as instruções do professor, estudantes podem permanecer com concepções errôneas. Isso porque eles(as) geralmente possuem uma concepção prévia acerca de um assunto, mas podem resistir às mudanças de concepções, uma vez que os(as) “estudantes usam seu conhecimento existente (ex.

sua ecologia conceitual), para determinar se as diferentes condições se encontram, ou seja, se uma nova concepção é inteligível (sabe o que significa), plausível (acredita que é verdade), e frutífera (considera útil)” (Hewson, 1992, p. 8, tradução nossa). As concepções equivocadas/errôneas são consideradas erros conceituais, uma vez que se apresentam como concepções científicas que podem até fazer sentido em determinados contextos, mas que precisam ser desconstruídas por serem inconsistentes. Assim, a noção de erro conceitual concebida na presente pesquisa pode ser descrita como ideias adquiridas em contextos formais e informais que — não sendo significativas do ponto de vista científico — impedem o avanço nos estudos (Soeharto et al., 2019). Trata-se, portanto, de conhecimentos não estruturados que acabam se tornando obstáculos de aprendizagem.

Conforme será apresentado, estudos acerca de erros conceituais de geometria molecular foram majoritariamente realizados no âmbito internacional e revelaram concepções errôneas importantes para a compreensão das dificuldades de aprendizagem. No entanto, não há pesquisas explorando erros conceituais associados à percepção espacial das moléculas no estudo da geometria molecular. Como os(as) estudantes concebem a transição entre uma representação bidimensional e tridimensional? Como a conformação tridimensional se revela na visão dos(as) estudantes?

O objetivo desta pesquisa foi, portanto, identificar e avaliar erros conceituais associados à aprendizagem de geometria molecular por meio da elaboração e aplicação de um teste diagnóstico de dois níveis. A hipótese é que, para além do que já foi relatado na literatura, existem erros conceituais associados às representações tridimensionais.

Essa pesquisa se justifica pela necessidade de se identificar os percalços da aprendizagem de conceitos científicos para que docentes possam planejar o ensino cientes de que algo precisa ser feito para evitar a propagação de concepções equivocadas. Dessa forma, a mediação da aprendizagem a partir de erros conceituais pode enriquecer as devolutivas, levando-se em consideração que determinados equívocos aparecem com frequência nas concepções científicas dos(as) estudantes.

Erros Conceituais Associados à Aprendizagem de Geometria Molecular

Em uma obra de 85 páginas, cujo objetivo foi mapear os principais erros conceituais de química básica, Kind (2004) faz apenas uma menção à geometria molecular, quando mostra uma concepção equivocada associada à noção de ligação covalente. Para os(as) estudantes entrevistados por Perterson e Treagust (1989) e citados por Kind (2004), cerca de um quarto deles considerou erroneamente que a geometria molecular resulta dos pares de elétrons ligantes, ou devido à polaridade da ligação. Porém, conforme mostrado na sequência, pesquisas foram realizadas de forma mais específica, revelando outros erros conceituais.

É comum estudantes se equivocarem ao explicar a orientação espacial das moléculas com base na Teoria da Repulsão dos Pares de Elétrons da Camada de Valência (TRPECV). Birk e Kurtz (1999) e Özmen et al. (2008) identificaram que os(as)

estudantes compreendem que a forma das moléculas se deve apenas à repulsão entre os pares de elétrons ligantes, ou que a forma das moléculas é devida apenas à repulsão entre pares de elétrons não ligantes. Por um lado, há a compreensão de que somente os pares de elétrons ligantes influenciam na configuração espacial da molécula, o que nos leva a sugerir que alguns estudantes não relacionam os átomos com sua natureza eletrônica para prever a disposição espacial da molécula, mas se preocupam em como representar fielmente uma fórmula molecular, considerando a maior distância possível entre um átomo e outro. Por outro lado, há a compreensão de que os pares de elétrons não ligantes são os únicos responsáveis pela forma da molécula, sugerindo que o fato de existirem pares de elétrons não ligantes em torno do átomo central faz os(as) estudantes suporem que essa nuvem de elétrons “empurra” os demais átomos. Dessa forma, fica evidente que comumente não há entendimento sobre a natureza eletrônica dos átomos e das ligações químicas.

A geometria da molécula também é percebida pelos(as) estudantes como resultado do número de átomos ligados ao átomo central (Özmen et al., 2008). Um erro comum é pensar que as moléculas BF_3 e NH_3 possuem a mesma geometria molecular, porque ambas possuem três átomos ligados ao átomo central. Esse fato revela mais uma vez que alguns estudantes desconsideram teorias para prever a forma das moléculas, utilizando-se apenas da fórmula molecular como uma dica para representar a molécula em três dimensões. Essa constatação é corroborada por Uyulgan et al. (2014), os quais perceberam um erro conceitual quando os(as) estudantes afirmaram que para as moléculas BeBr_2 e SCl_2 , suas geometrias moleculares são lineares e os tipos híbridos são sp^3 . Dessa forma, verifica-se que as geometrias moleculares podem ser previstas erroneamente a partir da quantidade de átomos ligados ao átomo central, desconsiderando-se noções de hibridização.

A utilização da estrutura de Lewis é recomendada para a previsão da geometria molecular e, por esse motivo, estudantes falham quando alguma molécula foge à regra do octeto. Karonen et al. (2021) perceberam dificuldades na representação de moléculas, tendo em vista que alguns estudantes acreditam que a regra do octeto se aplica a todos os exemplos. Ainda como consequência da falta de clareza quanto às possibilidades de formação de compostos, muitas vezes resultado da instrução falha das noções de ligações químicas, sempre nos deparamos com a concepção de que o Xe não pode formar ligações, pois é um gás nobre (Uyulgan et al., 2014).

Outro problema relatado tem a ver com a representação espacial ou desenho da estrutura de Lewis a partir da forma molecular. Estudantes acreditam que a fórmula molecular orienta necessariamente a ordem dos átomos durante o desenho da sua representação estrutural (Karonen et al., 2021). Os autores citam Cooper et al. (2010), os quais também perceberam que a estrutura desenhada varia dependendo de como a fórmula molecular é apresentada. Assim, estudantes desenhavam corretamente a estrutura para CH_3OH , mas falham para CH_4O , sugerindo que podem utilizar estratégias mnemônicas para resolver os problemas sem necessariamente ter noções de valência

dos elétrons de um átomo e sua representação de acordo com a estrutura de Lewis. Assim, nessa mesma perspectiva, foi observado por Karonen et al. (2021) e Stowe et al. (2019) que um erro conceitual comum é considerar que modelos moleculares como o de bolas e varetas não têm relações com concepções teóricas. Ou seja, considerar que os(as) estudantes vão ter um entendimento das representações moleculares do ponto de vista do(a) docente é um equívoco, tendo em vista que eles(as) veem os modelos moleculares como instrumentos de visualização das geometrias, mas não necessariamente para explicar ou interpretar processos físicos ou químicos.

O estudo da geometria molecular isoladamente não produz os efeitos esperados pelo ensino, que envolve a compreensão da relação estrutura-propriedade para explicar os fenômenos químicos e físicos. Portanto, o estudo das propriedades dos compostos requer a aquisição de noções sobre ligações químicas intramoleculares, ligações intermoleculares e polaridade. No entanto, a concepção errônea de que a ligação formada por um átomo de carbono (C) com o átomo de hidrogênio (H) é chamada de ligação de hidrogênio (Akkuzu & Uyulgan, 2016) tem limitado a aprendizagem de conceitos como forças intermoleculares e polaridade, importantes para a compreensão das propriedades das substâncias.

No rol de concepções trazidas, a última traz um erro conceitual que retoma o fato de estudantes aprenderem regras sem ter consciência das explicações científicas. É comum estudantes pensarem que para as moléculas NH_3 e NF_3 , se as geometrias das moléculas têm uma forma piramidal trigonal, os ângulos de ligação não podem ser diferentes (Uyulgan et al., 2014). Erro conceitual desse tipo se deve, em parte, à desconexão entre a TRPECV e os conceitos de hibridização e regra de Bent (Clauss et al., 2014). De acordo com a regra de Bent (1961), os átomos ou grupos substituintes de maior eletronegatividade — como o F em NF_3 — tendem a atrair orbitais de maior caráter p, diminuindo, portanto, o ângulo de ligação.

Metodologia

Com o intuito de atender ao objetivo proposto, optou-se pela pesquisa mista, pois esse método permite coletar, analisar e integrar os dados quantitativos e qualitativos de modo a gerar uma teorização mais robusta e, conseqüentemente, um maior entendimento dos fenômenos em estudo (Sampieri et al., 2013).

O público-alvo incluiu trinta e um estudantes do sexo masculino e vinte e quatro do sexo feminino, totalizando cinquenta e cinco estudantes ($N=55$) — faixa etária dos 16 aos 22 anos — recém ingressantes em um curso de graduação (biotecnologia) de uma universidade pública. Os autores solicitaram autorização aos docentes responsáveis pela disciplina “Química Geral” para convidar os(as) estudantes a participarem da pesquisa em horário de aula. Os conhecimentos avaliados são referentes ao que os(as) estudantes aprenderam no Ensino Médio.

Os dados para análise derivaram das respostas ao teste diagnóstico de dois níveis (*two-tier*) sobre geometria molecular (Apêndice A). No laboratório de informática,

solicitou-se que os(as) estudantes acessassem o ambiente virtual de aprendizagem (MOODLE) e respondessem o teste diagnóstico pelo período máximo de 45 minutos.

Todos os aspectos éticos foram garantidos conforme o projeto enviado e aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Humanos (CAAE: 51327721.7.0000.5390).

Elaboração, Validação e Confiabilidade do Instrumento de Coleta e Análise de Dados

O teste diagnóstico de dois níveis (*two-tier*) tem sido amplamente utilizado em pesquisas de identificação de erros conceituais na área de ciências (Peterson et al., 1989; Peterson & Treagust, 1989; Peterson et al., 1986; Uyulgan et al., 2014; Mutlu & Sesen, 2015; Suri & Azhar, 2020; Métioui & Trudel, 2021). Ele consiste em um conjunto de questões de múltipla escolha acompanhadas de uma segunda opção de resposta, que funciona como um reforço a ser confrontado com a resposta inicial.

Esse tipo de teste é importante para captar as razões por trás das escolhas dos(as) estudantes e permite a identificação de erros conceituais — muitas vezes difíceis de serem percebidos pelos(as) docentes. Os itens do teste diagnóstico da presente pesquisa foram definidos para confirmar e/ou ampliar — no cenário nacional — erros conceituais identificados na literatura. Além disso, os quatro primeiros itens do teste foram desenvolvidos para investigar erros conceituais associados a aspectos inéditos da disposição espacial das moléculas. O formato “questão de múltipla escolha — questão dissertativa” foi inspirado em Uyulgan et al. (2014).

O teste diagnóstico da presente pesquisa contém 7 questões, sendo que para cada questão há 2 itens, totalizando 14 itens (perguntas). Os itens foram elaborados e discutidos por dois docentes de química. Após a aplicação do teste, obteve-se alfa de Cronbach igual a 0,71, resultando em uma consistência interna adequada para as finalidades dessa pesquisa (Landis & Koch, 1977).

Baseou-se no sistema de pontuação dos itens em Özmen et al. (2008), considerando-se para avaliação cada par de itens de cada questão (Tabela 1).

Tabela 1

Critério de avaliação das questões do teste diagnóstico sobre geometria molecular

Categorias		Abreviação	Pontuação
Resposta Correta	Explicação Correta	C-C	3
Resposta Incorreta	Explicação Correta	I-C	2
Resposta Correta	Explicação Incorreta	C-I	1
Resposta Incorreta	Explicação Incorreta	I-I	0

Fonte: Adaptado de Özmen et al. (2008).

A análise dos dados ocorreu em três etapas: (1) Análise descritiva dos dados para identificação do nível de compreensão geral dos(as) estudantes, conforme Silva (2018); (2) Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias mostradas na Tabela 1 (Uyulgan et al., 2014); (3) Categorização e análise de erros conceituais conforme o modelo apresentado em Peterson e Garnett (1986) e Uyulgan et al. (2014).

Resultados e Discussão

Conforme o critério de pontuação descrito na Tabela 1, a nota média obtida no teste diagnóstico — convertida em amplitude potencial de 0 a 10 — foi de 5,24 com desvio de $\pm 1,9$. A moda foi 3,3 e mediana 5,7. O valor máximo foi 9,0 e mínimo 1,9, resultando em uma amplitude igual a 7,1. A Tabela 2 mostra a distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias: correto-correto (C-C); incorreto-correto (I-C); correto-incorrecto (C-I); incorreto-incorrecto (I-I).

Tabela 2

Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias

Questão	C-C		I-C		C-I		I-I	
	f	%	f	%	f	%	f	%
1	17	31	29	53	3	5	6	11
2	24	44	5	9	10	18	16	29
3	31	56	0	0	22	40	2	4
4	13	24	27	49	5	9	10	18
5	11	20	15	27	10	18	19	35
6	9	16	17	31	11	20	18	33
7	2	4	9	16	19	35	25	45

O maior valor percentual de cada questão foi realçado. Quando os 14 itens são avaliados em pares (*two-tier*), obtendo-se, portanto, 7 questões, observa-se que as questões 1 e 4 tiveram os itens abertos mais bem avaliados que os de múltipla escolha. Já as questões 5, 6 e 7 aparecem com um percentual de resposta crítico na categoria incorreto-incorrecto (I-I), uma vez que a maior parte dos(as) estudantes errou tanto os itens objetivos quanto os subjetivos.

Os erros conceituais destacados na Figura 1 foram identificados a partir da análise de todas as respostas do teste diagnóstico de dois níveis.

Figura 1

Distribuição da frequência das respostas dos(as) estudantes de acordo com as categorias

Aspecto avaliado	Questão	Erro conceitual	Frequência (%)	
Representação tridimensional	1	Na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, a conformação dos átomos passa despercebida, valorizando-se a presença de átomos e tipos de ligações químicas.	22 (40%)	
		Na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, valoriza-se a conformação dos átomos e acredita-se que há átomos de hidrogênios ocultos na representação 3D.	7 (12,7%)	
	2	Valorização do espaçamento claro nas ligações para uma suposta visualização coerente.	13	(30,9%)
			4	
		Representações moleculares lineares — ainda que em formato de bolas e varetas — não são consideradas tridimensionais.	7 (12,7%)	
Os átomos da representação tridimensional devem seguir a mesma disposição espacial dos átomos da representação estrutural plana correspondente.	21 (38,2%)			
Relação estrutura de Lewis-geometria	3	As diferentes geometrias do CO_2 e H_2O se devem aos tipos de ligação.	12 (21,8%)	
		A geometria angular de moléculas como H_2O é devida apenas à repulsão entre os pares de elétrons não ligantes.	12 (21,8%)	
Relação estrutura-propriedade	4	Uma molécula com pares de elétrons não ligantes no átomo central é polar — ex. XeF_4 .	11 (20%)	
		Átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes geram as mesmas geometrias.	12 (21,8%)	
		Átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes são apolares.	6 (10,9%)	
Relação estrutura-hibridização	5	O Be faz ligação iônica.	7 (12,7%)	
Repulsão eletrônica	6	Quando há par de elétrons não ligantes em uma representação estrutural tridimensional de uma molécula, valoriza-se o posicionamento superior do par de elétrons em detrimento da conformação dos átomos.	10 (18,2%)	
Relação eletronegatividade-repulsão eletrônica	7	O ângulo de ligação que dá forma a uma molécula é determinado pela quantidade de elétrons do átomo central (no estado fundamental).	8 (14,5%)	

Representação Tridimensional

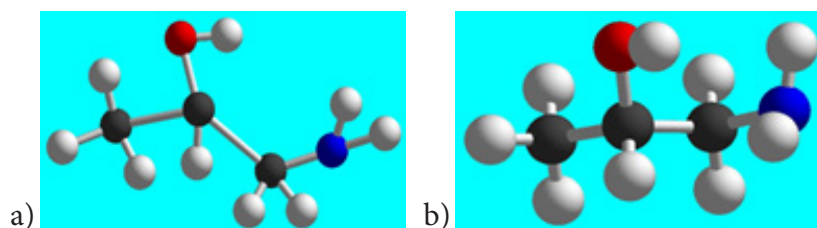
Identificou-se cinco erros conceituais quanto ao aspecto “representação tridimensional”. Para 40% dos(as) estudantes, na transição entre uma representação estrutural plana e uma tridimensional, a conformação dos átomos passa despercebida, valorizando-se a presença de átomos e tipos de ligações químicas. Na primeira questão, quando foi pedido para representar em três dimensões a molécula estrutural plana, alguns estudantes focalizaram em apenas um aspecto da molécula — a presença de átomos de hidrogênio e carbono que estavam ocultos na representação estrutural plana. Um(a) estudante relatou, por exemplo, que escolheu a alternativa (incorreta) porque “contém 3 Carbonos (bolas pretas), 9 Hidrogênios (bolas brancas), 1 Nitrogênio (azul) e 1 Oxigênio (vermelho)”.

Os(as) estudantes (12,7%) que optaram pelas moléculas tridimensionais sem os hidrogênios representados acreditam que a disposição espacial dos átomos deve seguir à representação estrutural plana correspondente. A presença dos dois erros conceituais mencionados sugere que há falhas no desenvolvimento de habilidades espaciais, resultando no impedimento da visualização de moléculas por meio de suas múltiplas representações (Martina, 2017).

Curiosamente, 30,9% dos(as) estudantes afirmaram que a representação molecular em 3D mais coerente é a que apresenta mais clareza das ligações e maior distanciamento dos átomos (Figura 2a). Essa descoberta evidencia que alguns estudantes não manipulam mentalmente as moléculas 3D estáticas para verificar a conformação esperada para os átomos — considerando que na figura alguns átomos parecem estar sobrepostos a outros (Figura 2b). Um(a) estudante relatou, por exemplo, que “todos os carbonos estão com seus respectivos hidrogênios ligados, assim como também há a ligação entre o oxigênio e hidrogênio, dispersados de maneira mais coerente”. Essa valorização equivocada do espaçamento claro nas ligações para uma suposta visualização coerente foi encontrada nas duas primeiras questões, uma vez que em ambas havia a pergunta acerca da forma mais coerente para representar uma molécula estrutural plana em 3D.

Figura 2

(a) molécula com disposição espacial inapropriada; (b) molécula com disposição espacial apropriada



Ainda acerca da primeira questão, chamou a atenção o fato de nove estudantes — dos vinte que acertaram o item de múltipla escolha — terem acertado sem apresentar justificativas corretas para os dois aspectos avaliados (presença de átomos e conformação molecular). Eles(as) justificaram apenas com base no primeiro aspecto. Sobre o aspecto da conformação molecular, a possível opção não consciente pela molécula correta, mesmo quando havia outra para efeito de comparação, faz-nos inferir que houve escolha aleatória (“chute”) ou intuitiva com base em aprendizagem implícita (Reber, 1993).

Na segunda questão que avaliou o aspecto da representação tridimensional, houve duas descobertas importantes. Primeiro, verificou-se que a noção de tridimensionalidade de alguns estudantes (12,7%) tem a ver com a forma zigue-zague das moléculas. Para eles(as), as estruturas moleculares lineares não são tridimensionais: “A alternativa escolhida se deve ao fato de a molécula estar realmente representada em 3 dimensões e disposta de forma clara para ver todas os átomos e suas ligações” (Relato de um(a) estudante).

Observou-se que 38,2% dos(as) estudantes acreditam que os átomos da representação tridimensional devem seguir a mesma disposição espacial dos átomos da representação estrutural plana correspondente. Uma situação semelhante foi observada por Silva (2018), quando evidenciou que estudantes tendem a reproduzir tridimensionalmente aquilo que eles veem bidimensionalmente.

Três justificativas incorretas associadas à escolha da molécula em formato linear (letra d da questão 2) chamaram a atenção por deixar transparecer que esse seria o formato ideal por resultar em maior estabilidade para a molécula. Esses exemplos retomam o caso da molécula (Figura 2a), que também foi consideravelmente escolhida por aparentemente tornar as posições dos átomos mais definidas ou com o maior distanciamento possível entre eles.

Os erros conceituais associados à percepção e manipulação mental de moléculas tridimensionais revelam aspectos preocupantes em se tratando da aprendizagem de geometria molecular. Enquanto educadores, precisamos ficar atentos às metodologias de ensino e recursos didáticos empregados para evitar que erros conceituais como esses sejam inconscientemente reproduzidos.

Portanto, concordamos com Ferk et al. (2003) que os educadores precisam ter cuidado para não desenvolver erros conceituais relacionados à forma, tamanho e cores de átomos e moléculas. No caso do ensino por meio de representações, os pressupostos de Martina (2017) são essenciais para compreender e desenvolver estratégias para lidar com múltiplas representações, com o objetivo de atingir a fluência conexional, que é a capacidade de compreender aspectos conceituais a partir de diferentes representações.

Relação Estrutura de Lewis — Geometria Molecular

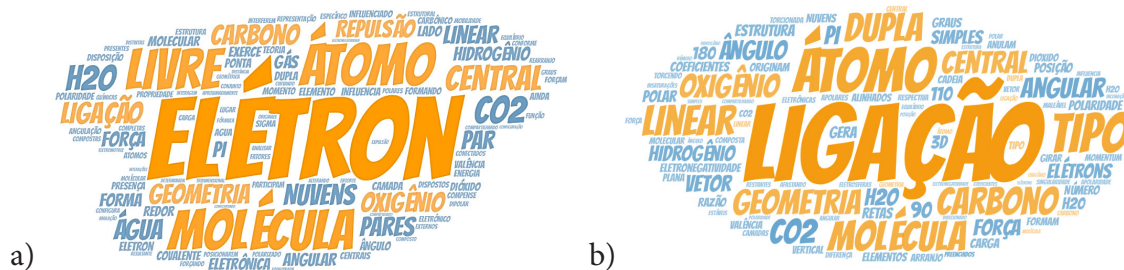
Em geral, houve desempenho satisfatório para responder a terceira questão — principalmente o item de múltipla escolha. Porém, a presença de um erro conceitual encontrado em 21,8% das respostas dos(as) estudantes dá um sinal de alerta quanto

à concepção de disposição espacial dos átomos em uma molécula. Para eles(as), as diferentes geometrias do CO_2 e H_2O se devem aos tipos de ligação. Assim, de forma simplificada, o CO_2 é linear porque tem ligações duplas e o H_2O porque tem ligações simples.

Verificou-se que, embora exista uma noção de espacialidade coerente quanto às características das ligações duplas no CO_2 , a falta de explicações com base na repulsão eletrônica dá indícios de que erros conceituais foram formados ao longo do processo educativo. As nuvens de palavras abaixo destacam os 10 conceitos que apareceram com maior frequência nas respostas avaliadas como corretas (Figura 3a) e incorretas (Figura 3b).

Figura 3

a) Nuvem de palavras de 31 respostas dissertativas avaliadas como corretas; b) Nuvem de palavras de 24 respostas dissertativas avaliadas como incorretas



Uma comparação entre as nuvens de palavras mostra que os(as) estudantes que acertaram a questão aberta citaram a palavra “elétron” com maior frequência, demonstrando que — combinando com as palavras “livre” e “nuvens” — expressam justificativas coerentes envolvendo as noções de repulsão eletrônica. Por outro lado, os(as) estudantes que erraram a questão não citaram a palavra “livre”, enquanto “nuvens” só é citada uma vez. No entanto, a nuvem de palavras das respostas incorretas confirma o foco dos(as) estudantes na explicação com base nos tipos de ligações químicas envolvidas, quando citaram com frequência as palavras “ligação”, “tipo”, “dupla”.

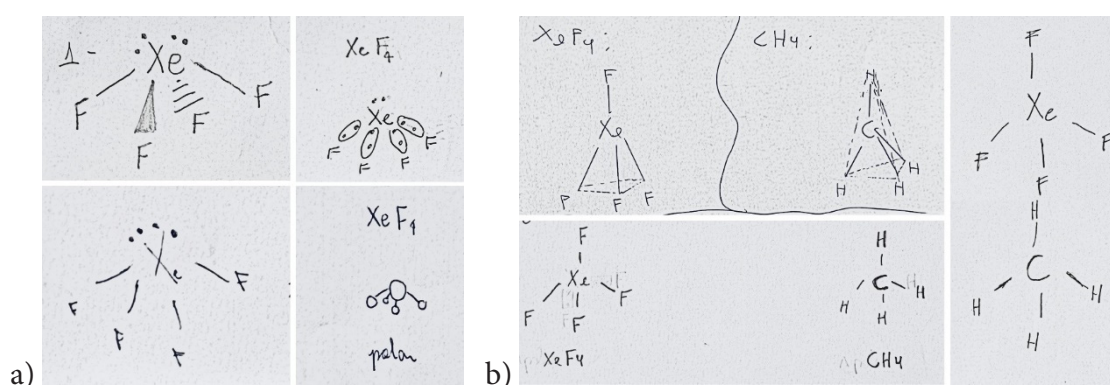
Uma análise aprofundada do uso da palavra “repulsão” que aparece na primeira nuvem de palavras revela que embora os discursos de alguns estudantes tenham sido avaliados corretamente, eles contêm um erro conceitual importante. Possivelmente em decorrência do discurso docente, 21,8% dos(as) estudantes acreditam que a geometria angular de moléculas como H_2O é devida apenas à repulsão entre os pares de elétrons não ligantes. Assim, é comum estudantes pensarem que apenas a repulsão entre os pares de elétrons não ligantes influencia na geometria molecular. Essa constatação vai ao encontro dos achados de Peterson e Garnett (1986) e Birk e Kurtz (1999).

Relação Estrutura-propriedade

Na quarta questão foi possível identificar três erros conceituais. O primeiro erro é considerar que a presença de pares de elétrons não ligantes no átomo central resulta necessariamente em uma molécula polar. Essa ideia foi reportada por 20% dos(as) estudantes e pode ser confirmada com base nos desenhos feitos para a molécula de XeF_4 , em que a disposição espacial dos átomos e dos pares de elétrons não ligantes sugere que o vetor momento dipolar resultante é diferente de zero (Figura 4a).

Figura 4

a) Desenhos de XeF_4 feitos por quatro estudantes; b) Desenhos de XeF_4 e CH_4 feitos por três estudantes



Outro erro conceitual é assumir que átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes geram as mesmas geometrias. Por causa dessa concepção errada, 21,8% dos(as) estudantes responderam que as geometrias das moléculas de XeF_4 e CH_4 são tetraédricas (Figura 4b).

Com um percentual menor, mas não menos importante, alguns respondentes (10,9%) consideraram que átomos centrais com o mesmo número de átomos ligantes e semelhantes são apolares. A partir dessa concepção errada, assume-se que o XeF_4 e CH_4 são apolares porque cada átomo central está ligado a outros quatro átomos semelhantes, fazendo com que o vetor momento dipolar resultante seja zero. É importante destacar para os(as) estudantes que essa estratégia é falha e não justifica, por exemplo, o caso da característica polar do SF_4 .

Relação Estrutura-hibridização

Na questão 5, a dispersão nas respostas referentes ao item de múltipla escolha mostrou que os(as) estudantes tiveram dificuldades em atribuir as geometrias para as moléculas BeH_2 e SF_2 . Essa evidência confirma a falta de familiaridade com casos que fogem à regra do octeto, como a formação do hidreto de berílio.

Trazendo mais informação sobre os conhecimentos prévios quanto à hibridização, o item subjetivo da questão 5 revelou que 12,7% dos(as) estudantes acham que a ligação química entre o Be e o H é do tipo iônica. Averiguou-se que a maioria dos(as) estudantes

que acertaram o item subjetivo conseguiu utilizar a figura como suporte para expressar suas justificativas, ainda que de forma superficial. No entanto, nenhum(a) deles(as) conseguiu desenvolver uma abordagem mais assertiva. O termo “hibridização” ou “estado híbrido”, por exemplo, não apareceu em nenhuma das respostas. Isso sugere que eles(as) têm poucos conhecimentos acerca da teoria da hibridização.

Repulsão Eletrônica

A sexta questão ilustra mais um caso problemático relacionado à compreensão de aspectos espaciais. Embora 33% dos respondentes tenham errado a questão por completo, observou-se que 46% acertaram somente o item subjetivo. Nas justificativas para a escolha da estrutura incorreta do SF_4 foram identificados 17 motivos corretos. Os(as) estudantes tendem a atribuir a conformação da molécula ao efeito da repulsão eletrônica, mas 18,2% deles(as) foram induzidos(as) à escolha da alternativa incorreta principalmente por pensarem que quando há par de elétrons não ligantes em uma representação estrutural tridimensional, seu posicionamento deve ser sempre acima da representação.

A partir das respostas, verifica-se que faltou flexibilidade espacial nos(as) estudantes para notar que, de acordo com suas próprias justificativas, a geometria da molécula tomaria a forma de uma “gangorra”. Talvez pelo costume de tomarmos como exemplo as moléculas NH_3 e H_2O e representarmos os pares de elétrons sempre no plano superior, estudantes podem estar desenvolvendo erros conceituais. Assim, é preciso ressaltar o caráter dinâmico das moléculas.

A análise da sexta questão também fez surgir uma reflexão importante. A utilização de representações inadequadas pode confundir os(as) estudantes, considerando que o que eles(as) enxergam nem sempre é o que o(a) docente planeja e espera. Um percentual considerável de respostas (21,8%) continha justificativas embasadas em um suposto movimento de elétrons ou tipo de ligação (dativa) indicado pelas setas das duas figuras. Ou seja, alguns estudantes não entenderam as setas como uma representação da repulsão eletrônica.

Outras respostas (10,9%) sugeriram que a representação correta deveria ser a que mostrasse a repulsão eletrônica (setas) envolvendo mais átomos. Notadamente, verifica-se mais uma falha da representação, tendo em vista que alguns estudantes questionaram o fato de a representação correta não indicar através das setas que a repulsão ocorre entre todas as ligações.

Relação Eletronegatividade-repulsão Eletrônica

A sétima e última questão foi a que teve maior nível de dificuldade e a com mais registros de respostas do tipo “não sei” (29%). Dos(as) estudantes que acertaram o item de múltipla escolha (38%), apenas 3,6% tiveram o item subjetivo avaliado corretamente, sugerindo que houve escolha aleatória. Curiosamente, dos(as) estudantes que erraram o item de múltipla escolha, 36% acertaram o item subjetivo. Mais uma vez, percebeu-se uma dissociação entre a perspectiva espacial e o discurso apresentado, pois mesmo

não indicando a representação correta, alguns estudantes justificaram coerentemente que, em geral, a eletronegatividade é responsável pelo deslocamento de densidades eletrônicas e, conseqüentemente, afeta o ângulo da ligação.

O erro conceitual identificado na sétima questão tem a ver com a noção de ângulo de ligação. Erroneamente, 14,5% dos(as) estudantes acreditam que o ângulo de ligação que dá forma a uma molécula é determinado pela quantidade de elétrons do átomo central (no estado fundamental). Nesse contexto, estudantes assumem que quanto maior a quantidade de elétrons do átomo central, maior será a repulsão e maior será o ângulo da ligação.

Conclusões e Implicações

O estudo das concepções apresentadas pelos(as) estudantes revelou erros importantes acerca das noções de geometria molecular e nos convidam a refletir sobre estratégias didáticas para os diferentes níveis de ensino (médio e superior). Verificou-se que muitos(as) estudantes possuem dificuldades para entender diferentes aspectos de múltiplas representações, afetando negativamente a compreensão da transição entre uma representação bidimensional e tridimensional. Enquanto novidade nesse tipo de investigação, as duas primeiras questões do teste diagnóstico de dois níveis permitiram identificar cinco erros conceituais associados com a percepção tridimensional das moléculas, evidenciando que alguns estudantes possuem concepções equivocadas acerca da relação entre a disposição espacial e os princípios que a fundamenta.

Vale ressaltar que, além da dificuldade de aliar um novo conhecimento às concepções prévias dos(as) estudantes, os recursos instrucionais e abordagens didático-metodológicas empregadas em sala de aula também podem levar ao surgimento de erros conceituais. Dessa forma, o teste diagnóstico contribuiu para identificar treze erros conceituais importantes, de modo que as práticas que os sustentam poderão ser repensadas a fim de evitá-los. Considerando que os erros conceituais nem sempre são explicitados pelos(as) estudantes e identificados pelo(a) docente em sala de aula, uma estratégia é antecipar — por meio do discurso instrucional — possíveis distorções de compreensão do conteúdo em estudo, a partir dos erros apresentados na Figura 1. Nessa perspectiva, a visão do(a) especialista (docente) pode orientar a aquisição de conceitos por meio de um caminho sem armadilhas ou equívocos.

Em suma, recomenda-se que o trabalho em sala de aula seja realizado com base em modelos moleculares físicos e virtuais, mas que a percepção espacial dos(as) estudantes não seja subestimada, tendo em vista as possibilidades de aquisição de erros conceituais associados à visualização de moléculas. É importante abordar os aspectos conceituais envolvidos em diferentes representações, bidimensionais e tridimensionais, levando-se sempre em consideração que para alcançar a fluência conexional é necessário prática constante com múltiplas representações. Para futuras pesquisas sobre o tema, vislumbra-se investigar o efeito da aprendizagem com moléculas virtuais, como realidade aumentada, no desenvolvimento de habilidades espaciais e superação de erros conceituais, em comparação com o estudo a partir de representações tridimensionais estáticas (em papel).

Agradecimentos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas.

Referências

- Akkuzu, N., & Uyulgan, M. A. (2016). An epistemological inquiry into organic chemistry education: exploration of undergraduate students' conceptual understanding of functional groups. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(1), 36–57. <https://doi.org/10.1039/C5RP00128E>
- Bent, H. A. (1961). An appraisal of valence-bond structures and hybridization in compounds of the first-row elements. *Chemical Reviews*, 61(3), 275–311. <https://doi.org/10.1021/cr60211a005>
- Birk, J. P., & Kurtz, M. J. (1999). Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. *Journal of Chemical Education*, 76(1), 124–128. <https://doi.org/10.1021/ed076p124>
- Clauss, A. D., Nelsen, S. F., Ayoub, M., Moore, J. W., Landis, C. R., & Weinhold, F. (2014). Rabbit-ears hybrids, VSEPR sterics, and other orbital anachronisms. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(4), 417–434. <https://doi.org/10.1039/C4RP00057A>
- Cooper, M. M., Grove, N., & Underwood, S. M. (2010). Lost in Lewis structures: An investigation of student difficulties in developing representational competence. *Journal of Chemical Education*, 87(8), 869–874. <https://doi.org/10.1021/ed900004y>
- Ferk, V., Vrtacnik, M., Blejec, A., & Gril, A. (2003). Students' understanding of molecular structure representations. *International Journal of Science Education*, 25(10), 1227–1245. <https://doi.org/10.1080/0950069022000038231>
- Hewson, P. W. (1992, June). *Conceptual change in science teaching and teacher education* [Paper presentation]. National Center for Educational Research, Documentation, and Assessment, Madrid, Spain.
- Karonen, M., Murtonen, M., Sodervik, I., Manninen, M., & Salomaki, M. (2021). Heuristics hindering the development of understanding of molecular structures in university level chemistry education: the Lewis structure as an example. *Education Sciences*, 11(6), 258. <https://doi.org/10.3390/educsci11060258>
- Kind, V. (2004). *Beyond appearances Students' misconceptions about basic chemical ideas* (2nd ed.). Durham Durham University.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Martina, A. R. (2017). Supporting student's learning with multiple visual representations. In J. C. Horvath, J. M. Lodge, & J. Hattie (Eds), *From the laboratory to the classroom: translating science of learning for teachers*. Routledge.

- Métioui, A., & Trudel, L. (2021). Two-tier multiple-choice questionnaires to detect the students' misconceptions about heat and temperature. *European Journal of Mathematics and Science Education*, 6(1), 23–34. <https://doi.org/10.12973/ejmse.2.1.23>
- Mutlu, A., & Sesen, B. A. (2015). Development of a two-tier diagnostic test to assess undergraduates' understanding of some chemistry concepts. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 174, 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.593>
- Özmen, H., Demircioğlu, H., & Demircioğlu, G. (2008). The effects of conceptual change texts accompanied with animations on overcoming 11th grade students' alternative conceptions of chemical bonding. *Computers & Education*, 52(3), 681–695. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.11.017>
- Peterson, R. F., & Treagust, D. F. (1989). Grade-12 students' misconceptions of covalent bonding and structure. *Journal of Chemical Education*, 66(6), 459–460. <https://doi.org/10.1021/ed066p459>
- Peterson, R. F., Treagust, D. F., & Garnett, P. J. (1986). Identification of secondary students' misconceptions of covalent bonding and structure concepts using a diagnostic instrument. *Research in Science Education*, 16, 40–48. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02356816>
- Peterson, R. F., Treagust, D. F., & Garnett, P. J. (1989). Development and application of a diagnostic instrument to evaluate grade-11 and -12 students' concepts of covalent bonding and structure following a course of instruction. *Journal of Research in Science Teaching*, 26(4), 301–314. <https://doi.org/10.1002/tea.3660260404>
- Reber, A. S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious*. Oxford University Press.
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, M. P. B. (2013). *Metodologia de pesquisa* (5ª ed.). Penso.
- Silva, K. S. (2018). *A neurociência cognitiva como base da aprendizagem de geometria molecular: um estudo sobre atributos do funcionamento cerebral relacionados à memória de longo prazo* (Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe). Repositório Institucional da Universidade Federal de Sergipe. <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/8229>
- Silva, K. S., & Fonseca, L. S. (2021). Neurociência e educação: estratégias multissensoriais para a aprendizagem de geometria molecular. *Investigações em Ensino de Ciências*, 26(1), 1–26. <https://doi.org/10.22600/1518-8795.ienci2021v26n1p01>
- Soeharto, S., Csapó, B., Sarimanah, E., Dewi, F. I., & Sabri, T. (2019). Review of students' common misconceptions in science and their diagnostic assessment tools. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 8(2), 247–266. <http://dx.doi.org/10.15294/jpii.v8i2.18649>

Stowe, R. L., Herrington, D. G., McKay, R. L., & Cooper, M. M. (2019). The impact of core-idea centered instruction on high school students' understanding of structure–property relationships. *Journal of Chemical Education*, 96(7), 1327–1340. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00111>

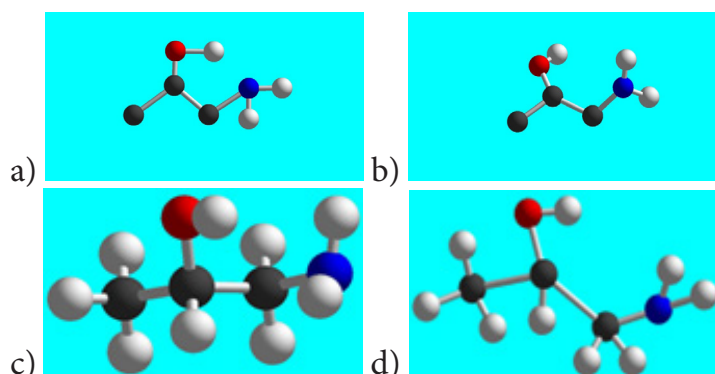
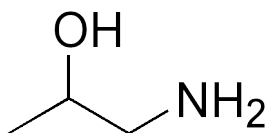
Suri, N. A., & Azhar, M. (2020). Description of senior high school students' understanding categories about chemical bonds using two-tier multiple choice diagnostic instrument. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 21(1), 26–34. <https://ijpsat.org/index.php/ijpsat/article/view/1847>

Uyulgan, M. A., Akkuzu, N., & Alpat, S. (2014). Assessing the students' understanding related to molecular geometry using a two-tier diagnostic test. *Journal of Baltic Science Education*, 13(6), 839–855. http://www.scientiasocialis.lt/jbse/files/pdf/vol13/839-855.Uyulgan_JBSE_Vol.13_No.6.pdf

Apêndice A

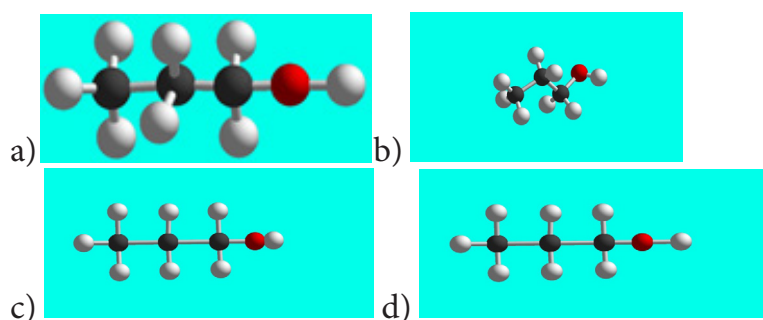
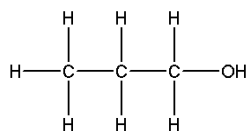
Teste diagnóstico de dois níveis (two-tier)

1) Qual é a forma mais coerente para representar a molécula abaixo em 3 dimensões (3D)?



Explique com o máximo de detalhes o motivo pelo qual você escolheu essa alternativa.

2) Qual é a forma mais coerente para representar a molécula abaixo em 3 dimensões (3D)?



Explique com o máximo de detalhes o motivo pelo qual você escolheu essa alternativa.

3) (Silva & Fonseca, 2021) - Dadas as representações abaixo, assinale as geometrias das moléculas CO₂ e H₂O:



- a) angular e linear.
- b) linear e angular.
- c) dobrada e reta.
- d) reta e dobrada.
- e) nenhuma das alternativas.

Por que as duas moléculas acima apresentam geometrias diferentes se ambas possuem um átomo central ligado a mais dois átomos?

4) As moléculas XeF₄ e CH₄ apresentam, respectivamente, as geometrias:

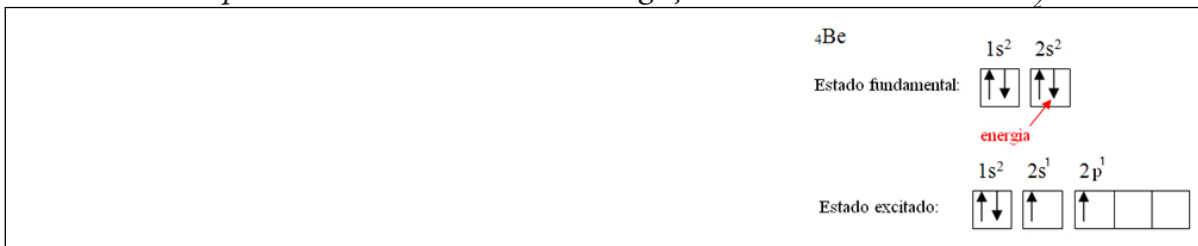
- a) tetraédrica e quadrática plana.
- b) quadrática plana e tetraédrica.
- c) tetraédrica e tetraédrica.
- d) quadrática plana e quadrática plana.

- Desenhe as estruturas de Lewis das duas moléculas acima (ex. H₂ = H••H). Depois indique se as moléculas desenhadas são polares ou apolares. Justifique.

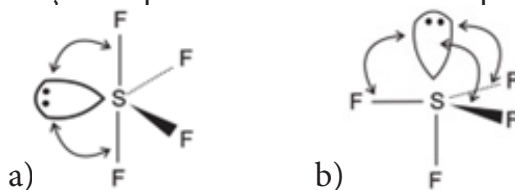
5) As geometrias do BeH₂ e do SF₂ são, respectivamente,

- a) Linear e Angular
- b) Angular e Linear
- c) Angular e Angular
- d) Linear e Linear

Quando feita a distribuição eletrônica do Berílio (Be) percebe-se que, no estado fundamental, o subnível 2s² fica completamente preenchido. Considere a figura abaixo e explique em detalhes como é possível o Be estabelecer duas ligações, como no caso do BeH₂.

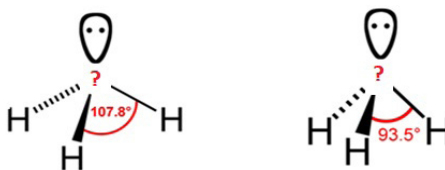


6) Qual das duas representações espaciais abaixo melhor representa a molécula SF₄?



Justifique sua resposta:

7) As interrogações podem ser substituídas, respectivamente, pelos átomos:



- a) N e P
- b) P e N
- c) nenhuma das alternativas

Justifique sua resposta:

 **Kleyfton Soares da Silva**

Universidade de São Paulo
Maceió, Alagoas, Brasil
kley.soares@usp.br

 **Paulo Rogério Miranda Correia**

Universidade de São Paulo
São Paulo, São Paulo, Brasil
prmc@usp.br

Editora Responsável

Márcia Gorette Lima da Silva

Manifestação de Atenção às Boas Práticas Científicas e de Isenção de Interesse

Os autores declaram ter cuidado de aspectos éticos ao longo do desenvolvimento da pesquisa e não ter qualquer interesse concorrente ou relações pessoais que possam ter influenciado o trabalho relatado no texto.
