MARCELO DIAS PULIDO

O dualismo eletroquímico de Berzelius

Sua caracterização e presença em livros didáticos de química

Dissertação apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ensino de Ciências.

Versão corrigida. A versão original se encontra disponível na Biblioteca do Instituto de Física e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD).

Área de concentração: Ensino de Química

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves Porto

São Paulo

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Pulido, Marcelo Dias

O dualismo eletroquímico de Berzelius: sua caracterização e presença em livros didáticos de química. São Paulo, 2016.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo. Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves Porto

Área de Concentração: Ensino de Química

Unitermos: 1. Ensino e Aprendizagem; 2. História da Ciência; 3. Livro Didático; 4. Química.

USP/IF/SBI-046/2016

À minha querida mãe, Glória (já parte da história),
que me ensinou o valor dos livros.

AGRADECIMENTOS

Ao Paulo Porto, professor doutor e amigo, que me acolheu no Grupo de Pesquisa em História da Ciência e Ensino de Química (GHQ) e me deu todo o apoio e autonomia no desenvolvimento deste projeto.

A todos os colegas do GHQ, pelas oportunidades de discussão que me ajudaram a construir minha visão da história da ciência e da pesquisa acadêmica, e, em especial, ao amigo Evandro Rozentaliski, sempre disponível (em meio a discussões culinárias!) para compartilhar comigo seu conhecimento e para discutir meu projeto, enriquecendo-o com suas observações.

Aos professores Maria Elice Brzezinski Prestes e Flavio Antonio Maximiano, pelas valiosas observações e correções e pela forma ao mesmo tempo profissional e cordial com que as indicaram.

À professora Maria do Carmo Galiazzi, pela paciência de discutir comigo a análise textual discursiva, e pela generosidade e delicadeza com que o fez.

À professora Jesuína Pacca, que me apresentou a análise textual discursiva e, com sua maneira assertiva, mas sempre bem humorada, me estimulou a persistir sobre todas as dificuldades e inseguranças.

Aos professores Fumikazu Saito e Maria Helena Roxo Beltran, do Cesima, pelas orientações, oportunidades e críticas que ajudaram a consolidar minha visão da historiografia e as bases deste projeto.

À Editora Moderna, na pessoa da gerente e amiga Rita Helena Bröckelmann, pelo apoio incondicional (mesmo quando as minhas decisões pareciam carecer de sanidade), por proporcionar laboratório ideal para aplicar os conhecimentos que surgiam deste trabalho e pelo empréstimo dos livros didáticos analisados.

À minha irmã Margarete, que me apresentou as primeiras letras, sem as quais todas as que reúno neste trabalho jamais existiriam, e ao meu pai, José, que enfrentou todas as dificuldades pela minha educação.

Finalmente, mas não menos importante, à Leila, minha companheira de todas as horas, que me incentiva em todos os meus projetos e por quem todos eles valem mais a pena.

*Eu serenamente deixo meus sinceros esforços
para que sejam julgados pelo futuro.*

Jöns Jacob Berzelius, *Notas autobiográficas*.

*Do lado do juízo, o erro é um acidente possível,
mas do lado da memória, a alteração é de essência.*

Georges Canguilhem, *Ideologia e racionalidade nas ciências da vida*.

RESUMO

PULIDO, M. D. *O dualismo eletroquímico de Berzelius: sua caracterização e presença em livros didáticos de química*. 163 f. Dissertação (Mestrado). Programa Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

A teoria dualista, estruturada pelo químico sueco Jöns Jacob Berzelius, foi bastante utilizada durante a primeira metade do século XIX, mas foi gradativamente abandonada à medida que passou a não dar conta dos fenômenos observados especialmente para os compostos orgânicos, cujo estudo avançava à época. No entanto, a presença de elementos dessa teoria em livros didáticos de química atuais foi apontada por pesquisadores da área de Ensino de Ciências. Tendo em vista o papel do livro didático na educação científica, e que a ausência de conceitos desatualizados é critério utilizado pelo Ministério da Educação para a seleção das obras didáticas utilizadas por alunos e professores na rede pública de ensino, investigamos o que foi a teoria dualista de Berzelius e em qual período esteve vigente, de forma a fundamentar a busca de elementos dessa teoria em livros didáticos de química para o Ensino Médio. Para tanto, analisamos fontes históricas primárias e secundárias, à luz da epistemologia de Canguilhem e de referenciais contemporâneos da historiografia da ciência, por meio da análise textual discursiva, de forma a produzir um estudo de caso histórico que permitisse caracterizar a teoria dualista e sua relevância em seu contexto original e na atualidade. A partir dessa caracterização, procuramos identificar possíveis reminiscências dessa teoria nos quatro livros didáticos de química aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático para 2015. Constatamos, em três deles, a presença de termos e conceitos que remetem à teoria dualista de Berzelius, de forma hibridizada a conceitos de teorias atuais. Discutimos algumas implicações dessa constatação para o ensino de química e possibilidades de abordagem didática à luz do estudo de caso produzido.

Palavras-chave: História da química, Berzelius, Teoria dualista, Livro didático.

ABSTRACT

PULIDO, M. D. *Berzelius's electrochemical dualism: its characterization and presence in chemistry textbooks*. 163 p. Master thesis. Programa Interunidades em Ensino de Ciências (Graduate Program in Science Education), University of São Paulo, São Paulo, 2016.

The dualistic theory, structured by Swedish chemist Jöns Jacob Berzelius, was widely used during first half of the 19th century. As the study of organic compounds advanced, the dualistic theory was gradually abandoned, as it was not capable to explain the new observed phenomena. However, Science Teaching researchers pointed to the presence of elements of this theory in current chemistry textbooks. Considering the role of textbooks in scientific education, and that the absence of outdated concepts is a criterion utilized by the Brazilian Ministry of Education to select textbooks used by students and teachers in public schools, this dissertation aimed at investigating what was Berzelius's dualistic theory and in which period it was considered as valid, to substantiate the search of elements of this theory in high school chemistry textbooks. Primary and secondary historical sources were analyzed, in the light of Canguilhem's epistemology and contemporary historiography of science, by means of discursive textual analysis. Such analysis resulted in a historical case study characterizing the dualistic theory and evaluating its relevance in its original context and in the present. From this characterization, we attempted to identify possible reminiscences of this theory in the four books approved by the Brazilian Textbook National Program for 2015. Terms and concepts that refer to Berzelius's dualistic theory were found hybridized with concepts from present-day theories in three of the four books. Some implications of this finding to chemistry teaching and possible didactic approaches to the produced case study were discussed.

Keywords: History of chemistry, Berzelius, Dualistic theory, Textbook.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Relação entre os objetos da ciência e da historiografia da ciência (MARTINS, 2004, p. 140).	25
Figura 2.2. Representação gráfica das abordagens historiográficas horizontal e vertical, com base em Kragh (2001), aplicada ao presente trabalho. O instante t_0 representa a primeira publicação da teoria dualista de Berzelius, e $t^\dagger$ representa o momento em que parte significativa da comunidade química já a abandonou; t' representa o momento atual, e t_1 e t_2 , o período escolhido para a investigação histórica. O eixo vertical apresenta alguns dos tópicos tratados neste trabalho em conexão com o conteúdo científico da teoria dualista.	33
Figura 2.3. Representação da integração entre a historiografia, epistemologia e análise textual discursiva que forma nosso quadro teórico-metodológico.	53
Figura 2.4. Fases de condução da pesquisa historiográfica.	56
Figura 2.5. Fluxograma de análise dos livros didáticos.	63
Figura 2.6. Exemplo de codificação das unidades de análise obtidas a partir dos livros didáticos.	64
Figura 3.1. Constituição dualística dos sais (adaptado de KLEIN, 2003, p. 154). ...	77
Figura 3.2. Família da prata (BERZELIUS, 1814, tradução livre do latim).	83
Figura 3.3. Limite geométrico de coordenação entre esferas: 12 esferas de igual diâmetro se organizam ao redor de uma esfera central, nos vértices de um cuboctaedro (BARNES, 2012).	85
Figura 3.4. Algumas relações entre Berzelius e a França.	92
Figura 3.5. Representação gráfica do percurso do dualismo eletroquímico.	107
Figura 4.1. Reprodução de trecho da obra de Fonseca (2013, p. 296) sobre a dupla-troca.	116
Figura 4.2. Série de reatividade dos metais apresentada em Fonseca (2013, p. 312).	120

Figura 4.3. Apresentação das reações de metátese em Antunes (2013, p. 189).	124
Figura 4.4. Esquema para a neutralização apresentado em Antunes (2013, p. 225). As cores originais dos símbolos no livro didático são: Na – vermelho; Cl – verde-oliva; OH, H, HOH, H^+ , OH^- , H_2O – verde. O restante do texto é impresso em preto.	131
Figura 4.5. Exemplos de reações de neutralização total e parcial em Antunes (2013, p. 226).	132
Figura 4.6. Esquema de reação de neutralização em Santos e Mól (2013, p. 291). Observa-se um erro tipográfico importante: o produto da neutralização aparece como sendo “ H_2 ” em vez de “ H_2O ”	141
Figura 4.7. Semelhança entre sais orgânicos e inorgânicos ressaltada em Santos e Mól (2013, p. 298).	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1. Sistema inicial de categorias para a dimensão teórico-metodológica.	58
Quadro 2.2. Sistema inicial de categorias para a dimensão do dualismo eletroquímico.....	59
Quadro 2.3. Títulos investigados em cada obra.	63
Quadro 4.1. Resultados da análise dos livros didáticos.	143

LISTA DE SIGLAS

ABRAPEC	Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências
ATD	Análise Textual Discursiva
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
ENPEC	Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciência
GHQ	Grupo de Pesquisa em História da Ciência e Ensino de Química
IQ-USP	Instituto de Química da Universidade de São Paulo
JHCE	Jornada de História da Ciência e Ensino
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
PNLD	Programa Nacional do Livro Didático
PUC-SP	Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
SMEQ	Simpósio Mineiro de Ensino de Química
UA	Unidade de Análise
UFJF-MG	Universidade Federal de Juiz de Fora – Minas Gerais
US	Unidade de Significado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. Introdução	15
1.1. Visões e caminhos	15
1.2 Origem da investigação	16
1.3. Desatualização de conceitos em livros didáticos.....	17
1.4. Objetivos da pesquisa.....	20
1.5. Justificativa.....	21
CAPÍTULO 2. Fundamentação teórico-metodológica	23
2.1. Historiografia da ciência.....	23
2.1.1. Objeto da historiografia da ciência	23
2.1.2. Anacronismo e diacronismo	25
2.1.3. Precursionismo.....	28
2.1.4. Internalismo e externalismo.....	29
2.1.5. Fontes.....	34
2.2. Epistemologia da ciência	35
2.2.1. Relação entre epistemologia e história da ciência	35
2.2.2. Modelo do tribunal	37
2.2.3. Delimitação do objeto de estudo	39
2.2.4. Critérios de validação de uma teoria e construção da ciência	40
2.2.5. Análise historiográfica	43
2.3. História da ciência e ensino	46
2.3.1. Papel da história da ciência no ensino	46
2.3.2. História da ciência e formação de professores	48
2.3.3. História da ciência nos livros didáticos.....	50
2.4. Análise textual discursiva (ATD)	51
2.4.1. Contribuição da ATD	51

2.4.2. Historiografia, epistemologia e ATD	52
2.4.3. Percurso metodológico: o estudo de caso histórico	53
2.4.4. Percurso metodológico: a análise dos livros didáticos	61
CAPÍTULO 3. O dualismo eletroquímico de Berzelius	65
3.1. O cenário sueco no contexto europeu	65
3.2. A formação científica de Berzelius	69
3.3. A construção do dualismo eletroquímico	72
3.3.1. O conceito dualista	72
3.3.2. Eletronegatividade	77
3.3.3. O dualismo eletroquímico na mineralogia	81
3.3.4. Proporções químicas e atomismo	83
3.3.5. Afinidade química	87
3.4. O reconhecimento científico de Berzelius	90
3.5. O dualismo eletroquímico na química orgânica	93
3.6. A superação do dualismo eletroquímico	97
3.6.1. Contestação na química orgânica	97
3.6.2. Limitações em outras áreas da química	104
3.6.3. A teoria da dissociação eletrolítica	107
CAPÍTULO 4. Análise dos livros didáticos e implicações para o ensino de química.	111
Química: ensino médio (MORTIMER; MACHADO, 2014)	111
Introdução às transformações químicas	111
Ligações químicas, interações intermoleculares e propriedades dos materiais	112
Modelos para o átomo e uma introdução à tabela periódica	113
Química (FONSECA, 2013)	116
Compostos inorgânicos	116

Metais e oxirredução	118
Notações químicas	121
Eletricidade e radioatividade	122
<i>Ser protagonista</i> (ANTUNES, 2013)	123
Balanceamento de equações e tipos de reações químicas	123
Ácidos e bases	130
Sais e óxidos	131
Modelos atômicos e características dos átomos.....	134
<i>Química cidadã</i> (SANTOS; MÓL, 2013)	137
Substâncias inorgânicas.....	137
CAPÍTULO 5. Considerações finais.....	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
APÊNDICE I. Fichamento	161
APÊNDICE II. Categorização.....	162
APÊNDICE III. Classificação das referências.....	163

CAPÍTULO 1. Introdução

A história nunca se presta realmente à imediata identificação conosco e nossos próprios pensamentos e sentimentos. A verdadeira e frutífera experiência histórica é a experiência de alguma coisa que é bastante estranha a nós e ainda assim fundamentalmente próxima à nossa existência humana.

Sven-Eric Liedman, Professor Emérito de História das Ideias, Universidade de Gotemburgo, Suécia.

1.1. Visões e caminhos

Desde muito cedo, “porque sim” já não era para mim uma resposta satisfatória. A teimosia em pensar sobre os processos, no lugar de simplesmente aceitá-los, guiou meus passos pelo caminho mais óbvio: o da ciência.

Nesse caminho, me perdi. Ao contrário do que o senso comum costuma supor, a estrada da ciência não é única, e muitos outros caminhos vão dar a ela, e dela se desviam. Isso faz de sua construção algo intrigante, interdisciplinar e fascinante. Buscar seus porquês, meu impulso essencial, exige enxergar essa estrada por diversos ângulos, parar em suas esquinas, lançar olhares para o caminho percorrido e, por vezes, tomar estradas vicinais, superando a ansiedade de não saber aonde elas nos irão levar. Mais do que isso: quando o objetivo é conhecer o caminho, pode ser melhor não chegar.

Assim é, para mim, a história da ciência. E a historiografia da ciência é a oportunidade de preencher minhas próprias lacunas de conhecimento e contribuir com a educação de forma sólida e consciente. O caminhar me preenche.

Esta investigação é uma forma de contribuir com a educação em ciências, à medida que busca caracterizar o dualismo eletroquímico, cerne do trabalho do célebre químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848), na primeira metade do século XIX, e rastrear seus resquícios em livros didáticos utilizados atualmente no Ensino Médio. Nesse percurso, reflexões sobre a necessidade da escolha consciente e crítica do currículo devem se tornar evidentes. É essa a dupla contribuição que pretendemos: historiográfica e curricular, de forma integrada e interdependente.

1.2. Origem da investigação

Esta investigação se iniciou a partir da discussão, dentro do Grupo de Pesquisa em História da Ciência e Ensino de Química (GHQ) do Instituto de Química da Universidade de São Paulo (IQ-USP), do artigo de Mortimer e colaboradoras, *A proposta curricular de química do Estado de Minas Gerais: fundamentos e pressupostos*, que apontava a perpetuação de conceitos desatualizados em livros didáticos de química promovida pelo uso acrítico de fórmulas didáticas, como o esquema da dupla-troca, que seria baseado no dualismo eletroquímico de Berzelius (MORTIMER *et al.*, 2000). Ora, a presença de conceitos desatualizados é um dos critérios eliminatórios do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) para a seleção dos materiais didáticos que serão distribuídos aos alunos da rede pública de ensino. Isso nos motivou a buscar caminhos para a identificação de possíveis reminiscências do dualismo eletroquímico de Berzelius nessas obras, quinze anos após a publicação do artigo citado. Assim, poderíamos contribuir não só para o entendimento da evolução do cenário da educação nesse aspecto em particular, como também com uma experiência que poderia ser reproduzida em relação à investigação de outros conceitos presentes em livros didáticos.

De imediato, para a concretização de nossos objetivos, percebemos a necessidade de uma caracterização da teoria dualista de Berzelius e do período em que esteve vigente, como critérios para determinar sua eventual presença em livros didáticos e identificá-la como uma teoria superada dentro do corpo de conhecimentos da química atual. A partir dessa caracterização, poderíamos então proceder à análise de livros didáticos e discutir possíveis implicações. Pareceu-nos evidente, pela natureza do problema, que a abordagem pela contemporânea historiografia da ciência seria indispensável para que essa investigação se concretizasse e pudesse contribuir efetivamente para os objetivos educacionais da atualidade, que se contrapõem ao modelo tradicional, dogmático e memorístico (PORTO, 2010).

Assim sendo, esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos. Neste primeiro, detalhamos a questão da desatualização de conceitos em livros didáticos e sua relação com a teoria dualista de Berzelius, apresentamos os objetivos desta investigação e procuramos justificar a importância deste trabalho para a educação em química. O capítulo 2 é dedicado à fundamentação teórico-metodológica, que reúne

fundamentos da historiografia, da epistemologia e da análise textual discursiva (ATD) e procura relacioná-los. No capítulo 3, trazemos os resultados da análise historiográfica: conceituamos o dualismo eletroquímico, discutindo aspectos internos e externos à ciência que influenciaram seu desenvolvimento, aceitação, contestação e superação. Assim, a caracterização do dualismo é também a caracterização da sua validade, historicamente delimitada, e do seu contexto, um estudo de caso histórico que contribui para a compreensão da ciência como construção humana. O capítulo 4 traz os resultados e implicações da análise dos livros didáticos. No capítulo 5 apresentamos nossas considerações finais.

1.3. Desatualização de conceitos em livros didáticos

De acordo com Cuellar Fernández e colaboradores (2010), há uma relação entre a ciência e a ciência escolar, pois “o modelo de ciência define que conteúdos se ensinam e sob que enfoque didático” (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010, p. 278). Nessa perspectiva, se uma teoria não faz mais parte do corpo de uma ciência, seus conceitos não deveriam fazer parte da ciência ensinada nas escolas, salvo sob uma perspectiva histórica.

Mortimer e colaboradoras (2000) apontam que os currículos de química, ao enfatizarem aspectos conceituais, estão desassociados de suas origens científicas, de compromisso com a compreensão da matéria e a produção de novos materiais diante das demandas da sociedade. Eles criticam a repetição acrítica de fórmulas didáticas:

A repetição acrítica de fórmulas didáticas, que dão resultado, acaba por transformar a química escolar em algo cada vez mais distante da ciência química e de suas aplicações na sociedade. Nossa química escolar se alimenta principalmente da tradição. (MORTIMER *et al.*, 2000, p. 274–275)

Prova dessa tradição seria a presença, em livros didáticos, de sistemas de classificação do século XIX, como a classificação das reações em dupla-troca ou deslocamento, sistema que

se baseia no dualismo eletroquímico de Berzelius (1812), que propunha que as substâncias resultavam da combinação entre pares de espécies em que uma é eletricamente positiva e a outra negativa. As reações de dupla-troca ($AB + CD = AD + CB$) e de deslocamento ($AB + C = CB + A$), ocorreriam porque um radical mais eletropositivo deslocaria o radical menos eletropositivo. Já a partir da teoria de dissociação eletroquímica de Arrhenius (1883), as reações em meio aquoso não poderiam mais ser pensadas com dupla-

troca ou deslocamento, já que todas as espécies em solução estariam dissociadas e não haveria trocas ou deslocamentos, mas combinações entre íons para formar, por exemplo, sais pouco solúveis. (MORTIMER *et al.*, 2000, p. 275)

Segundo esses autores, os currículos tradicionais admitem que as classificações, como a que se reflete no esquema da dupla-troca, são absolutas, e as substâncias que partilham das mesmas características sempre têm o mesmo comportamento. De fato, porém, essas características são relacionais, só se justificam em relação ao comportamento de outras substâncias. Diante disso, os autores recomendam que se evite o excesso de sistemas classificatórios.

Esse “movimento classificatório” teria ocorrido com o tecnicismo da década de 1970, quando os conteúdos tinham que ser convertidos em questões de testes de múltipla escolha. Não se buscava compreender as razões dessas classificações, que se propunham a sistematizar e interligar as diversas teorias: a ênfase era em procedimentos mecânicos, e o resultado teria sido a aversão dos alunos à química (MORTIMER *et al.*, 2000).

Lopes (1995) afirma que é preciso relativizar a importância de formalismos de cunho classificatório em favor da compreensão de conceitos. Ela critica o uso indistinto de equações nas formas $AB + CD = AD + CB$ e $AB + C = A + CB$ (que teriam sido utilizadas por Berzelius para esquematizar as reações de dupla-troca e de deslocamento, de acordo com a sua teoria dualista) para reações em meio aquoso e sólido, afirmando que ao fazer isso estamos “simplesmente seguindo Berzelius, sem atentar para desenvolvimentos posteriores da química, como por exemplo a teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius e as teorias da ligação química” (LOPES, 1995, p. 8)¹, pois não há, em solução, trocas ou deslocamentos. A representação da dupla-troca dificultaria a compreensão pelo aluno dos processos envolvendo íons em solução, e “mesmo que no nível fundamental não trabalhemos com teorias de dissociação, perde o sentido nos preocuparmos com classificações que não têm utilidade nem na vida prática nem no campo científico” (LOPES, 1995, p. 8).

¹ Esse artigo é citado por Mortimer e colaboradoras (2000) como fonte da relação proposta entre o dualismo eletroquímico de Berzelius e os esquemas de dupla-troca e deslocamento.

Mortimer e colaboradoras (2000) não criticam a presença das regras no ensino de química, mas sim o fato de estas terem tomado o lugar dos princípios químicos aos quais se referem. Os autores diferenciam, assim, o conhecimento *ritual* e o conhecimento de *princípios*, sugerindo que o primeiro é injustificável, mas o segundo, ao enfatizar o princípio por trás da regra, admite as regras procedimentais. Os rituais memorísticos, dissociados de seus fundamentos, contribuiriam “para aprofundar a má fama da Química, entre os estudantes do Ensino Médio: algo desinteressante e sem sentido, que apenas exige esforço de memória” (MORTIMER *et al.*, 2000, p. 275). Assim, mesmo que o sistema de classificação dualista ainda fosse válido, sua presença nos livros didáticos só se justificaria se os princípios aos quais esse sistema se refere fossem discutidos.

A presença de conceitos desatualizados em livros didáticos é também um dos “critérios eliminatórios comuns a todas as áreas”, adotado pelo PNLD:

2.1.5. Correção e atualização de conceitos, informações e procedimentos.

Respeitando tanto as conquistas científicas das áreas de conhecimento representadas nos componentes curriculares quanto os princípios de uma adequada transposição didática, serão excluídas as obras que:

(1) apresentarem de modo incorreto, descontextualizado ou desatualizado conceitos, princípios, informações e procedimentos;

(2) utilizarem de modo incorreto, descontextualizado ou desatualizado esses mesmos conceitos e informações, em exercícios, atividades, ilustrações ou imagens. (BRASIL, 2013, p. 42)²

Sendo assim, os livros utilizados nas escolas públicas aderidas ao PNLD não poderiam conter conceitos desatualizados, pois passaram por avaliação de especialistas em educação em cada componente curricular específico.

Apresentamos até aqui nossas visões iniciais e as bases das implicações históricas e didáticas que sinalizaram os caminhos da investigação em curso. Com base no exposto, nos parece especialmente frutífero um estudo de caso, sobre bases historiográficas contemporâneas, que permita a análise da presença de conceitos desatualizados em livros didáticos de ciências, de forma a contribuir para a sua discussão crítica.

² Ao final de 2015 foi publicado o Edital para o PNLD 2018 que, para o trecho citado, apresenta a mesma redação, exceto por acrescentar, no item (2), que a desatualização também não pode ocorrer em textos. Mantivemos a citação do Edital de 2015 por se referir aos livros didáticos que foram analisados nesta investigação.

1.4. Objetivos da pesquisa

O delineamento dos objetivos da pesquisa se constituiu a partir das primeiras leituras das fontes históricas e referenciais historiográficos e metodológicos, no âmbito do GHQ. Procuramos realizar uma caracterização clara da teoria dualista de Berzelius, relacionando-a ao seu contexto histórico, para que pudéssemos identificar com segurança elementos dessa teoria em outros contextos e embasar a afirmação de que se trata de uma teoria superada dentro do corpo atual de conhecimentos da química. As questões de pesquisa que nortearam a investigação são:

1. O que foi a teoria dualista de Berzelius?
2. Em qual período esteve vigente?
3. O dualismo eletroquímico sobrevive em livros didáticos de química para o Ensino Médio? De que forma?
4. Que implicações isso traz para o ensino de química?

Assim, nosso objetivo geral de pesquisa foi investigar a presença, em livros didáticos atuais, de elementos da teoria dualista de Berzelius, uma teoria que não mais faz parte do corpo da química moderna. Para tanto, definimos quatro objetivos específicos:

1. Caracterizar a teoria dualista de Berzelius dentro do contexto histórico em que foi produzida.
2. Estabelecer a relevância desse conceito no contexto da química da época de Berzelius e na atualidade.
3. Analisar livros didáticos de química atuais direcionados ao Ensino Médio, procurando identificar conceitos remanescentes da teoria dualista.
4. Discutir a validade e as implicações da presença dessa teoria nos livros didáticos.

Os objetivos da pesquisa estão, portanto, inicialmente direcionados para a caracterização da teoria dualista de Berzelius (objetivo específico 1), sem o que não seria possível a identificação de sua presença ou ausência nos livros didáticos atuais³.

³ Por livros didáticos atuais entendemos os livros adotados no período de 2015 a 2017 nas escolas brasileiras de Ensino Médio, constituídos de um conjunto de quatro obras aprovadas pelo PNLD em 2014. Uma melhor caracterização desse conjunto de livros será oferecida adiante, no tópico 2.4.4.

Para que pudéssemos compreender a vigência do dualismo eletroquímico e, conseqüentemente, a validade ou não de ensiná-lo no Ensino Médio, procuramos estabelecer sua relevância no contexto em que foi concebido e na atualidade (objetivo específico 2). Como mostraram os resultados desta investigação, a teoria dualista não encontra mais espaço, hoje em dia, dentro do corpo de conhecimentos da química e, por isso, sua presença nos livros didáticos só seria justificada por meio de uma abordagem histórica. No entanto, nossa hipótese, baseada inicialmente em Mortimer e colaboradoras (2000), é que resquícios dessa teoria ainda estão presentes em livros didáticos, de forma híbrida com outras teorias, e com caráter essencialmente memorístico, como no esquema das reações de dupla-troca.

Para elucidar essa hipótese e compreender as suas implicações, nos propuemos a analisar um conjunto significativo de livros didáticos de química para o Ensino Médio em busca de sinais da presença da teoria dualista (objetivo específico 3), com base na caracterização dessa teoria (objetivo específico 1). A partir dos resultados dessa análise, e com base nos referenciais teóricos, foi possível discutir a validade e as implicações da presença dessa teoria nos livros didáticos (objetivo específico 4).

1.5. Justificativa

Martins (2006) e Porto (2010) apontam a escassez de textos didáticos construídos em consonância com a historiografia contemporânea da ciência, e elencam diversos problemas presentes em boa parte das fontes históricas mais acessíveis aos professores, como erros factuais; apresentação dos fatos de forma descontextualizada; apresentação dos cientistas como heróis ou gênios, que trabalham isoladamente; menosprezo pelos paradigmas científicos do passado; concepção de uma construção contínua da ciência em direção a uma ciência contemporânea mais correta. Os estudos de caso histórico podem, portanto, fornecer subsídios para embasar a produção de textos didáticos que considerem a química a partir de uma perspectiva historiográfica contemporânea, contribuindo para desenvolver uma postura crítica dos professores no que diz respeito aos conteúdos específicos de suas áreas e promovendo a incorporação de aspectos da história e da filosofia da ciência no ensino. Entretanto, estudos de caso que apresentem controvérsias de forma mais aprofundada e condizente com os pressupostos da historiografia contemporânea da

ciência são raros em livros didáticos, o que reforça a importância da produção de fontes secundárias adequadas sob esse ponto de vista (VIDAL; PORTO, 2012).

A presença de conteúdos químicos desatualizados em livros didáticos – como é o caso do esquema da dupla-troca, sustentado por um modelo de ensino memorístico que se deseja superar – é indesejável e perniciosa ao ensino. Nesse sentido, a avaliação dos livros didáticos – seja ela oficial, como critério para a publicação e oferta de livros didáticos de qualidade à escola pública, seja ela conduzida pelo professor como forma pessoal de seleção dos materiais que utiliza em sala de aula – é um tema atual e importante, pois viabiliza políticas públicas de educação, qualifica o professor e colabora para um ensino de melhor qualidade, ao promover a aprendizagem, pelo aluno, de conteúdos realmente atuais e relevantes.

Dessa forma, o dualismo eletroquímico representa um rico estudo de caso histórico, em que aspectos epistemológicos, como os critérios de validação de conceitos e aceitação de teorias pela comunidade científica, podem ser relacionados a controvérsias e à influência do contexto histórico. Nesse cenário, desenvolvem-se oportunidades para o ensino de conceitos químicos, bem como para a reflexão, por parte do professor, a respeito da pertinência desses conceitos e de suas abordagens. Tendo isso em vista, o próximo capítulo é dedicado à apresentação dos referenciais teórico-metodológicos que fornecem a sustentação às análises e discussões aqui propostas.

CAPÍTULO 2. Fundamentação teórico-metodológica

Para que possamos realizar uma leitura mais adequada dos dados trazidos pela interpretação das fontes históricas, apresentaremos nesta seção a fundamentação da teoria e da metodologia que guiou nossa seleção, descrição e interpretação dessas fontes. Iniciaremos pelos aspectos historiográficos, mas já sugerindo algumas de suas relações com a epistemologia da ciência e com a análise textual discursiva (ATD), bem como com o ensino de ciências.

2.1. Historiografia da ciência

2.1.1. Objeto da historiografia da ciência

De acordo com Kragh (2001), o termo “história” é utilizado tanto para se referir aos acontecimentos objetivos, ou seja, que realmente ocorreram no passado (H_1), quanto no sentido de análise interpretativa dos fatos históricos objetivos (H_2). Assim, H_2 pode ser compreendida como a historiografia, cujo objeto é H_1 . A historiografia, por sua vez, pode abranger tanto as descrições e interpretações dos historiadores a respeito de H_1 quanto reflexões sobre sua própria natureza, ou seja, ser uma metadisciplina⁴.

Também a ciência pode ser, segundo o mesmo autor, entendida de duas formas: como o conjunto de afirmações estabelecidas a respeito dos fenômenos naturais, sobre o qual o conhecimento científico se sustenta (C_1); e como a atividade dos cientistas relacionadas aos empreendimentos científicos (C_2), atividades estas de caráter dinâmico, que levam os cientistas ao conhecimento estabelecido C_1 . A ciência C_2 se refere ao comportamento humano, e por isso não pode ser apreendida diretamente de artigos e outras formas de divulgação e registros científicos formais, que explicitam somente C_1 .

⁴ A história da ciência também pode ser considerada um metadiscorso sobre a ciência, pois promove reflexão sobre como a ciência é construída, transmitida e transformada. Essa é uma das contribuições da epistemologia da ciência quando resgata, a partir da década de 1960, a importância da história como ferramenta para compreender o desenvolvimento científico (BELTRAN; SAITO, 2011). A relação entre epistemologia e história da ciência será retomada com maior profundidade no tópico 2.2.

A historiografia da ciência se ocupa do conhecimento científico C_1 , mas principalmente de sua construção como atividade humana, C_2 . Assim, C_1 e C_2 são, ambas, objeto (H_1) da historiografia da ciência (H_2)⁵.

Martins (2004) detalha ainda mais essa relação entre a historiografia da ciência e seu objeto: o objeto da ciência seria constituído por um Universo a ser estudado. Para esse estudo, o cientista⁶ lançaria mão de observações e experimentos, mas também de outras obras científicas, e seria influenciado por elementos externos à ciência inerentes ao seu contexto histórico. Esse conjunto de elementos se concretizaria em sua obra científica, uma tentativa de descrição e compreensão da natureza.

Todo esse processo constitui o objeto de estudo da historiografia da ciência. Para investigá-lo, o historiador lança mão de documentos e outros vestígios não verbais produzidos à época, mas também de outras obras historiográficas. Além disso, está imerso em seu próprio contexto histórico, que também o influencia na produção de sua obra historiográfica. Martins ilustra essas relações conforme mostramos na figura 2.1.

No entanto, conforme Kragh (2001), o historiador “vê” a história assim como o químico “vê” as moléculas. Ou seja, não se trata, em ambos os casos, de um objeto concreto. Assim como a ciência (C_1) é uma interpretação limitada de uma suposta realidade, proporcionada pelos instrumentos e meios de que o cientista dispõe, apenas parte da história que, supostamente, teve existência real pode ser acessada pelo historiador que, assim, “vê” a história que lhe é mostrada por seus documentos. O resultado dessa visão é “*uma* história” (em contraponto com “*a* história”), uma interpretação capaz de embasar teorias acerca de fenômenos histórico-científicos.

⁵ Essa visão é semelhante à de Canguilhem para as relações entre os objetos da ciência e da história da ciência, e será retomada no tópico 2.2.1.

⁶ Martins (2004) ressalta que o termo “cientista” deve ser entendido aqui em seu sentido mais amplo, já que o significado do termo mudou ao longo do tempo. Da mesma forma, entendemos que o termo “ciência” pode assumir diferentes significados no decorrer da história mas, com o autor, concordamos que, nesse contexto, o uso da expressão não deve trazer problemas.

Figura 2.1. Relação entre os objetos da ciência e da historiografia da ciência (MARTINS, 2004, p. 140).

2.1.2. Anacronismo e diacronismo

A história da ciência assumiu diferentes posicionamentos ao longo de sua própria história, conforme a corrente de pensamento vigente (ALFONSO-GOLDFARB *et al.*, 2004; DEBUS, 1991). De acordo com Melhado (1992), a figura histórica de Berzelius e do dualismo eletroquímico até recentemente teria sido traçada pela tradição historiográfica do século XIX, com viés presentista, como na famosa biografia de Söderbaum (na qual muitas outras obras se baseiam) e nas obras de Partington⁷ e Jorpes (1966). No entanto, de acordo com Martins (2006),

⁷ As obras citadas são: SÖDERBAUM, H. G. *Berzelius' Werden und Wachsen 1779-1821*. Leipzig: J. A. Barth, 1899; PARTINGTON, J. R. *A History of Chemistry*. 4. v. New York: MacMillan, 1961-1970.

é difícil ou impossível caracterizar em uma só frase ou em poucas palavras o que foi uma determinada mudança científica; e há estreita correlação entre acontecimentos de muitos tipos diferentes, o que torna difícil isolar uma “descoberta” e descrevê-la fora de seu contexto. (MARTINS, 2006, p. XXIX)

Assim, na caracterização de uma teoria científica e na determinação de sua validade, bem como para qualquer outra investigação que envolva a história da ciência, é importante o esforço de considerar a ciência como ela era considerada no contexto em que foi gerada e aceita, ou seja, diacronicamente.

Melhado (1992) também comenta a importância de uma análise diacrônica na compreensão de períodos de transição entre teorias científicas:

Apenas abandonando o privilégio proporcionado pela retrospectiva e procurando recuperar intacta a perspectiva de uma figura do passado o historiador pode acessar a originalidade de um cientista ou compreender o que separa um cientista (como o jovem Berzelius) de seus predecessores ou (como o velho Berzelius) de seus sucessores. (MELHADO, 1992, p. 134)

De acordo com Kragh (2001), a perspectiva diacrônica da historiografia implica em imaginarmos-nos “como observadores *no* passado, e não simplesmente *do* passado” (KRAGH, 2001, p. 100, grifos nossos). No diacronismo ideal, descobertas desconhecidas no período investigado, sejam elas anteriores ou posteriores, não exerceram influência no período, e devem ser desconsideradas. A racionalidade e a coerência das descobertas não podem ser avaliadas considerando seu sentido na atualidade, e sim com base nas normas epistemológicas vigentes na época em que as ocorrências históricas estudadas se deram, ou seja, com base nos “dados adquiridos pela comunidade científica nesse período” (KRAGH, 2001, p. 69).

A perspectiva puramente anacrônica, contrariamente, considera os fatos históricos como forma de compreender a ciência presente. Esse presentismo pressupõe, portanto, que a ciência atual seria o ponto culminante de uma evolução contínua da ciência, e se propõe a avaliá-la em termos de seus erros ou acertos, sob o ponto de vista da ciência atual. É, dessa forma, uma história da ciência vencedora. O objeto dessa historiografia é o mesmo objeto da ciência. A historiografia anacrônica restringe o significado de ciência ao entendimento atual, e deixa de considerar que o próprio significado de ciência e de cientista diferiram ao longo do tempo (KRAGH, 2001).

Embora haja vertentes puristas, Kragh admite que a visão diacrônica da história deve ser perseguida somente como um ideal. Isso significa que anacronismos

podem estar presentes na historiografia – na verdade, podem ser até mesmo necessários. David Hull, por exemplo, aponta como “difícil e até indesejável para o historiador descartar todas as formas de ‘presentismo’ a não ser que ele evite a tarefa de avaliar” (HULL, 1979 apud BROOKE, 1992, p. 219). Canguilhem defende que “apenas o contato com a ciência atual pode dar ao historiador o senso de ruptura e continuidade históricas” (CANGUILHEM, 1994, p. 31). O esclarecimento de conceitos exigiria, pois, uma interpretação do conceito original à luz do que está atualmente estabelecido na ciência:

Uma história da ciência totalmente diacrônica não seria susceptível de responder às exigências que se fazem normalmente às exposições históricas. Forneceria talvez uma representação fiel do passado mas seria também arqueológica e inacessível a todos, excetuando uns poucos especialistas. (KRAGH, 2001, p. 115)

Mais do que isso, é mesmo impossível livrar-se completamente do contexto que nos constrói, enquanto pesquisadores. Sendo assim, é preciso reconhecer que sempre intervimos anacronicamente na história que investigamos, julgando-a, e não desvelando-a, e é mais produtivo mensurar essa intervenção do que negá-la (CANGUILHEM, 1977; KRAGH, 2001).

Pimentel (2001) coloca o problema do presentismo no trabalho do historiador da ciência sob uma perspectiva metodológica, quando afirma que:

No processo de articulação do presente com o passado, o pesquisador volta-se às suas raízes, ativa ou reativa a memória, distanciando-se assim de uma possível fragmentação quando procura, na investigação, o elo entre esses dois tempos históricos da atividade humana, para além de análises “presentistas” que o levariam apenas a ratificar o passado e glorificar o presente. A pesquisa historiográfica constitui-se em evidências coordenadas e interpretadas, exigindo do pesquisador o trabalho de suplantar sua própria contemporaneidade sem deixar-se cair, entretanto, num historicismo que se traduziria em anacronismo, numa interpretação errônea, distorcida do passado. (PIMENTEL, 2001, p. 192)

Kragh (2001) afirma que assimilamos a história a fim de reescrevê-la permanentemente, mas sem compactuar com a falsa premissa de continuidade. A primeira fase de uma investigação historiográfica deve considerar os padrões e normas vigentes à época, mas, à medida que esse período e os acontecimentos nele inseridos vão se revelando, o investigador deve buscar critérios para estabelecer consensos em que basear sua interpretação, e é nesse momento que ele intervém como representante de sua própria época.

Há ainda que se considerar o desafio de cumprir a tarefa do historiador, qual seja, a de apresentar a história da ciência para o leitor contemporâneo, sem incorrer em distorções. Essa tarefa, que caracteriza uma função pedagógica da historiografia da ciência, é anacrônica, pois envolve em algum grau a transposição da história da época para o momento atual, para que possa ser compreendida.

Assim, aprender envolve colocar-se diacronicamente no lugar do outro, enxergar por seus olhos e desvencilhar-se o máximo possível da nossa própria visão socialmente condicionada, enquanto a comunicação subentende a interpretação dos fatos de forma anacrônica, à luz dos conhecimentos atuais e da nossa própria bagagem teórica e contextual. Como veremos mais à frente, esses pressupostos se aproximam daqueles da ATD.

2.1.3. Precursionismo

Canguilhem (2009 [1966])⁸ denuncia o “vírus do precursor”: a tendência de procurar no passado os precursores dos conceitos científicos atuais. Ele argumenta que pensar em precursores implica em considerar o absurdo de que um mesmo conceito vive em dois momentos diferentes da história – o passado em que existe e o futuro que antecipa. Além disso, alerta que: “Antes de colocar duas trajetórias uma por trás da outra sobre um caminho, é conveniente em primeiro lugar assegurar-se de que, efetivamente, se trata do mesmo caminho” (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 209). A ciência recorre frequentemente aos mesmos termos, mas o historiador não deve confundir essa recorrência com a persistência dos conceitos, pois: “As mesmas palavras não representam os mesmos conceitos. É preciso reconstituir a síntese na qual o conceito se encontra inserido, ou seja, ao mesmo tempo o contexto conceitual e a intenção diretriz das experiências ou observações.” (CANGUILHEM, [s.d.] *apud* MACHEREY, 2009, p. 146).

Isso nos remete ao terceiro objetivo desta investigação (*Analisar livros didáticos de química atuais direcionados ao Ensino Médio, procurando identificar conceitos remanescentes da teoria dualista*) e ao cuidado que devemos ter em não enten-

⁸ O trabalho de Canguilhem aqui citado é uma tradução de 2009, apresentada por Oscar Moro Abadía, da Universidade Memorial de Newfoundland, no Canadá, de conferência pronunciada em 1966 e publicada em 1983 por Canguilhem em *Études d'histoire et de philosophie des sciences*, Vrin, Paris, pp. 11- 23. Neste trabalho, indicamos, nas citações, a data do texto original entre colchetes, após a data da publicação consultada.

der o dualismo eletroquímico necessariamente como precursor das modernas teorias da valência e de constituição da matéria (ainda que elas envolvam aspectos de cunho dualístico, consequência inevitável de nossa concepção atual de eletricidade e ligação química). Sobretudo, é preciso questionar se a presença, em livros didáticos, de termos comuns ao dualismo eletroquímico de Berzelius são realmente resquícios dessa teoria.

2.1.4. Internalismo e externalismo

Canguilhem (2009 [1966]) define externalismo como a abordagem historiográfica que procura estudar os fatos científicos como resultado do meio externo (fruto da conjuntura social), enquanto que a abordagem internalista afirma que não é possível estudar um fato científico sem conhecer as teorias científicas relacionadas, ou seja, é preciso se colocar no lugar do cientista, no interior da ciência. Ambas as posições seriam extremadas pois, quando entendemos o objeto da história da ciência como diferente do objeto da ciência, vemos que seu estudo envolve uma visão externalista, já que é preciso compreender a conjuntura que definiu os interesses por um determinado produto científico, e isso se relaciona à epistemologia; no entanto, essas demandas nascem dentro da própria ciência, exigindo a invenção de novas linguagens para responder às questões que a ciência cria.

Sem considerar as dimensões histórica e cultural, a ciência parece atemporal e alijada da sua relação com outros aspectos da sociedade. Nas palavras de Martins (2006):

A ciência não se desenvolve em uma torre de cristal, mas sim em um contexto social, econômico, cultural e material bem determinado. Por outro lado, não é possível explicar os conhecimentos científicos apenas a partir desse contexto: é necessário levar também em conta os fatores internos da ciência, tais como os argumentos teóricos e as evidências experimentais disponíveis em cada momento. (MARTINS, 2006, p. XXIV)

No início da década de 1930, Butterfield utilizou o termo *whiggismo*⁹ para denunciar que a interpretação da história da ciência estaria sendo feita a partir de um

⁹ Brooke (1992) cita a tentativa de resgate da reputação de Berzelius por Thomson [apresentada por Saltzman (1973)] como exemplo, ao comentar o *whiggismo* presente na avaliação das teorias de Berzelius com base na química atual.

ponto de vista unilateral, ignorando a “rica complexidade” das múltiplas fontes históricas¹⁰. Segundo ele,

[...] não cumpre ao historiador fazer o que poderíamos denominar julgamentos de valores [...]. Sua função é descrever; ele [deve] permanece[r] imparcial entre cristãos e muçulmanos; não [deve] estar interessado nem numa nem noutra religião, exceto quando essas relacionam-se com vidas humanas. [...] Ele resumirá à posição que lhe compete quando afastar-se dos julgamentos simples e absolutos e retornar ao contexto histórico, que embaraalha tudo novamente [...] Se a história pode fazer alguma coisa, é lembrar-nos dessas complicações, que solapam nossas certezas, e mostrar-nos que todos nossos julgamentos são simplesmente relativos ao tempo e às circunstâncias. (BUTTERFIELD, 1965 *apud* DEBUS, 1991, p. 6)

Pagel criticou o anacronismo, o positivismo e o progressismo, e alertou que a seleção de material de um ponto de vista moderno pode prejudicar a compreensão da “verdade histórica” (PAGEL, 1958 *apud* DEBUS, 1991, p. 7). Ele defendia que a história da ciência é muito mais complicada que uma evolução contínua, e preconizava a contextualização, sugerindo uma abordagem metodológica que valorizasse a busca de significados ocultos e incomuns:

Em vez de selecionar dados que ‘façam sentido’ ao acólito da ciência moderna, o historiador deveria, portanto, tentar buscar sentido nos ‘desvios’ filosóficos, místicos ou religiosos [do trabalho] de cientistas do passado tidos como ‘sérios’ – ‘desvios’ estes que são geralmente desculpados alegando-se o espírito, ou mesmo o atraso do período histórico. São justamente estes [‘desvios’] que estão a desafiar o historiador: desvelar a razão e a justificativa internas de sua presença na mente do sábio e a coerência orgânica de suas ideias científicas. Em outras palavras, cumpre ao historiador reverter o método da seleção científica e reapresentar os pensamentos de seu herói nos seus cenários originais. Os dois domínios do pensamento – o científico e o não-científico – irão então emergir, não como simplesmente justapostos ou como concebidos a despeito de um ou do outro, mas como um todo orgânico, no qual eles se reforçam e se confirmam reciprocamente. Não há outro modo de compreender-se plenamente o sábio. (PAGEL, 1958 *apud* DEBUS, 1991, p. 8)

A análise historiográfica, pois, precisa relatar o que se sabe, mas também explicar o que não é evidente, o que não foi ainda apresentado. É o incomum (“desvios”) que pode revelar mais sobre o pensamento de uma época.

Rattansi apresenta visão semelhante à de Pagel, mas alerta para que o trabalho não se resume a buscar e classificar componentes racionais ou irracionais na

¹⁰ As perspectivas de Butterfield, Pagel, Rattansi, Gillespie, Broad e Debus apresentadas aqui foram extraídas do trabalho de revisão escrito por Debus (1991), sobre o processo de transformação da historiografia da ciência.

história da ciência, e sim que se use as tensões entre eles para extrair as análises (DEBUS, 1991).

Allen Debus admitiu, a partir de 1970 (e especialmente a partir da década de 1990), uma crescente preocupação com a relação entre ciência e sociedade, com a participação cada vez maior de cientistas sociais na pesquisa. Se por um lado essa preocupação revelou relações sociais da ciência com a arte e a literatura, por exemplo, por outro levou a uma exacerbação do externalismo, com a total exclusão dos aspectos científicos, ou a ênfase no que Gillespie chama de características pessoais e anedóticas, que valorizam o que “rigorosamente excluímos da corte da ciência – o irracional, o pessoal” (BROAD, 1980 *apud* DEBUS, 1991, p. 10).

Debus, concordando com Broad, reafirmou que a dicotomia internalismo/externalismo já deveria estar superada¹¹:

[...] a maioria dos historiadores aceitam o fato de que as ciências precisam ser suplementadas com o estudo dos fundamentos sociais semoventes da atividade científica. Espera-se que os debates entre ‘visões’ internas e externas’ do final da década de [19]60 seja uma coisa do passado. (BROAD, 1980 *apud* DEBUS, 1991, p. 11)

Debus também afirmou que o impacto da ciência e da tecnologia na sociedade de hoje é inquestionável:

É desnecessário lembrar que o mundo moderno seria simplesmente incompreensível se não considerássemos o desenvolvimento das ciências, da medicina e da tecnologia. Elas influenciaram todas as atividades humanas. O historiador tratando da Civilização Ocidental – especialmente o período após 1500 – não pode ignorar este fato, senão obterá um quadro muito pobre e distorcido do mundo em que vivemos. (DEBUS, 1991, p. 11)

Ele conclui que: “Tão importante quanto o estudo da ciência no século XIX tem sido a compreensão de que o desenvolvimento da ciência pode ser influenciado por fatores que não consideraríamos nada científicos” (DEBUS, 1991, p. 7); e que: “Em suma, precisamos aprender não só sobre os desenvolvimentos técnicos das ciências, mas também as inter-relações entre elas e todas as outras esferas da atividade intelectual” (DEBUS, 1991, p. 12).

A busca das razões pelas quais o dualismo eletroquímico foi aceito ou superado pode, assim, revelar critérios não científicos – por exemplo, o prestígio de Berzelius

¹¹ Também Canguilhem (1977) aponta essa superação.

na época para além do que poderia ser explicado pela qualidade de seus resultados, ou um contexto não favorável à frutificação de suas ideias na química orgânica, como será discutido no capítulo 3.

A história da ciência nos mostra que a ciência não tem uma forma única de ser conduzida, e seu estudo pode revelar quais elementos são inerentes à ciência e quais são culturalmente condicionados, contribuindo para a compreensão do papel da ciência na sociedade – bem como da influência da sociedade sobre a ciência. Assim, considerando superada a dicotomia externalismo-internalismo, é no contínuo entre esses dois extremos que se encontra o espaço adequado a uma investigação historiográfica.

Kragh (2001) considera duas possíveis abordagens para a historiografia da ciência: o estudo horizontal e o estudo vertical (figura 2.2). No primeiro caso, estuda-se uma disciplina ou tema na extensão em que vigorou (muitas vezes, pode ainda ser vigente, ou ter seu estudo justificado em fatos presentes). Nessa abordagem, os aspectos internos da disciplina em foco são mais valorizados. A abordagem vertical é uma alternativa interdisciplinar, que considera a disciplina ou tema em questão como apenas mais um dos elementos que constituíam a cultura e o contexto da época. Isso possibilita que questões aparentemente estranhas à disciplina em estudo, mas que a tenham de alguma forma influenciado, possam surgir mais intensamente na análise. No entanto, estudos cujo objetivo seja buscar as causas de um determinado desenvolvimento histórico devem dar mais ênfase a uma abordagem horizontal. O equilíbrio dado a essas duas abordagens deve ser estabelecido, portanto, pelo pesquisador, em face de seus objetivos.

Perseguir uma teoria ou conceito ao longo de períodos muito extensos, de forma horizontal, pode levar à criação de uma história hipotética, no sentido de apresentá-la como praticamente invariante. Na prática, os conceitos podem sobreviver (até mesmo com a mesma terminologia) por longos períodos, ou ressurgir no decorrer da história, mas são desenvolvidos e transformados ao longo do tempo até mesmo ao ponto de não serem mais reconhecíveis ou relacionáveis. A premissa de que um esquema usado atualmente, como o da dupla-troca em reações químicas, representa uma continuidade do modelo dualista de Berzelius pode, nesse sentido, a despeito de suas semelhanças aparentes, ser incorreta, se não for considerada nos termos da

ciência da época. A verticalização da investigação contribui para que as analogias sejam formuladas cuidadosamente e de forma mais segura (KRAGH, 2001).

A verticalização permite, ainda, que elementos presentes nas teorias de um certo cientista ou grupo de cientistas possam ser rastreados em suas demais atividades, de forma a traçar um perfil de influências que permita compreender melhor as origens e as implicações das ocorrências no contexto sócio-histórico.

Figura 2.2. Representação gráfica das abordagens historiográficas horizontal e vertical, com base em Kragh (2001), aplicada ao presente trabalho. O instante t_0 representa a primeira publicação da teoria dualista de Berzelius, e $t^\dagger$ representa o momento em que parte significativa da comunidade química já a abandonou; t' representa o momento atual, e o intervalo entre t_1 e t_2 , o período escolhido como central para a nossa investigação histórica. O eixo vertical apresenta alguns dos tópicos tratados neste trabalho em conexão com o conteúdo científico da teoria dualista.

Considerando que muitos cientistas (dos quais Berzelius é exemplo) transcenderam as fronteiras de suas disciplinas, e que os contextos social, cultural, científico, político, religioso etc., são importantes para a compreensão do trabalho do cientista, nos parece fundamental um estudo histórico que considere certa verticalidade, dentro de limites impostos pelos documentos e tempo disponíveis, de modo a captar possíveis relações entre o dualismo eletroquímico e o contexto cultural da época, contribuindo para compreender o presente sem reduzi-lo a um produto do progresso linear da ciência. Além disso, o historiador que desconsidera a influência de uma dada ocorrência científica sobre outros fatos históricos assume uma visão que se assemelha ao controle positivista de variáveis em busca de um resultado verdadeiro, isolando a ocorrência de interesse como se fosse uma variável. Na verdade, a in-

fluência dessa ocorrência sobre outras ocorrências é desconhecida, o que pode gerar interpretações distorcidas ou limitadas (KRAGH, 2001).

2.1.5. Fontes

As fontes para a pesquisa em história da ciência podem ser primárias ou secundárias. As fontes primárias são as produzidas no mesmo período dos fatos sobre os quais o pesquisador tem interesse. Esse aspecto é meramente cronológico, e não implica maior fiabilidade. As fontes secundárias são posteriores, produzidas por sujeitos distanciados (temporal ou intencionalmente), em certa medida, dos acontecimentos investigados, e frequentemente se baseiam nas fontes primárias. Também essa distinção não é absoluta: é dependente do objeto de investigação (KRAGH, 2001). Em nossa investigação, por exemplo, a reconstituição de elementos da teoria dualista de Berzelius oferecida por Arrhenius na obra *Theories of chemistry; being lectures delivered at the University of California, in Berkeley* constitui fonte secundária a respeito da caracterização do conceito de dualismo eletroquímico; ao mesmo tempo, é fonte primária quando apresenta os princípios da teoria da dissociação eletrolítica estabelecidos pelo próprio Arrhenius, e ainda considerados válidos, ajudando a compreender a superação do dualismo eletroquímico como teoria hegemônica na comunidade química.

Quanto às traduções, apresenta-se o problema de trabalhar com textos publicados em línguas não dominadas pelo pesquisador. Mesmo publicações em inglês e espanhol, línguas atualmente bastante difundidas, podem apresentar difícil interpretação em função da época em que foram escritas. Berzelius publicou boa parte dos seus trabalhos em sueco. Embora tivesse domínio do inglês, francês e alemão, pode-se questionar até que ponto as traduções de suas obras são fidedignas. O problema pode ser amenizado, segundo Kragh (2001), de duas formas: a primeira, tendo em vista que “toda a boa tradução de um texto não trivial tem de ser uma reconstituição histórica”, ou seja, toda tradução é uma interpretação, e assim deve ser considerada. Isso implica em estabelecer um equilíbrio entre a fidedignidade e a clareza para o leitor final. O segundo cuidado a ser tomado se refere à comparação entre

diferentes traduções, inclusive levando em conta aquelas possivelmente avalizadas pelo autor¹².

Outro tipo de fonte são as biografias e autobiografias. As biografias podem ser carregadas de uma visão indutivista, apresentando seu protagonista de forma acrítica e como herói, e seus opositores como vilões, ou simplesmente colocando os demais cientistas e suas contribuições em um “pano de fundo cinzento” (KRAGH, 2001, p. 187). Esse tipo de biografia, ou *hagiografia*, não se presta à construção de um trabalho historiográfico em uma perspectiva diacrônica e crítica, pois mitifica o cientista. De acordo com Kragh, “É, obviamente, dever do historiador destruir os mitos, onde quer que possam ser encontrados” (KRAGH, 2001, p. 188). Muitas biografias, ainda, separam os acontecimentos pessoais dos profissionais. Em seções distintas, esses enfoques satisfazem, respectivamente, o leitor leigo e o especializado, mas trazem uma visão limitada ao remover possíveis ligações entre fatos pessoais e as descobertas científicas.

Quanto ao papel das autobiografias, Kragh pondera que revelam muito mais sobre as visões que seus autores têm de ciência e de si próprios do que sobre suas contribuições científicas efetivas. Embora não sejam fidedignas no que tange ao estabelecimento factual dessas contribuições, representam um importante papel no delineamento do perfil do cientista como pessoa e na reconstrução do cenário em que produziu, sob seu próprio ponto de vista.

2.2. Epistemologia da ciência

2.2.1. Relação entre epistemologia e história da ciência

Santos (2012) aponta que entre os séculos XVII e XIX consolidou-se uma única epistemologia, apoiada no paradigma newtoniano, que servia de modelo a todas as ciências (embora cada ciência tivesse seu próprio conjunto de procedimentos metodológicos). Após a crise do paradigma newtoniano, no início do século XX, procurou-se consolidar epistemologias disciplinares. Um dos principais nomes desse

¹² A partir de 1820, Berzelius passou a supervisionar pessoalmente as traduções de seus livros, e ele mesmo fazia algumas adições (JORPES, 1966).

movimento foi o biólogo e filósofo francês Georges Canguilhem, aluno de Gaston Bachelard.

Bachelard entendia a história da ciência como ferramenta da epistemologia, “cujo objetivo era analisar o passado à luz da racionalidade contemporânea” (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 195). Com o novo entendimento da diversidade de epistemologias, Canguilhem vê a necessidade de propor uma conciliação entre a história e a epistemologia da ciência, e é um dos poucos pensadores, na década de 1970, a adotar esse caminho, opondo-se à visão de que a ciência progride por aca-sos e descobertas geniais ou pelo esforço de responder às questões abertas pela ciência imediatamente precedente, comum na historiografia da época (MACHEREY, 2009). Canguilhem concorda com a relação hierárquica e operacional entre essas áreas proposta por Bachelard quando afirma que “fazer, no sentido mais operativo do termo, história da ciência é uma das funções, e não a mais simples, da epistemo-logia filosófica” (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 210); é experienciar a maneira de o ser humano construir conhecimento e teorizar sobre ele:

sem a referência à epistemologia, uma teoria do conhecimento seria uma meditação sobre o vazio, e sem relação com a história da ciência uma epis-temologia seria uma repetição totalmente supérflua da ciência sobre a qual pretende discorrer. (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 201)

No entanto, Canguilhem discorda de Bachelard no que diz respeito ao papel da ciência atual no julgamento da validade de determinado conceito científico. Tam-bém critica a visão positivista (que chama de “modelo do laboratório”), segundo a qual a história da ciência deve revelar o passado de um conhecimento científico, pois isso implica que a história da ciência e a ciência se manteriam, assim, indepen-dentes, como um equipamento científico que permite observar um fenômeno sem dele participar. Na verdade, o objeto da ciência é um produto primário, resultado do estudo sistematizado de fenômenos naturais, enquanto que o objeto da história da ciência diz respeito ao objeto da ciência, ou seja, é um produto secundário. Mas a relação entre fenômeno e ciência não é a mesma que existe entre ciência e história da ciência, ou seja, ciência e história da ciência não são produzidas a partir de seus objetos da mesma forma. Essa visão epistemológica, de que a relação entre fenô-meno e ciência não é a mesma que existe entre ciência e história da ciência, é co-mum à visão historiográfica contemporânea, como vimos no tópico 2.1.1.

Se a ciência nunca atinge “a verdade”¹³, e as teorias não podem ser provadas (podem apenas ter mais sucesso que outras em explicar fatos e proporcionar previsões), qual a ferramenta para julgar se uma teoria é válida, em um determinado momento histórico? Martins (2006) nos responde que

É necessário estudar o contexto científico, as bases experimentais, as várias alternativas possíveis da época, e a dinâmica do processo de descoberta (ou invenção), justificação, discussão e difusão das ideias. Apenas desse modo é possível aprender como uma teoria foi justificada e porque foi aceita. (MARTINS, 2006, p. XXXI)

Para realizar essa análise seria preciso mapear a ciência da época em torno de um dado conceito, buscando compreender a epistemologia vigente para guiar nosso julgamento (CANGUILHEM, 2009 [1966]; MARTINS, 2006). Assim, a conciliação entre história e epistemologia da ciência proposta por Canguilhem consiste no equilíbrio entre a arrogância da “história julgada” de Bachelard e o historicismo, que não permite considerar o passado como superado (CANGUILHEM, 2009 [1966]). Em outras palavras, trata-se da superação da dicotomia entre anacronismo e diacronismo na análise historiográfica.

Brooke (1992), embora considere desnecessário, em historiografia, recorrer à ciência presente, admite a busca, na história da ciência, de critérios de julgamento da durabilidade de uma teoria, referindo-se especificamente ao dualismo eletroquímico de Berzelius. Essa forma de considerar a história da ciência como ferramenta da epistemologia está em consonância com a concepção de Canguilhem (2009 [1966]). Brooke alerta, entretanto, que esse argumento revisionista, se não for bem utilizado, pode “colapsar sob o peso de seu anacronismo” (BROOKE, 1992, p. 220).

2.2.2. Modelo do tribunal

Canguilhem estabelece em sua filosofia o “modelo da escola”, ou “modelo do tribunal”, segundo o qual a história da ciência permite à epistemologia recuar, a partir da linguagem científica atual, até o momento do passado em que um determinado conceito ou termo não é mais inteligível, em que a linguagem que lhe dá sentido não

¹³ Na visão de Canguilhem (1977), a “verdade científica” é dinâmica, e se constitui no progresso da ciência – ou, como sugere Macherey, no *processo* da ciência, evitando assim a visão de desenvolvimento científico contínuo. Assim, o conhecimento científico seria sempre verdadeiro, e estaria isento de ser ultrapassado ou corrigido. A correção da ciência do passado seria uma situação errônea que aconteceria quando sujeitamos o passado a um modelo epistemológico atual, supondo-o permanente – o que é chamado por Canguilhem de “polícia epistemológica”.

pode mais ser compreendida ou traduzida em outra, mesmo que mais vulgar. Por exemplo, “a linguagem dos químicos do século XIX não encontra eco semântico no período anterior a Lavoisier porque este último instituiu uma nova nomenclatura” (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 202).

No modelo do tribunal, a epistemologia mostra qual a linguagem mais atual aceita pela ciência, com o que devemos recuar até o passado e distinguir entre os conhecimentos superados e os conhecimentos sancionados, que continuam influenciando a atividade científica. No exemplo citado por Canguilhem, Lavoisier realiza uma revolução científica: quebra os laços com o passado e determina a nova linguagem que marcará a época de Berzelius, sabendo que isso implica em desligar-se dos mestres do passado. Também Berzelius inaugura uma nova linguagem, capaz de traduzir os novos fatos observados na eletroquímica, estequiometria e atomística e reunidos sob o seu dualismo eletroquímico. Ou seja, é necessária a epistemologia (a forma de produzir conhecimento que, nesse caso, rompe com o passado) para julgar e discernir os conhecimentos superados (como a química flogística pré-lavoisierana) dos conhecimentos sancionados.

No entanto, Canguilhem não ratifica completamente o modelo do tribunal, porque esse modelo supõe que a ciência atual é o ponto culminante da ciência, e reduz a utilidade da história à resolução dos problemas da atividade científica. Ele se distancia, assim, do julgamento do passado defendido por Bachelard, considerando que, embora possa haver julgamento a partir da ciência estabelecida no presente, não se deve ignorar a importância dos conceitos científicos do passado em seu próprio contexto. Ou seja, não se trata de usar a história da ciência como legitimação do presente, mas sim como forma de compreender em que medida as mudanças de pensamento científico representaram superações em seu próprio tempo:

A história da ciência não é o progresso da ciência de trás para diante, ou seja, colocar as etapas superadas em uma perspectiva cujo ponto de fuga seria a verdade atual. Ao contrário, a história da ciência é um esforço por investigar e fazer compreender em que medida as noções, as atitudes e os métodos superados foram, em sua época, uma superação. Em consequência, a história da ciência consiste em determinar em que medida o passado já superado é passado de uma atividade a qual continuamos denominando científica. Compreender em que consistiu o conhecimento de um determinado momento histórico é tão importante como expor as razões de sua posterior destruição. (CANGUILHEM, 2009 [1966], p. 203)

Permitindo-nos o movimento inverso, podemos, então, nos perguntar: em que momento o dualismo eletroquímico, tal como proposto por Berzelius, representa uma linguagem que não corresponde mais às teorias químicas aceitas, que não é mais compreendida pelos químicos? Não se trata necessariamente de entender tais conceitos e esquemas (o que poderia perfeitamente ser concebível), mas sim reconhecê-los ou não como representativos do corpo de conhecimento atual da química, frutíferos e com utilidade teórica e instrumental. Dessa forma, o modelo do tribunal nos parece instrumento adequado para a determinação do período em que a teoria dualista de Berzelius permaneceu aceita pela maior parte da comunidade química, concretizando assim nosso segundo objetivo específico.

Embora possamos estar interessados em saber como o dualismo eletroquímico explica certos fenômenos (e isso inevitavelmente faz parte desta investigação), esse movimento praticamente não transcende o próprio objeto da ciência. Em nossa investigação, ele concorre para que os objetivos centrais pretendidos sejam efetivamente alcançados: entender como o dualismo foi construído, por que era aceito e por que razões foi abandonado.

2.2.3. Delimitação do objeto de estudo

Segundo Canguilhem (2009 [1966]), a delimitação de um objeto de estudo historiográfico envolveria o diagnóstico de sua importância, que se relaciona a interesses contemporâneos. Esse diagnóstico seria proporcionado pela epistemologia. Entretanto, haveria certa tensão entre a epistemologia do passado – que garantiria a compreensão da ciência do passado em seus próprios termos, mas que seria tida apenas como um ideal, como forma de controle para evitar os excessos do julgamento contemporâneo da história defendido por Bachelard – e a epistemologia atual. O presente, no qual o pesquisador se insere, influencia inevitavelmente o passado, e determina a escolha do objeto de estudo historiográfico, mas é preciso evitar julgamentos baseados somente em princípios de racionalidade estranhos ao período investigado e a depreciação dos conhecimentos superados.

Pimentel (2001) ressalta a importância da definição do contexto histórico, o que é feito por meio da epistemologia:

Um determinado contexto histórico e sociocultural é necessariamente o limite e a base em que todo pesquisador transforma a realidade fática em ideal,

isto é, torna-a objeto de investigação científica a partir dos conhecimentos e instrumentos de que dispõe. (PIMENTEL, 2001, p. 194)

Assim, a epistemologia atual, em permanente tensão e diálogo com a epistemologia da época investigada, desempenha papel na caracterização, escolha e delimitação do objeto de estudo.

2.2.4. Critérios de validação de uma teoria e construção da ciência

Como vimos anteriormente, a validade de uma teoria pode ser determinada a partir de um estudo historiográfico que considere como juíza a epistemologia da época em que a teoria foi proposta ou esteve vigente. Essa investigação revela critérios, científicos ou não, pelos quais a teoria foi validada e a ciência foi construída, como procuramos mostrar a seguir.

Segundo Gay (1976), não há consenso em ciência a respeito do que confirma ou refuta uma teoria. Essa autora defende uma ideia menos positivista do método científico ao afirmar que a “escolha da estratégia em ciência é sempre um tipo de aposta” (GAY, 1976, p. 42). Gay, entretanto, ao discutir aspectos da construção da ciência, revela alguns critérios de validação de teorias, no contexto do século XIX, dentre os quais destaca a importância atribuída por Popper aos experimentos: “para a ciência progredir, novas teorias devem ser independentemente testáveis e precisam passar por alguns novos e severos testes”, como a explicação de fatos empíricos (GAY, 1976, p. 6). Gay afirma que “Embora seja verdade que os experimentos podem não decidir a confiabilidade de uma teoria em algum sentido direto ou imediato, em última instância eles decidem sua confiabilidade, e a de toda a ciência” (GAY, 1976, p. 6), constituindo-se, assim, em um desses “testes severos”.

Popper defendia que “uma nova teoria deve proceder de uma ideia simples, nova e poderosa, e unificadora sobre alguma conexão ou relação entre algum fato, alguma coisa ou teorias até então desconexas” (POPPER, 1972 *apud* GAY, 1976, p. 6). Simplicidade e poder unificador seriam, portanto, ao lado da explicação de fatos empíricos, importantes critérios de validação de uma teoria.

A filosofia de Lakatos, porém, nos faz ver que os cientistas podem se concentrar somente no cinturão de proteção do “núcleo duro” de um sistema científico, e

mantê-lo válido enquanto ele se mostrar teoricamente lógico, ajustando-o à filosofia vigente¹⁴, sem recorrer aos (ou mesmo ignorando os) dados empíricos. O que se vê, na história da ciência, é que os experimentos são interpretados de formas diversas e utilizados para validar as teorias por uma infinidade de maneiras diferentes, e os dados são, por vezes, forçados a encaixar-se nelas (GAY, 1976).

Poder-se-ia pensar que o critério principal para aceitação de uma teoria científica seria o fato de esta estar correta. No entanto, é preciso evitar anacronismos no julgamento dessa correção. Gay usa o caso da não aceitação da hipótese de Avogadro¹⁵ como exemplo em contrário, e ressalta o valor da filosofia da ciência para que novas situações semelhantes possam ser mais bem avaliadas. A não aceitação da hipótese de Avogadro provavelmente tem a ver com o fato de que ela contrariava mais sistemas aceitos à época (baseados em pressuposições depois consideradas erradas, como um sistema de equivalentes incorreto) do que promovia entendimentos frutíferos para a ciência. Enquanto a teoria de Avogadro tinha suas bases em conceitos que ainda não eram o centro da discussão (como os pesos moleculares), e carecia de um sistema de equivalentes único e adequado, o dualismo eletroquímico de Berzelius vinha dar resposta a importantes questões em aberto, como as razões das afinidades químicas, a composição das substâncias e os fenômenos eletroquímicos. Também a identificação do suposto radical etila como um dímero por Frankland, que ameaçava o sistema dualista de Berzelius, foi imediatamente contestada. Frankland estava correto, mas até 1864 a interpretação era confusa, pois havia múltiplos sistemas de equivalentes que dificultavam a comparação de fórmulas e a verificação de teorias por dados experimentais (GAY, 1976). O que é correto o é, pois, dentro de um determinado contexto histórico, e a verdade, em ciência, é construída pela comunidade científica, mostrando-se, muitas vezes, relativa e efêmera. Nas palavras de Japp:

¹⁴ Essa estratégia é conhecida por heurística positiva, na qual os novos fatos vão sendo adaptados por meio de novas hipóteses que estão de acordo com o núcleo do programa de pesquisa.

¹⁵ A hipótese de Avogadro foi proposta em 1811, aproximadamente à mesma época da primeira publicação da teoria dualista por Berzelius. Poderíamos conjecturar que, se a hipótese de Avogadro tivesse sido aceita naquele momento, ficaria claro que elementos químicos com mesma eletronegatividade se uniam para formar substâncias, opondo-se fortemente à teoria dualista por constituir exemplo de ligação não eletroquímica em compostos inorgânicos (como H_2 e Cl_2), e conciliando os sistemas orgânico e inorgânico. Embora correta à luz de critérios posteriores, essa teoria não encontrou apoio na época em que foi proposta. Evidentemente, a conjectura da aceitação prematura da hipótese de Avogadro é uma suposição com bases anacrônicas, mas epistemologicamente ela nos auxilia a compreender a questão da correção como critério de validação de uma teoria científica.

Um novo sistema químico não é uma proposição euclidiana, para ser provada em poucas palavras; suas evidências são cumulativas, e sua verdade ou erro – ou, para ser mais preciso, sua conveniência ou inconveniência – podem ser testadas apenas aplicando-a ao corpo da ciência como um todo (JAPP, 1898 *apud* GAY, 1976, p. 9).

As anomalias provenientes de evidências empíricas, enfrentadas por qualquer teoria, não levam, porém, imediatamente à sua refutação, pois são geralmente incorporadas à teoria mediante adaptações teóricas e experimentais. Essa capacidade adaptativa é mais um dos “testes severos” propostos por Popper, e se daria no “cinturão de proteção” da teoria (na interpretação lakatosiana), resguardando-a. Observamos essa capacidade em Berzelius, quando faz diversas concessões e adaptações na teoria dos radicais de forma a proteger o cerne do dualismo eletroquímico, como mostraremos no capítulo 3. Tanto Popper quanto Lakatos defendiam que as teorias devem ter um “poder explanatório” ou “poder heurístico”, que é a medida de quantos fatos e quantas anomalias podem ser por elas explicados. Quando esses poderes declinam, a teoria perderia força (GAY, 1976).

Como visto, a avaliação dos critérios de validação de uma teoria científica está intimamente relacionada à construção da ciência. É, portanto, na história da ciência que encontraremos auxílio para compreender esses critérios, bem como a própria ciência e suas limitações. Segundo Martins (2006),

Muitas vezes, as teorias que aceitamos hoje foram propostas de forma confusa, com muitas falhas, sem possuir uma base observacional e experimental. Apenas gradualmente as ideias vão sendo aperfeiçoadas, através de debates e críticas, que muitas vezes transformam totalmente os conceitos iniciais. (MARTINS, 2006, p. XXIV)

Martins também lembra que as escolhas dos cientistas “não são totalmente cegas: há evidências a favor ou contra cada posição e é possível pesar cada lado e preferir um ao outro, com base nos conhecimentos de cada época” (MARTINS, 2006, p. XXIII). Para realizar essa análise é preciso mapear a ciência da época em torno de um dado conceito, buscando compreender a epistemologia vigente para guiar o julgamento (CANGUILHEM, 2009 [1966]).

No estudo de caso representado pelo dualismo eletroquímico, os critérios discutidos neste tópico – simplicidade, poder unificador, importância dos dados empíricos, abordagem de questões em aberto e poder de adaptação frente às anomalias – são evidenciados, especialmente, no embate entre a teoria dos radicais e a teoria dos tipos.

2.2.5. Análise historiográfica

Expostos os fundamentos da historiografia contemporânea da ciência e alguns aspectos da epistemologia da ciência, bem como a relação entre ambas – a primeira, trazendo à tona os fatos relacionados a um dado contexto histórico que serão submetidos a julgamento, de acordo com os critérios de validade de um determinado conceito científico fornecidos pela segunda –, nos parece importante enfatizar os princípios metodológicos do processo de interpretação das fontes na busca do contexto histórico de um conceito científico. Como esses conceitos epistemológicos e historiográficos se concretizam em uma pesquisa em história da ciência?

A metodologia utilizada em historiografia da ciência frequentemente carece de registro e sistematização, e envolve conhecimento tácito incorporado pelos pesquisadores, fruto de treinamento e experiência. Entretanto, alguns princípios básicos devem ser seguidos: em primeiro lugar, essa metodologia deve se basear no mapeamento de conhecimentos com o objetivo de compreender e reconstruir a epistemologia da época em estudo, o que envolve ler originais, especialmente fontes primárias, em que o diálogo crítico entre os pares esteja presente, inter-relacionadas por fontes secundárias (ALFONSO-GOLDFARB *et al.*, 2004; KRAGH, 2001). Esse processo permitiria fazer emergir os critérios epistemológicos da época.

Em segundo lugar, é preciso interpretar os documentos históricos, buscando “estar atento à opacidade mais do que à transparência” (MACHEREY, 2009, p. 147), ou seja, de forma menos literal, revelando os objetivos involuntários por trás do discurso. Isso só faz sentido por meio do instrumental epistemológico disponível e aceito naquele contexto (CANGUILHEM, 1977; MACHEREY, 2009), proporcionado pelo mapeamento, que considera o contexto e diversas interpretações possíveis, expressas em diferentes documentos, na construção de novas interpretações. Por exemplo, a afirmação de Berzelius, em sua obra didática, de que seria “absolutamente impossível estudar [a química orgânica] sem ter conhecimento da [química inorgânica]” (BERZELIUS, 1845, p. 123–124), que apresentamos mais adiante, no tópico 3.5, poderia parecer consensual dentro da epistemologia da época, pois conhecimentos bem estabelecidos deveriam ser estendidos para campos análogos em investigação. Entretanto, ao ser considerado dentro de um contexto em que seus adversários já defendiam que as anomalias reveladas na química orgânica lançavam dúvidas mesmo sobre a química inorgânica e o dualismo eletroquímico já estabele-

cido, o trecho pode ser reinterpretado como uma tentativa de Berzelius de defender sua posição, usando sua reputação e a grande penetração de sua obra como meio.

Não só o texto presente, mas o que falta nele também deve ser considerado. Por exemplo: a inexistência de esquemas genéricos para as transformações químicas nos trabalhos de Berzelius consultados, e mesmo a baixa frequência de representações de reações químicas específicas, sugerem que pouca importância era dada a esses aspectos no período investigado, trazendo novos elementos para discutir a suposta relação entre o dualismo eletroquímico e os esquemas de dupla-troca. O esforço do historiador deve ser, portanto, no sentido de incorporar esse instrumental epistemológico para captar o oculto, porque o óbvio de uma época – ou seja, as regras epistemológicas da ciência que queremos encontrar – é, em geral, omitido, por ser de conhecimento comum, tácito e trivial.

Para caracterizar um conceito científico (como o dualismo eletroquímico) e determinar sua validade em determinado contexto, seria preciso, portanto, mapear a ciência da época em torno desse conceito, buscando compreender a epistemologia vigente – muitas vezes específica de um determinado grupo de cientistas, em contraposição à ideia de uma metodologia científica única – para guiar o julgamento (CANGUILHEM, 2009 [1966]; MACHEREY, 2009; MARTINS, 2006). O mapeamento de um conceito científico deve, assim, levar tanto à sua compreensão quanto ao entendimento das razões de sua superação. Devemos procurar, no discurso e diálogo científico da época, evidências da aceitação e contestação de tal conceito, identificando e interpretando os argumentos empregados em sua defesa ou refutação.

A interpretação das ocorrências pode levar em conta aspectos psicológicos, sociológicos ou, simplesmente, racionais. Se uma teoria é metodologicamente superior aos olhos da norma vigente à época, só esse aspecto racional já bastaria para justificar sua aceitação, sem que se tenha que recorrer ao contexto social ou a características psicológicas dos cientistas. Por outro lado, a aceitação de uma teoria que apresenta falhas em sua fundamentação, contradizendo a norma, não é racional, e requer a busca de outras razões para explicá-la. O estatuto de teoria científica deve ser identificado como um estatuto social, ou seja, um desenvolvimento científico não é elevado ao estatuto de teoria científica somente por explicar adequadamente certos fenômenos naturais, mas teve de ser aceito como tal por uma convenção social, que segue um certo conjunto de normas da comunidade científica à época.

ca. Isso requer que se investigue que razões sociais conferiram a esse desenvolvimento científico o estatuto de teoria científica (KRAGH, 2001).

Por fim, é preciso reconhecer a relação entre a organização dos documentos e a interpretação dos fatos, que deve se embasar nesses documentos. Por isso, duas pesquisas historiográficas sobre o mesmo tema geralmente transitam por caminhos distintos, de acordo com a opção de organização documental dos investigadores, guiada pelos objetivos de pesquisa e critérios de análise (MORAES; GALIAZZI, 2011; PIMENTEL, 2001). O recorte de fatos históricos para análise, retirando-o de um contexto complexo – considerado por Kragh (2001) não só como admissível, mas também necessário – implica em diferentes descrições e interpretações de uma mesma ocorrência por pesquisadores diferentes, que necessariamente privilegiarão aspectos diferentes ao selecionar os fatos para análise. Ao lado disso, o processo de escrita da história é socialmente condicionado, e pesquisadores diferentes carregam visões distintas sobre os mesmos fatos. Finalmente, a escrita da história é um processo dinâmico, e a cada reescrita, novos elementos são adicionados, e novos olhares, condicionados pelo contexto das diversas épocas em que são lançados, revelam aspectos diferentes dos acontecimentos históricos. Assim, a história da ciência seria construída muito mais pelas novas opiniões do que pelas novas descobertas (KRAGH, 2001). Massimi traduz da seguinte forma o papel do pesquisador frente aos documentos que constituem seu objeto:

O objeto da pesquisa histórica é constituído por documentos que transmitem ao historiador a realidade do passado de uma forma parcial, proporcionando um conhecimento que é “mutilado”, segundo Paul Veyne. De fato, o documento representa já uma interpretação de fatos reais elaborada por seu autor e, portanto, não deve ser encarado como uma descrição objetiva e neutra dos fatos. Por outro lado, o valor heurístico e a significação do documento dependem também da acuidade da leitura e do esforço interpretativo do historiador. Este sabe extrair de uma fonte de informações algum conhecimento útil para a compreensão de um aspecto da história humana, sob o ângulo que corresponde ao seu objeto de interesse. É esse interesse que move e orienta continuamente o pesquisador na busca de documentos. (MASSIMI, 1984 *apud* PIMENTEL, 2001, p. 193)

Cada pesquisa é, assim, particular, porque mobiliza recursos diferentes, ditados pelos documentos pesquisados, pelas opções de organização selecionadas pelo investigador e pela sua própria bagagem cultural, que guiam sua interpretação. Não existe relato que possa ser considerado como retrato fiel dos acontecimentos (PIMENTEL, 2001). Eles são sempre uma interpretação dos fatos – e serão nova-

mente interpretados pelo investigador que, a partir das suas questões de pesquisa, interroga os documentos e delimita seu contexto. Mais do que isso, retratar os fatos neutra e objetivamente não é, definitivamente, finalidade da historiografia.

Esses pressupostos, que enfatizam a necessidade da análise documental, em busca da perspectiva do outro sem pretender ignorar a própria contribuição do pesquisador, são coerentes com os pressupostos da ATD, metodologia de pesquisa qualitativa que, conforme detalhamos adiante no tópico 2.4, pressupõe que o investigador se coloque no lugar do sujeito de pesquisa, fazendo emergir, como resultado de um processo de impregnação reiterada e progressiva, os sentidos implícitos no texto, para então interpretá-los à luz de seu próprio conhecimento (MORAES; GALIAZZI, 2011).

2.3. História da ciência e ensino

Neste tópico, procuramos apresentar alguns pressupostos e discussões que lançam luz sobre a contribuição da história da ciência para a formação de professores e para o ensino de química, e sua relação com os materiais didáticos e com o dualismo eletroquímico de Berzelius.

2.3.1. Papel da história da ciência no ensino

Kragh (2001) apresenta argumentos de diversos pesquisadores que defendem a importância pedagógica da história da ciência, concluindo que a sua relevância deve ser medida a partir da questão “até que ponto aprendemos com a história?”. Segundo ele,

Não podemos aprender com a história da ciência a resolver problemas científicos específicos. Mas podemos avaliar e compreender melhor a nossa ciência atual, no seu contexto social, com a ajuda do conhecimento da sua história. (KRAGH, 2001, p. 45)

No contexto escolar, isso significa que a história da ciência seria capaz de colocar o aluno em contato com a natureza do conhecimento científico e tornar a ciência mais agradável e humana, atraindo mais alunos para suas fileiras e também desenvolvendo concepções de ciência menos dogmáticas nos alunos e um maior senso crítico sobre os empreendimentos científicos. Entretanto, Kragh (2001) adverte que o ensino baseado em história da ciência por si só não garante que esses objetivos sejam alcançados, e pode inclusive ser usado para fortalecer dogmas e ideologias.

Saito (2010) também concorda que “embora a História da Ciência seja uma mediadora para a aprendizagem de ciências, não é método de ensino, mas uma provedora de recursos que conduz à reflexão sobre o processo de construção do conhecimento científico” (SAITO, 2010, p. 4). Segundo ele, as propostas de interface entre história da ciência e ensino se dividem em (a) de intervenção e (b) de fornecimento de subsídios. É neste último papel que o presente trabalho pretende contribuir.

Observa-se, ainda, que os documentos curriculares recentes, como os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (BRASIL, 1999) e o documento preliminar da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (BRASIL, 2015) se encontram em consonância com a historiografia contemporânea da ciência, ao apresentar o conhecimento científico como desenvolvimento humano, contextualizado diacronicamente, e não como produto acabado, resultado de uma história vencedora e linear, como é frequentemente apresentado pela historiografia tradicional (PORTO, 2010; SAITO, 2010).

Vidal e Porto (2011, 2012) defendem que os estudos de casos, ou episódios históricos, apresentados de forma minuciosa (especialmente do ponto de vista das continuidades e rupturas), contribuem para que os objetivos educacionais da atualidade, representados nos documentos oficiais, sejam alcançados:

através de estudos de casos minuciosos em história da ciência, pode-se desenvolver a compreensão da complexa relação entre ciência, tecnologia e sociedade, demonstrando que a ciência não é uma atividade isolada de todas as outras, mas parte de um contexto no qual influencia e é influenciada. [...] o estudo detalhado de alguns episódios da história da ciência é insubstituível na formação de uma concepção adequada sobre a natureza das ciências, incluindo suas limitações e suas relações com outros campos da cultura. (VIDAL; PORTO, 2012, p. 295)

Tais estudo de caso não devem mostrar uma visão simplista como a de que um único evento, como um experimento, pode provocar a mudança de opinião da comunidade científica acerca de teorias, que são elaborações complexas de conceitos, construídas ao longo períodos relativamente longos e de forma coletiva, e por isso não podem ser contestadas de forma única, repentina ou por um único pesquisador. Nesses estudos de caso, os conhecimentos científicos atuais enriqueceriam a interpretação da ciência do passado, mas sem incorrer em anacronismos que comprometam a visão de ciência como fenômeno cultural.

2.3.2. História da ciência e formação de professores

De acordo com Martins (2006), há cerca de uma década a historiografia da ciência ainda não estava suficientemente difundida, apesar do crescente reconhecimento do valor da história da ciência para a compreensão da construção da ciência e, portanto, para seu ensino em todo o mundo, inclusive no Brasil. Ele aponta como prova desse reconhecimento a ênfase dada à história da ciência nos PCN. Ele defendeu que era o momento, então, para sua introdução em todos os níveis, a começar pela formação dos professores. No entanto, ele cita três barreiras para o pleno uso da história da ciência no ensino:

- (1) a carência de um número suficiente de professores com a formação adequada para pesquisar e ensinar de forma correta a história das ciências;
- (2) a falta de material didático adequado (textos sobre história da ciência) que possa ser utilizado no ensino; e (3) equívocos a respeito da própria natureza da história. (MARTINS, 2006, p. XXV–XXVI)

Entretanto, Cuellar Fernández e colaboradores (2010) afirmam que a importância da história da ciência para a formação dos professores já está bem documentada, e apontam três aspectos fundamentais da formação docente: “o conhecimento disciplinar, o conhecimento didático da disciplina e a formação em competências do pensamento científico” (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010, p. 278); os dois últimos, intimamente relacionados à presença da história da ciência nos programas de formação de professores:

o componente histórico na formação dos professores de ciência possibilita alguns objetivos relacionados a *uma maior compreensão da atividade científica*, de compreensão profunda dos significados e dos modelos teóricos e seus conceitos associados; possibilidade de *estabelecer relações metateóricas com a filosofia e a sociologia da ciência*; servir de ponte entre as disciplinas científicas e as humanidades, *avaliação dos modelos científicos vigentes* enquanto construções teóricas sistematicamente progressivas. (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010, p. 279)

Os autores ressaltam, portanto, a contribuição da história da ciência para a avaliação da validade dos modelos científicos, trazendo-a ao alcance do professor.

Cuellar Fernández e colaboradores (2010) mostraram, em uma pesquisa com professores chilenos, que apenas 10% desses professores apresentavam uma visão de ciência como construção social, que tem métodos próprios e comporta um grande grau de subjetividade. Entretanto, a maioria dos professores admite que a história da ciência pode representar vantagens ao ensino de química, embora não tenham claro

como implementar a história da ciência em suas aulas. Os resultados evidenciam que professores submetidos a uma formação que considera perspectivas históricas têm mais tendência a incorporar essa perspectiva em seus materiais didáticos – e, provavelmente, em suas práticas de sala de aula. Vidal e Porto (2012) afirmam que, inserida na formação dos professores, a história da ciência contribuiria para a presença de uma epistemologia da ciência mais rica em sala de aula. A história da ciência pode, portanto, “potencializar mudanças significativas no discurso do professor” (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010, p. 289).

Os materiais didáticos podem transmitir a ideia errônea de que a ciência é estática, um produto acabado, resultado de um progresso contínuo e linear até uma “verdade” representada pela ciência atual. O fato de os conceitos científicos estarem escritos em livros não significa que esses conceitos não possam ser modificados. É papel dos professores levar os alunos a compreenderem que

[...] os conceitos, modelos e teorias científicas que constituem a estrutura da química acabam sendo substituídos por outros, e que os marcos ideológicos que fundamentam o conhecimento em cada época sofrem igualmente um processo de mudança conceitual ou paradigmático natural, sistemático, contínuo e irreversível, que pode ser compreendido à luz de certos princípios teóricos e caracterizado com critérios metodológicos específicos. (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010, p. 279)

Assim, seria fundamental reconhecer o papel do professor como promotor da mediação entre a história da ciência e a ciência escolar. Para que os professores cumpram esse papel, é preciso que estejam convencidos dessa historicidade, o que implica levar a cabo novas propostas de formação dos professores que incluam a história da ciência, permitindo ao professor de química maior participação em sua própria formação profissional e científica (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010). Desse empreendimento faz parte o esforço de produção de materiais de qualidade em história da ciência, alinhados com os pressupostos da historiografia contemporânea.

Vidal e Porto (2011) afirmam que muitas fontes secundárias e livros didáticos continuam repetindo abordagens inadequadas em história da ciência, o que reforça a necessidade do desenvolvimento de uma visão crítica por parte do professor que lhe permita discordar desses materiais quando necessário. Na sua proposta curricular para o estado de Minas Gerais, Mortimer e colaboradoras (2000) apontam a importância de que os professores não sejam meramente treinados a usar materiais, mas que sejam capazes de elaborá-los, que sejam “sujeitos da mudança”

(MORTIMER *et al.*, 2000, p. 273–274). Dessa discussão se depreende o papel central do livro didático, que passaremos a discutir a seguir.

2.3.3. História da ciência nos livros didáticos

Muitos pesquisadores já apontaram a importância do livro didático como fonte de informação na produção de material didático original pelos professores (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010; ECHEVERRÍA *et al.*, 2008; LOPES, 1992; MEGID NETO; FRACALANZA, 2003; MÓL *et al.*, 2005; MORTIMER; SANTOS, 2008; MORTIMER, 1988; VIDAL; PORTO, 2012; ZANON, 2008). Daí a importância de garantir uma visão de ciência historicamente adequada e conceitualmente atualizada nos livros didáticos. Cuellar Fernández e colaboradores afirmam que há pouca reflexão dos professores acerca do modelo de ciência, o que leva à reprodução do mesmo modelo que lhes foi ensinado, utilizando como referência os mesmos livros didáticos em que aprenderam. Isso é ainda agravado pela pouca divulgação de fontes de referência em história da ciência que não assumam uma visão tradicional e que possam servir de base para a produção de materiais didáticos (CUELLAR FERNÁNDEZ *et al.*, 2010; MARTINS, 2006).

Martins (2006) aponta que os livros didáticos mostram os resultados da ciência, mas não como foram obtidos, ou seja, não nos mostram, geralmente, como a ciência é construída, processo que relaciona aspectos externos e internos à ciência:

Os livros científicos didáticos enfatizam os resultados aos quais a ciência chegou – as teorias e conceitos que aceitamos, as técnicas de análise que utilizamos – mas não costumam apresentar alguns outros aspectos da ciência. De que modo as teorias e os conceitos se desenvolvem? Como os cientistas trabalham? Quais as ideias que não aceitamos hoje em dia e que eram aceitas no passado? Quais as relações entre ciência, filosofia e religião? Qual a relação entre o desenvolvimento do pensamento científico e outros desenvolvimentos históricos que ocorreram na mesma época? (MARTINS, 2006, p. XXI)

O autor aponta também a presença de textos que disseminam uma história da ciência deturpada e reforçam mitos. Essa visão é enfatizada pelas revistas de divulgação, televisão e internet e se propagam na sala de aula e nos livros didáticos: “Os autores de livros científicos didáticos, geralmente com a melhor das intenções, introduzem em suas obras uma série de informações sobre história da ciência – em geral, também, completamente errôneas” (MARTINS, 2006, p. XXVIII). Ele recomenda que

um bom texto sobre história da ciência, para poder ser utilizado na educação, deve ser escrito em linguagem adequada e simples, procurando explicar tudo claramente, sem pedantismos acadêmicos mas sem tentar simplificar e transformar em “água com açúcar” a complexidade histórica real. (MARTINS, 2006, p. XXVIII)

Nesse sentido, trabalhos de investigação condizentes com os pressupostos atuais da historiografia, que possam referenciar o trabalho de produção de materiais didáticos e a inserção da história da ciência na formação de professores, constituem importantes contribuições para a área de ensino de ciências.

2.4. Análise textual discursiva (ATD)

Apresentaremos a seguir os pressupostos da ATD, procurando evidenciar as congruências e interfaces entre esta, a historiografia e a epistemologia da ciência, argumentando em favor da construção de um quadro teórico-metodológico que integre essas três esferas.

2.4.1. Contribuição da ATD

Conforme exposto, a análise a que nos propomos tem como objetivo caracterizar o dualismo eletroquímico de Berzelius, definir sua relevância em dois contextos históricos distintos e identificar sua possível presença em livros didáticos, discutindo suas implicações para o ensino de química. Não basta uma análise historiográfica do tipo que, conforme os pressupostos historiográficos apresentados anteriormente, se resume ao objeto da ciência (que, com base na definição de Kragh, poderíamos representar por H_2C_1). Embora esta possa estar presente, somente uma análise que considere o processo de construção do conhecimento científico (H_2C_2) poderá trazer os elementos contextuais necessários à compreensão em nível mais profundo que desejamos.

Para que esses objetivos possam ser alcançados da forma mais adequada, e levando em consideração que nossas fontes são textos, se faz necessária uma metodologia qualitativa de análise documental, que tenha como foco não o simples teste de hipóteses, mas sim a compreensão dos conceitos em seus contextos próprios e suas consequências. A ATD nos oferece essa perspectiva, pois “Não pretende testar hipóteses para comprová-las ou refutá-las ao final da pesquisa; a intenção é a compreensão, reconstruir conhecimentos existentes sobre os temas investigados”

(MORAES; GALIAZZI, 2011, p. 11). A reconstrução histórica do dualismo eletroquímico, e também a análise de sua eventual presença em livros didáticos, exige que nos dispamos de ideias preconcebidas e nos coloquemos na perspectiva do outro, assumindo uma atitude fenomenológica, ou seja, permanecendo abertos e atentos para o que possa emergir das leituras.

Como vimos anteriormente, a interpretação dos fatos, embora embasada em documentos, não é única, pois depende da opção de organização dos documentos assumida pelo investigador. Essa ideia também está presente na ATD. Os sentidos implícitos no texto emergem dessa análise, o que favorece a reconstrução das regras epistemológicas da ciência em geral, e da metodologia da química em particular, de um dado período histórico, geralmente omitidas nos documentos, por serem de conhecimento comum, tácito e trivial (DEBUS, 1991; MORAES; GALIAZZI, 2011).

2.4.2. Historiografia, epistemologia e ATD

Minayo (2004) aponta que, dentro de uma concepção mais moderna, a análise documental admite, no plano epistemológico, um modelo instrumental que considera que “numa comunicação, o mais importante não é o conteúdo manifesto da mensagem [...], mas o que ela expressa graças ao contexto e às circunstâncias em que se dá” (MINAYO, 2004, p. 202). No plano metodológico, a análise quantitativa enfatizada, por exemplo, pela análise de conteúdo, é criticada como critério de objetividade e cientificidade, e se busca uma interpretação mais profunda dos significados por meio da inferência, proporcionada pela ATD. Dessa forma, os quadros teórico e metodológico são construídos juntos (MINAYO, 2004; MORAES; GALIAZZI, 2011).

Essa convergência nos encorajou a propor, para esta investigação, um quadro teórico-metodológico que integrasse os princípios da historiografia, da epistemologia e da ATD, representado na figura 2.3.

Essa opção exigiu o trânsito entre essas três esferas, de acordo com o percurso metodológico que procuramos detalhar no próximo tópico, construindo assim nosso quadro teórico-metodológico de forma indissociável. É na intersecção dessas esferas que emergem os sentidos buscados pela nossa investigação.

Figura 2.3. Representação da integração entre a historiografia, epistemologia e análise textual discursiva que forma nosso quadro teórico-metodológico¹⁶.

2.4.3. Percurso metodológico: o estudo de caso histórico

Embora com base na análise de conteúdo, Pimentel (2001) organiza uma série de etapas metodológicas que entendemos como válidas também para o trabalho com a ATD. A definição do “objeto central de interesse” (PIMENTEL, 2001, p. 180) permite o desenvolvimento do trabalho analítico, ou seja, o objetivo de caracterizar o dualismo eletroquímico e sua validade guia a seleção dos documentos produzidos por Berzelius e seus contemporâneos sobre essa teoria (fontes primárias) e os documentos produzidos por outros pesquisadores mais recentes que investigaram o tema, bem como documentos que caracterizem o momento sócio-histórico-cultural que influenciou a elaboração dessa teoria (fontes secundárias). Assim, a partir do objeto central de interesse é definido o *corpus*, ou conjunto de documentos que será analisado.

Nosso *corpus* se constituiu de documentos de Berzelius, seus contemporâneos e pesquisadores atuais do tema que indicam o contexto de produção, a aceitação, a rejeição, as críticas e as limitações da teoria dualista. Julgamos adequado incluir o período imediatamente anterior à elaboração do dualismo eletroquímico, do final do século XVIII, que corresponde à formação científica e cultural de Berzelius,

¹⁶ Essa representação foi inspirada em diagrama similar proposto pela pesquisadora Maria Helena Roxo Beltran, do CESIMA/PUC-SP, que apresenta uma esfera da contextualização, a qual foi substituída, em nosso diagrama, pela esfera da ATD. Nesta investigação, entendemos que a contextualização está implícita nas três esferas: historiografia, epistemologia e ATD.

com a difusão dos novos paradigmas e linguagem da química estabelecidos por Lavoisier; passando pelo princípio do século XIX, com as novas compreensões da natureza elétrica da matéria proporcionadas pela pilha de Volta; e se estendendo até a segunda metade do século XIX, com a mudança de paradigma liderada por Dumas e Laurent para a química orgânica, que levou à contestação do dualismo eletroquímico, e a teoria eletrolítica de Arrhenius, que evidencia limitações do dualismo eletroquímico perante o entendimento científico atual das transformações químicas. Essa delimitação não existia *a priori*; emergiu de um primeiro contato com os documentos pesquisados. Eventualmente, documentos de outras épocas também trouxeram contribuições complementares.

O início da pesquisa envolveu a seleção de documentos e a elaboração de hipóteses sem ainda uma base teórica solidamente estabelecida. Esses documentos foram gradativamente convertidos em um *corpus* mais direcionado de documentos e hipóteses mais maduras, reformuladas a partir da impregnação com os documentos preconizada pela ATD (MORAES; GALIAZZI, 2011).

Mesmo sem levar em conta as fontes secundárias, o *corpus* se mostrou muito extenso, pois Berzelius teve uma produção muito profícua. Somente a respeito de suas investigações experimentais, Berzelius publicou mais de duzentas e cinquenta memórias, e boa parte de sua reputação como cientista repousava em suas habilidades como escritor (GILLISPIE, 2007; JORPES, 1966; RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951])¹⁷. Tendo em vista o prazo disponível para o desenvolvimento desta dissertação, foi realizada uma seleção por critérios de relevância ao tema (ou seja, de acordo com o grau de relacionamento da fonte com o dualismo eletroquímico, priorizando aquelas que façam referência direta a essa teoria ou descrevam sua construção), e de fidedignidade das fontes (o que, como visto, pode ser determinado por comparação com outros textos da época e por referências historiográficas atuais). Utilizamos ainda o critério linguístico, preferindo as traduções para o inglês dos originais suecos e alemães, geralmente produzidas sob supervisão direta de Berzelius. Finalmente, já em um momento mais avançado da análise, usamos o critério de satu-

¹⁷ A obra de Rheinboldt citada é uma reunião póstuma dos artigos publicados nos números 9 e 10 da extinta revista *Selecta Chimica*, de 1950 e 1951.

ração, conforme estabelecido por Bogdan e Biklen (2010), excluindo fontes que fossem redundantes ou que não trouxessem novos elementos de compreensão.

A primeira etapa consistiu na localização dessas fontes, sem preocupação explícita com a análise. Os documentos foram inicialmente pesquisados na obra de referência *Chemical history: reviews of the recent literature* (RUSSEL; ROBERTS, 2005) e em repositórios e revistas eletrônicos direcionados à área de história da ciência, como Isis, JStor, Gallica, Google Livros, Hathi Trust e Internet Archive. A primeira leitura das fontes, especialmente as secundárias, e os objetivos e hipóteses de partida guiaram a busca paralela de outras fontes que proporcionassem maior detalhamento, entendimento do contexto sócio-histórico e de metodologias de análise. Assim, o *corpus* foi construído gradativamente no decorrer da investigação, e de forma dinâmica, com a adição e a eliminação de documentos de acordo com as necessidades que foram se delineando. Esse processo, em consonância com o recomendado por Kragh (2001) e por nós esquematizado na figura 2.4, foi reiterativo e se fez presente durante todo o decorrer da investigação.

A ATD, por se relacionar, na nossa investigação, especialmente à análise dos documentos escritos, se inicia na etapa 4 indicada na figura 2.4. Entretanto, por ser um processo de progressiva impregnação com os textos, que são reiteradamente revisitados e reinterpretados, a ATD se difunde e se faz presente, a partir daí, em todas as etapas, pois o que emerge da pesquisa faz lançar constantemente novos olhares para nossas questões de pesquisa, e mesmo redefinir nossos interesses a respeito do tema.

No que diz respeito a Berzelius, o desafio passa, nas condições desta investigação, pela dificuldade de acesso às fontes utilizadas, por ele e por seus pares, na sua formação pessoal e científica, e que embasaram o dualismo e as teorias concorrentes, e passa também pelo domínio da língua em que foram redigidas. Essa é uma limitação que se procurou superar, sempre que possível, pela utilização de fontes secundárias, validadas por comparação com outras fontes, edições ou traduções.

Após a primeira leitura do *corpus*, a partir dos princípios estabelecidos por Pimentel (2001) e Moraes e Galiuzzi (2011) e guiados pelos referenciais historiográficos e epistemológicos, os critérios de seleção, organização, inter-relação e interpretação do material coletado começaram a ficar mais claros. O *software* de organização bibliográfica Mendeley foi utilizado para organizar e arquivar as fontes, o que

apoiou a elaboração de um fichamento dos documentos (desenvolvido a partir da etapa 4 indicada na figura 2.4), que incluiu os seguintes itens:

- Código de identificação;
- Referência bibliográfica do documento;
- Tipo de documento (livro, capítulo de livro, artigo de periódico etc.);
- Tema central da unidade de análise;
- Resenha;
- Relação com a pesquisa;
- Resumo, esquemas, comentários e transcrições.

Cada fonte fichada constituiu uma unidade de análise.

Figura 2.4. Fases de condução da pesquisa historiográfica.

O item “Relação com a pesquisa” se relaciona aos indicadores de orientação para a interpretação final recomendados por Minayo (2004). O “Resumo” teve ênfase na descrição, se baseou na interrogação das fontes por meio das questões de pesquisa e promoveu uma primeira reconstrução interpretativa do material, correspondendo a um metatexto inicial. Para tanto, foram utilizados os recursos *Styles* e *Document Map* do Microsoft® Word™, que permitiram criar uma lista hierarquizada de códigos e temas que facilitou a visão geral das unidades de análise (UA) e unidades de significado (US), a busca de inter-relações entre elas e sua reorganização em direção à produção do texto final (Apêndice I). Os processos de interpretação e de descrição foram simultâneos e interdependentes, pois “é preciso compreender que não há descrição sem interpretação” (ORLANDI, 1999 *apud* MORAES; GALIAZZI, 2011, p. 142). Essa etapa exigiu que as leituras fossem revisitadas para garantir uma interpretação mais homogênea, de forma condizente com o processo de impregnação com as fontes recomendado pela ATD (MORAES; GALIAZZI, 2011). A validação da metodologia foi realizada por meio da discussão com os pares, no GHQ e em três congressos¹⁸.

A interpretação deve ser contextualizada e intimamente relacionada ao gênero discursivo do sujeito – ou seja, aquele pelo qual o dualismo eletroquímico foi originalmente concebido e divulgado (MORAES; GALIAZZI, 2011). Recorrendo ao texto das fontes utilizadas e ao nosso referencial teórico-metodológico, buscamos uma interpretação coerente com o discurso social da época. Isso significa que, a partir de um trabalho descritivo inicial, buscamos uma interpretação a mais fiel possível daquela de Berzelius e seus pares.

A partir de certa massa crítica de textos, diversas relações entre as fontes ficaram evidentes, e foi possível cruzar informações, cujas relações puderam ser aprofundadas ou confirmadas à medida que mais textos eram submetidos à análise. O processo assemelha-se ao da construção de uma teia, que é formada a partir de pontos diversos, interligando-os de forma cada vez mais consistente em direção a um todo coerente. Nesse processo, o produto final é mais do que a soma das partes,

¹⁸ Resumos da investigação em curso, com ênfase no quadro teórico-metodológico, foram apresentados em forma de pôster na V Jornada de História da Ciência e Ensino (V JHCE, PUC-SP) e em forma de comunicação oral no III Simpósio Mineiro de Ensino de Química (III SMEQ, UFJF-MG) e no X Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (X ENPEC, ABRAPEC), todos em 2015. Por ocasião do III SMEQ, nossa metodologia foi submetida à validação da Prof. Dra. Maria do Carmo Galiazzi, coautora da metodologia da ATD.

é um novo objeto, que se estabelece como produção autoral, firmemente ancorado nas referências, mas com existência própria.

Das leituras, durante as quais termos e expressões consideradas relevantes, de acordo com os objetivos da investigação, foram destacadas, emergiram os temas centrais das UA. Um mesmo tema pode estar em mais de uma unidade, e uma unidade pode conter vários temas, o que levou a uma nova reorganização do material, em US. Estas foram separadas, recodificadas, nomeadas de forma a sintetizar os temas centrais e reorganizadas, agrupando-se os temas com o auxílio de uma planilha eletrônica (Apêndice II). Esse processo foi repetido, produzindo um primeiro nível de categorias, em um movimento do particular para o geral (MORAES; GALIAZZI, 2011).

Minayo (2004) e Pimentel (2001) ressaltam a “codificação, interpretação e inferências” como essenciais para “decifrar, em cada texto, o núcleo emergente” (PIMENTEL, 2001, p. 189), os conteúdos centrais presentes nas UA e US e relacionados aos objetivos de pesquisa. Dentro do contexto da ATD, o núcleo emergente gera os títulos para as US codificadas, que constituem indicadores para o estabelecimento de categorias (MORAES; GALIAZZI, 2011; PIMENTEL, 2001).

As categorias produzidas foram agrupadas respeitando critérios de exaustividade e pertinência (MINAYO, 2004). Após reiterada análise e busca de novas possibilidades de agrupamento (PIMENTEL, 2001), foram constituídos novos níveis de categorias, mais gerais. O resultado é apresentado nos quadros 2.1 e 2.2.

Quadro 2.1. Sistema inicial de categorias para a dimensão teórico-metodológica.

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Descrição
Referencial teórico-metodológico	Epistemologia da ciência		Referências que fundamentam a teoria e a metodologia quanto aos aspectos epistemológicos.
		Relação entre epistemologia e história da ciência	Relações entre história da ciência e epistemologia da ciência.
		Delimitação do objeto de estudo	Sobre o papel da epistemologia na caracterização, escolha e delimitação do objeto de estudo.
		Crítérios de validação de uma teoria e construção da ciência	Crítérios, científicos ou não, pelos quais uma teoria científica é validada e a ciência é construída.
		Modelo do tribunal	Sobre o modelo da escola ou modelo do tribunal de Canguilhem.
	Historiografia da ciência		Referências que fundamentam a teoria e a metodologia quanto aos aspectos historiográficos.

Presentismo	Define e dá exemplos do conceito de presentismo.
Hagiografia	Define e dá exemplos do conceito de hagiografia.
Precursionismo	Define e dá exemplos do conceito de precursionismo.
Anacronismo e diacronismo	Define e dá exemplos dos conceitos de anacronismo e diacronismo.
Internalismo e externalismo	Define e dá exemplos dos conceitos de internalismo e externalismo.
Fontes	Define o que é fonte histórica e dá critérios para sua seleção e uso.
Panorama da historiografia da ciência	Tendências e percursos históricos da historiografia, sem detalhar definições dos conceitos historiográficos.
Papel da historiografia da ciência	Sobre a importância, a contribuição e o papel da historiografia da ciência.
Objeto da historiografia da ciência	Define o objeto da investigação em historiografia da ciência.
Análise historiográfica	Embasa o processo de mapeamento e interpretação do contexto histórico e outros aspectos da análise historiográfica.
História da ciência e ensino	Referências que justificam a investigação em relação à interface história da ciência e ensino.
Papel da história da ciência no ensino	Sobre as possíveis formas de uso da história da ciência no ensino.
Contribuição da história da ciência para o ensino	Aponta problemas no ensino e enumera as contribuições que a história da ciência pode trazer.
Relação entre ciência e ensino	Influência recíproca entre ciência e ensino.
Análise textual discursiva	Referências que fundamentam a teoria e a metodologia quanto à ATD.

Quadro 2.2. Sistema inicial de categorias para a dimensão do dualismo eletroquímico.

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Descrição
Dualismo eletroquímico	Origem e conceito		Caracterização conceitual da teoria dualista de Berzelius dentro do contexto científico-cultural da época
	Contexto científico		Sobre o contexto científico-tecnológico que teria influenciado os acontecimentos.
	Economia e tecnologia		Relação entre a mineração e outros aspectos da economia sueca e mundial e o dualismo eletroquímico e a visão de ciência de Berzelius.
	Política		Relação entre a visão de ciência de Berzelius e as decisões e influências políticas.
	Arte		Relação entre a visão de ciência e o dualismo de Berzelius e as belas-artes.
	Visão de ciência		Visão de ciência, método e habilidades científicas de Berzelius e seus pares.
	Origem, conceito e mecanismo		Características iniciais do dualismo eletroquímico, sua definição e estrutura de funcionamento.

Dualismo na química orgânica	Como a teoria dualista era aplicada à química orgânica e suas limitações.
Conceito de eletricidade	Conceito de eletricidade de Berzelius.
Pilha e eletrólise	Funcionamento da pilha e sua relação com os fenômenos eletroquímicos e princípios dualistas.
Afinidade química	Conceito de afinidade química e sua relação com o dualismo eletroquímico.
Eletronegatividade	Conceito de eletronegatividade e seu papel no dualismo eletroquímico.
Proporções e atomismo	Sobre as proporções químicas, sua relação com o atomismo e outros conceitos e seu papel no dualismo eletroquímico.
Forma, natureza e propriedades	Sobre o papel da natureza e/ou forma e posição dos átomos no comportamento químico.
Validade	Referências que indiquem o período e contexto em que o dualismo eletroquímico foi válido.
Validação de uma teoria ou conceito	Regras de funcionamento da ciência e critérios de validação de um conhecimento químico adotados à época.
Filosofia e religião	Sobre a influência da religião e de correntes filosóficas na aceitação ou contestação do dualismo eletroquímico.
Prestígio e comportamento	Sobre a personalidade de Berzelius e aspectos externos à ciência que reforçaram ou abalaram seu prestígio.
Duração e validade	Referências que confirmam a validade e/ou o período de aceitação do dualismo eletroquímico e discutem suas bases epistemológicas.
Química e mineralogia	Sobre a validade do dualismo eletroquímico na química inorgânica, na orgânica e na mineralogia.
Permanência e reconciliação	Indícios da permanência de elementos da teoria dualista de Berzelius após sua superação e diferenças em relação ao conceito original.
Superação	Referências que indiquem quando e em que contexto o dualismo eletroquímico foi superado
Duração e contestação	Indicações do período em que o dualismo eletroquímico foi contestado, e dos motivos da sua superação.
Concorrência e superação na química orgânica	A questão dos radicais, a controvérsia com teorias concorrentes e outras dificuldades relacionadas à química orgânica.
Limitações fora da química orgânica	Obstáculos ao dualismo eletroquímico na química inorgânica e outras áreas.
Atitude de Berzelius	Quanto à reação de Berzelius frente à contestação do dualismo eletroquímico.

Os quadros acima, embora obtidos de forma semelhante, têm funções distintas. O primeiro representa a construção do referencial teórico-metodológico, com base em fontes representativas da historiografia e da epistemologia contemporâneas da ciência.

O segundo quadro embasa o estudo de caso em si, expressando como cada aspecto presente nos documentos investigados – fontes primárias e estudos historiográficos relacionados ao dualismo eletroquímico – se relaciona aos elementos historiográficos e epistemológicos presentes na fundamentação teórica. Os documentos utilizados na construção de cada quadro são discriminados no Apêndice III.

Por vezes, a produção do estudo de caso indicou lacunas teóricas ou históricas, que foram preenchidas pela busca de novas referências ou lançando-se novos olhares sobre as fontes já pesquisadas. Além disso, durante a produção dos metatextos, foi necessário definir novos recortes e fazer escolhas, em benefício de um texto final mais coeso e coerente com os objetivos e prazos. Assim, nem todas as categorias apresentadas nos quadros anteriores estão presentes neste trabalho mas, ao reconhecer o valor meta-historiográfico desta investigação, optamos por mantê-las nos quadros como registro do nosso percurso metodológico.

A ordenação rigorosa do conteúdo em categorias garante que os resultados possam ser reproduzidos em pesquisas qualitativas que seguem uma análise textual (MINAYO, 2004). O resultado do estabelecimento de diversos níveis de categorias é um mapeamento do objeto de estudo, que está de acordo com princípios da análise historiográfica e epistemológica, e é um meio de se conhecer as bases teóricas do sujeito da investigação (PIMENTEL, 2001)

As categorias levaram à organização das seções do texto final, e as diversas US possibilitaram a elaboração do texto, construído a partir das inter-relações emergentes. Durante o processo, ficou evidente a necessidade de algumas remodelações das seções e lacunas pontuais nos textos que, assim, foram resolvidas de forma mais direcionada e objetiva.

2.4.4. Percurso metodológico: a análise dos livros didáticos

Para a etapa de análise dos livros didáticos de química fez-se necessário uma delimitação dos conteúdos a serem investigados mais detalhadamente nesses livros. Nosso foco de análise inicial foi, a partir do mencionado artigo de Mortimer e colaboradoras (2000), os esquemas de dupla-troca, tradicionalmente inseridos em tópicos relacionados à classificação das reações químicas, geralmente encontrados nos volumes direcionados ao primeiro ano do Ensino Médio. Por isso, e também em função do prazo estabelecido, optamos por limitar nossa análise aos volumes de primeiro

ano, e selecionamos para a investigação as quatro coleções aprovadas no PNLD de Ensino Médio mais recente¹⁹. Consideramos esta uma escolha adequada, tendo em vista que esse programa determina os livros que poderão ser utilizados por um número expressivo de alunos da rede pública, a qual atende a grande maioria dos alunos de Ensino Médio do país. Esses livros são:

- *Química*: ensino médio (MORTIMER; MACHADO, 2014) (LD1)
- *Química* (FONSECA, 2013) (LD2)
- *Ser Protagonista* (ANTUNES, 2013) (LD3)
- *Química Cidadã* (SANTOS; MÓL, 2013) (LD4)

Os códigos LD1 a LD4 indicados à direita na lista anterior identificam as obras nesta investigação.

Analizamos essas obras à luz das interpretações emergentes da análise historiográfica realizada e dentro de princípios da ATD. Inicialmente, propusemos uma categorização *a priori* de acordo com quatro categorias estabelecidas de forma intuitiva, resultado de *insights* oriundos da impregnação com as US (MORAES; GALIAZZI, 2011), especialmente as extraídas de Mortimer e colaboradoras (2000), que indicaram o conhecimento ritual e o conhecimento de princípios (apresentados no tópico 1.3):

- US que apresentariam a dupla-troca ou o deslocamento apenas como sistema classificatório, levando ao ensino ritualístico;
- US que apresentam a dupla-troca ou o deslocamento como regra relacionada a um princípio químico;
- US que não apresentam a dupla-troca ou o deslocamento.

Também pretendíamos identificar se a dupla-troca ou o deslocamento eram apresentados em uma perspectiva histórica ou não. Entretanto, diante do estudo de caso realizado e das primeiras leituras das US selecionadas nos livros didáticos, percebemos que estavam ao nosso alcance análises mais ricas dos textos didáticos, que vão além da suposta relação entre o dualismo eletroquímico e os esquemas de dupla-troca e deslocamento. Tais situações foram discutidas, no capítulo 4, com ba-

¹⁹ A publicação da lista de obras aprovadas no PNLD mais recente para o Ensino Médio foi divulgada em agosto de 2014, e definiu as quatro obras que estão sendo utilizadas na rede pública no triênio 2015 a 2017.

se no estudo de caso realizado. O fluxograma da figura 2.5 ilustra como foi planejada, inicialmente, a sistematização dessa análise que, posteriormente, pôde ser flexibilizada de acordo com as particularidades de cada livro didático e das situações surgidas ao longo do trabalho.

Figura 2.5. Fluxograma de análise dos livros didáticos.

A partir dos sumários das obras, procuramos localizar tópicos potencialmente relacionados ao dualismo eletroquímico – em especial, aqueles ligados à formulação de substâncias químicas, à apresentação das reações químicas e sua classificação, aos modelos atômicos, às leis ponderais e estequiometria e ao comportamento ácido-base. Os títulos de capítulos em que se inserem as US selecionadas, como aparecem no sumário de cada obra, são apresentados no quadro 2.3.

Quadro 2.3. Títulos investigados em cada obra.

Obra	Títulos
LD1	O que é química?
	Modelos para o átomo e uma introdução à tabela periódica
	Introdução às transformações químicas

Quantidades nas transformações químicas	
LD2	Notações químicas
	Eletricidade e radioatividade
	Compostos inorgânicos
	Metais e oxirredução
LD3	Modelos atômicos e características dos átomos
	Balanceamento de equações e tipos de reações químicas
	Ácidos e bases
	Sais e óxidos
LD4	Substâncias inorgânicas

Os tópicos localizados foram lidos, e os trechos considerados relacionados aos objetivos propostos foram transcritos (ou, em alguns casos, descritos), codificados (figura 2.6), nomeados de acordo com os títulos dos tópicos nos quais estavam inseridos no original e interpretados de acordo com nosso quadro teórico-metodológico.

Figura 2.6. Exemplo de codificação das unidades de análise obtidas a partir dos livros didáticos.

Após reiteradas leituras, de acordo com a ATD, algumas US, consideradas pouco relevantes para os objetivos propostos, foram excluídas; outras tiveram sua ordem alterada, procurando produzir um texto mais coerente e fluente. Isso ficou evidenciado pelos códigos. Os resultados são apresentados no capítulo 4 desta dissertação.

No capítulo 3, a seguir, apresentamos os resultados referentes à etapa de caracterização do dualismo eletroquímico e determinação do período em que esteve vigente como teoria aceita por parcela majoritária da comunidade científica, ou seja, nosso estudo de caso histórico.

CAPÍTULO 3. O dualismo eletroquímico de Berzelius

Neste capítulo, procuramos caracterizar conceitualmente a teoria dualista de Berzelius, apresentar seu desenvolvimento e as controvérsias que se seguiram, levando ao seu declínio. Dentro dos pressupostos teórico-metodológicos desta investigação, isso envolve traçar um panorama do contexto em que o dualismo eletroquímico foi desenvolvido e que o teria influenciado de alguma forma, a partir do qual discutiremos os aspectos mais relevantes dessa teoria.

De forma sucinta, o dualismo eletroquímico foi desenvolvido a partir de um vácuo teórico proporcionado pelos novos fenômenos observados a partir da pilha de Volta no início do século XIX, período em que Berzelius começava a se inserir no meio científico. O dualismo eletroquímico propunha que todas as substâncias seriam formadas de duas partes, uma eletricamente positiva e a outra, negativa. A união dessas partes seria, portanto, de natureza elétrica. Essa teoria concordava com as observações experimentais de eletrólises, possibilitadas pelo uso da pilha de Volta, e explicou a afinidade – uma questão científica em aberto na época – em termos de eletricidade. A teoria dualista de Berzelius reuniu, assim, os resultados empíricos, as teorias das proporções definidas, a afinidade e o atomismo em um resistente e frutífero arcabouço teórico, que a manteve como a principal teoria química por cerca de quatro décadas, até que os esforços para a sistematização do crescente número de compostos orgânicos caracterizados evidenciou anomalias que não mais puderam ser absorvidas pelo dualismo eletroquímico, levando a teorias concorrentes e ao seu progressivo abandono. Todo esse processo científico, entretanto, não foi simples: envolveu circunstâncias e fatores internos e externos à ciência que procuramos detalhar a seguir.

3.1. O cenário sueco no contexto europeu

A Era da Liberdade (*Frihetstiden*) da Suécia, entre 1718 e 1771, precedeu o nascimento de Berzelius, e se seguiu à Grande Guerra do Norte. Nessa época, o Império Sueco era poderoso, mas saiu da guerra desintegrado e enfraquecido, com a redução de parte de seu território e de um terço da população. Os esforços de recuperação envolveram a dinamização da economia, com muita intervenção estrangeira na economia e política suecas (SCOTT, 1983).

Scott (1983) aponta que “os políticos da Era da Liberdade não conseguiram produzir ordem, mas ordem e sistematização foi precisamente a área na qual grandes conquistas do período foram feitas [no âmbito da ciência]” (SCOTT, 1983, p. 252). Na Europa, o interesse pela Natureza e suas leis – bem como a crença na capacidade humana de controlar essas leis – se faziam notar, por exemplo, nos jardins dos palácios ingleses e franceses. A Era da Grandeza, que antecedeu a Era da Liberdade, do início do século XVII ao início do século XVIII, colocou os suecos em contato com as ideias e movimentos do restante da Europa. Suas conquistas militares projetaram o país internacionalmente e elevaram a confiança do povo, atribuindo tanto às classes mais abastadas quanto às mais pobres o “senso do ‘eu posso’” (SCOTT, 1983, p. 259). Com o colapso do império, os suecos se sentiram ainda mais estimulados, certos de que eles eram iguais, em potencial científico, ao restante da Europa.

No final do século XVII e início do XVIII, sob o governo de Gustavo II Adolfo, houve um revigoramento das Universidades, com a reativação da Universidade de Uppsala (fundada em 1477), incorporação de Universidades de territórios anexados e fundação de novas Universidades, como a de Lund, em 1666. O número de estudantes provenientes da educação básica aumentava. O modelo adotado era inspirado nas universidades da Alemanha, França e Noruega. Esse ambiente intelectualmente favorável, porém, parecia não ser ainda suficiente para o desenvolvimento da ciência sueca (SCOTT, 1983).

A Suécia da Era da Liberdade era um país pobre, e por isso concentrou esforços no mercantilismo como forma de enriquecimento. Investiu-se em uma educação prática, que pudesse contribuir para o desenvolvimento econômico sueco. O Rei Carlos XI enviou o jovem e promissor estudante Christopher Polhem (1661-1751) a uma “longa viagem de estudos à Inglaterra e ao continente” (SCOTT, 1983, p. 252) e lhe garantiu um salário por suas habilidades mecânicas, aplicadas à mineração. Polhem abriu uma oficina, onde recebia estudantes suecos e estrangeiros. Seus conhecimentos eram técnicos, com os quais procurava formas de impulsionar a industrialização sueca. Nesse período, o empirismo e a filosofia cartesiana foram largamente disseminados em Uppsala por Olof Rudbeck (1630-1702), este, um acadêmico e um nacionalista. Polhem e Rudbeck teriam estabelecido os “fatores estimulantes” para o surgimento de uma geração de estudiosos ligados a uma ciência que

ainda estava bastante relacionada às necessidades práticas da economia sueca (SCOTT, 1983, p. 259). Um desses estudiosos foi Carl Linnæus, ou Lineu.

Lineu (1707-1778) estudou em Lund e Uppsala, onde conheceu Rudbeck, que apoiou um convite para que Lineu lecionasse botânica no verão. Logo ele estruturaria seu sistema de classificação, cuja “simplicidade e utilidade do método foi um tremendo passo adiante no conhecimento organizador” (SCOTT, 1983, p. 256)²⁰. A botânica servia, no século XVIII, de modelo taxonômico para as demais ciências, pois mostrava o “plano divino da Natureza” de divisão de gêneros e as gradações entre as espécies (MELHADO, 1992, p. 140). O empirismo e sistematização cartesiana de Rudbeck possivelmente influenciaram a classificação botânica de Lineu e, indiretamente, como veremos adiante, a posterior classificação química dualista de Berzelius.

Com vistas à recuperação econômica, o governo distribuiu salários, títulos e altas posições para os pesquisadores, que eram reconhecidos internacionalmente:

O governo sueco, dominado pelo pensamento mercantilista, estava bastante consciente do valor econômico das descobertas realizadas. O Conselho de Minas encorajava e subsidiava a pesquisa, e no meio do século a Suécia era o centro de liderança para a metalurgia. (SCOTT, 1983, p. 259)

Apesar de muitos estudiosos suecos estarem ligados à investigação puramente científica do mundo natural, o esforço de financiamento tecnológico do governo levou muitos deles a se dedicarem ao desenvolvimento de processos e materiais para as indústrias. “As grandes conquistas da época não foram em teoria obscura, mas na descoberta e organização da vasta riqueza que a Natureza provia, fortalecendo assim as fundações para o futuro trabalho científico e exploração industrial” (SCOTT, 1983, p. 259). Impressionados com esse sucesso, muitos pesquisadores estrangeiros convidaram suecos para fazer parte de suas sociedades científicas, e muitos estudantes estrangeiros queriam estudar com os cientistas suecos.

Esse investimento em uma ciência prática teria contribuído para o desenvolvimento da química sueca. Torbern Bergman (1735-1784), considerado o paralelo de Lineu em química, reorganizou o departamento de química de Uppsala, especialmente o trabalho em laboratório, e fez contribuições para a análise química (SCOTT, 1983). Esse cenário possibilitou uma série de isolamentos de elementos

²⁰ Um dito popular sueco diz: “Deus criou, Lineu organizou” (SCOTT, 1983, p. 256).

químicos na Suécia e, possivelmente, abriu caminho para a precisão analítica de Berzelius que colaborou para seu prestígio internacional.

A atenção de Bergman foi atraída pelos feitos experimentais do jovem Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), como seus estudos sobre a composição do ar. A posição acadêmica de Bergman possibilitou a Scheele publicar artigos e ser convidado para a Academia de Ciências sueca. Muitos de seus trabalhos se relacionavam a aspectos práticos, especialmente ligados à indústria e mineração, melhorando processos. Scheele também descreveu um grande número de substâncias novas. Com o aumento do número de substâncias conhecidas na época, surgiu a necessidade de sistematizá-las, especialmente tendo em vista o sucesso da taxonomia de Lineu na biologia.

Entre Polhem e Rudbeck e entre Bergman e Scheele criou-se um ambiente de cooperação. Esse efeito se multiplicou e foi fortalecido por viagens de estudo ao exterior, que acabaram por consolidar intercâmbios duradouros. Sob inspiração do Iluminismo francês, “a interação foi encorajada pelas sociedades científicas tanto no exterior quanto internamente: a Academia de Ciências em Uppsala foi fundada em 1728, e a Academia Real de Ciência Sueca foi estabelecida em Estocolmo em 1739” (SCOTT, 1983, p. 259).

Na década de 1770, a Suécia mostrava grande aumento populacional (acompanhando a tendência geral europeia). Isso exigiu o desenvolvimento de uma agricultura mais eficiente para sua alimentação. Novas formas de divisão das fazendas, produtos e técnicas foram criados e testados, com o apoio da Academia de Ciências. A necessidade de conhecer o cultivo nas diversas regiões da Suécia e desenvolver novos métodos motivou viagens de Lineu e influenciou seu trabalho em botânica. Os experimentos ingleses que podiam oferecer alguma contribuição à agricultura também eram estudados pelos suecos. Atividades econômicas que reduzissem as importações, como a da lã, pela criação de ovelhas, foram estimuladas. Embora o progresso observado tenha sido, a princípio, lento, o resultado foi a formação de uma geração de fazendeiros bem informados, especialmente pela ação do clero:

[...] o clero deve ser reconhecido por disseminar informação sobre drenagem adequada, criação de animais, rotação de culturas, e outras inovações agrícolas; em uma extensão considerável eles atingiram seus objetivos, por exemplo, nos distritos rurais os pastores eram fazendeiros em pequena escala, mas esclarecidos. (SCOTT, 1983, p. 262)

Muitos estudiosos provinham de famílias de pastores protestantes: Swedenborg (1688-1772), discípulo de Polhem; Celsius (1701-1744); Von Rosenstein (1706-1723) e o próprio Lineu são exemplos (SCOTT, 1983). Foi nesse ambiente rural eruditizado que nasceu Berzelius, filho do pastor e mestre de artes do colégio de Linköping Samuel Berzelius (BERZELIUS, 1934 [1842])²¹.

3.2. A formação científica de Berzelius

Órfão de pai aos quatro anos de idade, o primeiro contato de Berzelius com a instrução científica se deu por meio de “exercícios não meramente de memorização, mas assuntos para o pensamento e consideração dos próprios alunos”, proporcionados pelo seu padrasto, Ekmark, também ele um pastor, e pelo tutor Haglund, quando Berzelius contava pouco mais de dez anos de idade (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 3). Ekmark e Haglund levavam Berzelius e seus meios-irmãos para passeios pelo campo e os encorajavam a coletar flores, ensinando-os também a preservá-las e a prensá-las, e a aprofundar conhecimentos sobre elas no livro *Grinalda de flores*, de Johannes Palmberg, que estava entre as obras estudadas por Lineu. Berzelius recorda as palavras de Ekmark em sua autobiografia: “Jacob, você recebeu a habilidade para seguir os passos de Lineu ou Descartes” (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 4). Ainda que essa frase possa nunca ter sido realmente dita, mostra a influência da filosofia natural, em particular do sistema classificatório de Lineu, na formação do jovem Berzelius.

Nessa época, a Europa era palco de guerras e instabilidade política. O ambiente científico e intelectual da Suécia passou a ser carregado de pessimismo e de conflitos estéticos, filosóficos e políticos. Após a Era da Liberdade, a ciência declinou sob o governo de Gustavo III (LINDROTH, 1992; SCOTT, 1983). O mercantilismo dominante na primeira metade do século XVIII foi gradualmente perdendo força para o liberalismo econômico, sob influência francesa, “a inspiração e o protótipo” do Iluminismo sueco (SCOTT, 1983, p. 268). Berzelius “era uma criança do período Gustaviano’ do Iluminismo sueco ‘e foi educado sob o domínio do modo francês”

²¹ Lindroth (1992) afirma que, embora diversos detalhes das *Notas autobiográficas* (BERZELIUS, 1934 [1842]) tenham de ser constantemente confrontados com outras referências, elas são confiáveis no que diz respeito a como Berzelius atingiu sua posição e as dificuldades postas em seu caminho, do ponto de vista de como o próprio Berzelius via a sua realidade.

As *Notas autobiográficas* de Berzelius foram apresentadas à Academia de Ciências sueca originalmente em 1823 e complementadas em 1842, e estão representadas aqui pela tradução inglesa de Oloff Larsell de 1934.

(SÖDERBAUM, 1899 *apud* ROCKE, 1992, p. 109). Em 1793, foi admitido, com seus primos, no ginásio de Linköping, e progrediu rapidamente nos estudos. Motivado por atritos com seus primos, e aconselhado por um amigo, Berzelius procurou sua independência tutorando outros alunos, e foi contratado em uma fazenda. Lá, reencontrou seu antigo tutor, Haglund, que lhe emprestou um exemplar do *Fauna Svecica* de Lineu e o acompanhou em excursões de coleta de espécimes. Em decorrência desses interesses, Berzelius decidiu estudar medicina (BERZELIUS, 1934 [1842]).

Berzelius voltou a Linköping, onde seu conhecimento botânico despertou a atenção do historiador natural Hornsted, que acabava de retornar de uma expedição botânica nas Índias Ocidentais (empreendimento comum entre os discípulos de Lineu). Hornsted recebeu Berzelius em sua casa e lhe deu instrução em zoologia, utilizando a *Fauna*, de Lineu. Berzelius se dedicou a esse estudo de tal forma que negligenciou o ginásio, onde considerava que pouco aprendia. Como resultado, quando conseguiu sua admissão para o curso de medicina na Universidade de Uppsala, em 1796, ele estava entre os últimos colocados (BERZELIUS, 1934 [1842]).

Em Uppsala, Berzelius continuou trabalhando como tutor para se manter financeiramente. Em 1798, ele conseguiu uma bolsa de estudos e passou nos exames médico-filosóficos, estudando com a ajuda de seu meio-irmão Lars Kristopher Ekmark, que na época se encontrava

ocupado com investigações elétricas que tiveram tal sucesso que a Academia de Ciências aceitou para seu *Proceedings* um experimento particularmente belo para provar a teoria de Symmer²² dos dois tipos de eletricidade, que até aquele momento não estava totalmente estabelecida. (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 22)

Na época, Berzelius não tinha nenhum conhecimento sobre eletricidade. Essa investigação o impressionou de tal forma que ele declarou estar “tomado de um sentimento nunca antes experimentado”; e “irrevogavelmente arrebatado por seu método de buscar conhecimento” (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 22). Berzelius repetiu os experimentos de Ekmark com equipamentos improvisados e, juntos, eles decidiram estudar química (BERZELIUS, 1934 [1842]). Em Uppsala estava se difundindo a

²² Robert Symmer (1707-1763), filósofo natural escocês, propôs que a eletricidade não seria uma força única, mas sim composta por duas forças opostas (ou fluidos opostos). Uma análise detalhada dessa proposta, publicada em 1759, é feita por Heilbron (1976).

química antiflogística – ainda que em ritmo mais lento do que no restante da Europa (LUNDGREN, 1992).

As pesquisas na Suécia se tornaram apenas reprodução do que se fazia no exterior, e não havia substitutos para Bergman, Scheele e Lineu. A química era representada por Johan Afzelius (1753–1837), professor de química na Universidade de Uppsala, caracterizado por Lindroth (1992) como “excêntrico e improdutivo”, embora seu assistente Anders Gustaf Ekeberg (1767–1813) tivesse se esforçado por manter as relações científicas internacionais e os incentivos à educação científica. Afzelius era adepto da teoria do flogístico, enquanto Ekeberg se opunha a essa teoria. Berzelius, cujos conhecimentos de química eram limitados, tinha a impressão de que a química antiflogística facilitava o estudo da química (BERZELIUS, 1934 [1842]). Assim, se tornou adepto da revolução química de Lavoisier (LINDROTH, 1992; RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951]). Ao lado disso, aderiu a grupos liberais e progressistas de estudantes, alinhados ao Iluminismo francês, o que teria contribuído para que Berzelius moderasse sua herança religiosa (GREENAWAY, 1979; LINDROTH, 1992; ROCKE, 1992).

Ekeberg cobrava por suas aulas, o que fez com que Berzelius se tornasse autodidata, estudando em livros como os de Fourcroy e Girtanner, contrários ao flogístico, e que alimentaram seu interesse pela experimentação (LUNDGREN, 1992). Como Fourcroy, Berzelius direcionou seus estudos de medicina para a química animal, de caráter experimental, e produziu diversas publicações sobre o tema durante boa parte de sua carreira. A pesquisa em química animal ajudou, mais tarde, a desenvolver a química orgânica (ROCKE, 1992).

Lindroth (1992) sugere que as dificuldades enfrentadas por Berzelius desde a infância até o início de sua carreira profissional exigiram perseverança, o que pode justificar sua disposição nas discussões científicas e sua consolidação como árbitro da ciência. Órfão muito cedo, Berzelius teve que se mudar diversas vezes, não se sentia bem recebido na casa de parentes, se envolveu em intrigas entre professores no ginásio e na Universidade e tinha situação financeira difícil. Em sua autobiografia, Berzelius enfatiza essas dificuldades e o papel que a educação (especialmente do seu próprio esforço nos estudos) teve em sua superação (BERZELIUS, 1934 [1842]).

3.3. A construção do dualismo eletroquímico

Para Gay (1976), há um “germe teórico” e um “substrato experimental” sobre os quais toda teoria assenta suas bases, que para o dualismo eletroquímico seriam:

1. A invenção da pilha voltaica; a investigação de suas propriedades, em particular sua aplicação à decomposição da matéria; 2. A Teoria Atômica de Dalton; 3. A generalização empírica conhecida como as Leis da Composição Constante e das Proporções Múltiplas; 4. O dualismo de Lavoisier. (GAY, 1976, p. 3)

Em 1800, enquanto trabalhava como assistente de Sven Hedin com águas minerais em Medevi (GREENAWAY, 1979), Berzelius teve contato com a pilha de Volta, que havia sido introduzida na Suécia por Johan Gottlieb Gahn (1745-1818). Berzelius acompanhou experimentos realizados por Afzelius, se impressionou com o instrumento e logo construiu sua própria pilha (BERZELIUS, 1934 [1842]).

Em meio ao ambiente científico de incompetência e desânimo na Suécia do início do século XIX, Berzelius conseguiu apoio para suas pesquisas originais somente fora da academia, com Wilhelm Hisinger (1766-1852) e Gahn, ambos atuantes muito mais na tecnologia da mineração do que na ciência sueca (BROOKE, 1992). Berzelius desenvolveu frutífera associação com o abastado e esclarecido Hisinger, empresário da mineração com quem compartilhava o interesse pelo galvanismo, e que lhe ofereceu sua própria casa. Embora Berzelius não tivesse intenção de enveredar pela pesquisa inorgânica, seu patrono determinou o tema de sua pesquisa: a eletrólise de sais (GREENAWAY, 1979; ROCKE, 1992).

A partir de 1803, Hisinger e Berzelius eletrolisaram sais com a pilha voltaica recém desenvolvida, obtendo em seus polos ácidos, bases e metais, o que foi proposto como generalização para a composição de todas as substâncias (BERZELIUS, 1845). Essa teoria teve papel marginal em um primeiro artigo de Berzelius, mas encontrou grande correspondência com fatos experimentais que prometiam ampla aplicação industrial. Esse teria sido um dos motores do desenvolvimento da teoria que ficou conhecida como dualismo eletroquímico (GAY, 1976).

3.3.1. O conceito dualista

Arrhenius (1907) descreveu da seguinte forma as conclusões de Berzelius oriundas do trabalho com Hisinger:

Sais neutros²³ são decompostos pela corrente elétrica. Em geral, compostos químicos são decompostos pela corrente, e seus componentes coletados nos polos.

Para o polo negativo migram as substâncias combustíveis (e.g., hidrogênio), álcalis e terras²⁴; para o polo positivo, oxigênio, ácidos e compostos oxidados. A mesma substância pode em alguns casos migrar para o polo positivo, em outros para o polo negativo. Assim, por exemplo, nitrogênio migra para o polo negativo durante a eletrólise da amônia, e para o polo positivo, junto com o oxigênio, na eletrólise do ácido nítrico. (ARRHENIUS, 1907)

Assim, uma mesma substância elementar poderia ter diferentes cargas, dependendo da outra à qual se combina, relativismo que é central na teoria de Berzelius (ARRHENIUS, 1907). Essas substâncias elementares foram chamadas de radicais, e entendidas como o corpo combustível (como o carbono ou o ferro, por exemplo, que podem ser queimados, produzindo os óxidos correspondentes) que faz parte do óxido (ácido ou base), formado não só por átomos simples, mas também (principalmente a partir de evidências da química orgânica) por partículas compostas que estão tão fortemente ligadas que se comportam como elementos, podendo ter sua eletronegatividade relativa determinada (BERZELIUS, 1845; GAY, 1976). O radical era entendido como átomo, grupos de átomos ou substâncias que se combinavam ao oxigênio, e era, em sua essência, imutável²⁵.

O dualismo de Berzelius não foi a única teoria dualista elaborada no século XIX. Por toda a Europa, a pilha de Volta estimulou a busca de teorias explicativas para os fenômenos eletroquímicos. Humphry Davy afirmou que não importava quão grande era a energia envolvida nos processos químicos, ela poderia ser sempre equiparada por uma pilha adequada (GAY, 1976; LINDROTH, 1992; ROCKE, 1992). Berzelius e Hisinger, em seu artigo de 1803, haviam antecipado os trabalhos de Davy, porém

Os nomes desconhecidos dos autores não atraíram nenhuma atenção particular para isso. Mas quando Humphry Davy, quatro anos e três meses mais tarde, pela aplicação dessas leis, apresentou as mais brilhantes descober-

²³ De acordo com as ideias aceitas à época, quando, em uma solução de dois componentes, nenhum deles apresenta as características químicas que apresentava antes da dissolução (ou, em termos atuais, da reação entre eles em solução), como suas reações com ácidos ou bases, essa solução é neutra, e o composto nessa solução é neutro (FREUND, 1904).

²⁴ Álcalis eram entendidos como substâncias capazes de alterar a cor de certos extratos naturais coloridos (como o tornassol) de forma oposta às alterações provocadas pelos ácidos. Também eram as bases sobre as quais os ácidos agiam produzindo substâncias cristalizáveis, os sais (CHAGAS, 2000). O termo "terra" era geralmente aplicado ao que entendemos hoje como óxidos e alguns outros tipos de substâncias infusíveis (GREENBERG, 2007).

²⁵ Eriksson (1992) descreve um argumento biológico de Newton em favor dessa imutabilidade dos átomos: se os átomos mudassem sempre, animais e plantas não poderiam pertencer a gêneros e espécies, pois eles estariam em constante alteração casual.

tas que a ciência tinha mostrado, a inveja trouxe justiça para nós.
(BERZELIUS, 1934 [1842], p. 40)

De acordo com Berzelius, “Davy fez como se nossos resultados lhe fossem desconhecidos; mas ele citou um experimento que era descrito em nosso artigo, para criticá-lo” (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 40). Em 1819, Berzelius apresentou seu trabalho em teoria eletroquímica e proporções químicas à Academia de Ciências francesa, e Vauquelin reconheceu que se tivessem conhecido seu trabalho com Hisinger antes, teriam dividido com ambos o prêmio oferecido por Napoleão a Davy por seu trabalho (BERZELIUS, 1934 [1842]). Isso contribuiu para o prestígio de Berzelius.

Davy, em 1812, Berzelius, em 1818, e Ampère, em 1821, teriam proposto as três teorias eletroquímicas mais importantes. A teoria de Ampère era influenciada provavelmente pela cristalografia de Haüy, e afirmava que as partículas elementares, que tinham certas formas definidas primitivas, se combinavam para produzir formas regulares. Ele também considerava que as combinações se relacionavam às forças elétricas; entretanto, sua teoria não explicava por que alguns elementos apresentavam comportamento ambíguo (como o enxofre, capaz de se combinar tanto com o cobre quanto com o oxigênio, obtidos em polos opostos na pilha). A teoria de Davy tinha o inconveniente de se basear na eletrificação por contato²⁶, que não era bem aceita por investigadores como Dumas (LEVERE, 1970). O trabalho empírico de Berzelius levou a um dualismo diferenciado e mais exitoso em relação aos de Davy e Ampère, embora as teorias destes dois não tenham sido descartadas:

A eletrólise de sais e particularmente o êxito de Davy, Berzelius e outros no isolamento de metais foi seguido por uma proliferação de hipóteses a respeito da combinação eletroquímica. A teoria de Berzelius teve a maior influência entre os químicos e foi aplicada com sucesso na química inorgânica.” (LEICESTER, 1952 *apud* GAY, 1976, p. 3)

A pilha de Volta representou, assim, uma revolução no entendimento da matéria e classificação das substâncias pois, de acordo com a concepção lavoisieriana, não haveria como ter certeza de que uma substância é simples: ela seria assim considerada apenas pela incapacidade de separá-las em outras mais simples. A pilha de Volta proporcionava uma nova e poderosa forma de análise, e indicava que as substâncias sempre podiam ser decompostas em duas partes, de naturezas elétri-

²⁶ De acordo com Davy, os elementos não apresentavam naturalmente cargas elétricas: estas seriam transferidas a eles pelo contato com outros elementos eletricamente carregados, por exemplo, por atrito.

cas opostas (BERZELIUS, 1845). Isso representava a base empírica de sustentação da teoria dualista (RUSSELL, 1963).

Berzelius afirmava rejeitar especulações, procurando construir uma ciência teórica embasada em dados empíricos, ou mesmo em outras sólidas teorias, a despeito da ciência eminentemente prática demandada pela mineração e manufatura suecas (LIEDMAN, 1992; LINDROTH, 1992; LUNDGREN, 1992). Mais de uma vez, em seu *An attempt to establish a pure scientific system of mineralogy*²⁷, Berzelius atribuiu a confiabilidade de um resultado experimental à exatidão do experimento – sem, entretanto, detalhar seus critérios. Aparentemente, estes se relacionavam fortemente à técnica e ao zelo do experimentador, como exemplifica a seguinte opinião emitida por Berzelius: “Eu tive a oportunidade de testemunhar a exatidão com que o Sr. Schoüberg conduziu seus experimentos” (BERZELIUS, 1814, p. 118). A boa ciência era sinônimo de trabalho pesado, intenso, que se concretizava no laboratório químico. A inspiração do cientista era “um fogo fátuo no qual a pena se move na escuridão ao tentar apresentar qualquer coisa, mas o que a pesquisa encontra [i.e., coloca sob] suspeita, *ensaia* e mais uma vez se convence” (BERZELIUS, 1831 *apud* BERNHARD, 1992, p. 232, grifo nosso).

Saltzman (1973) afirma que a teoria de Berzelius foi publicada somente em 1819. A data condiz com a estabelecida por Gay (1976), mas provavelmente não se refere à primeira versão da teoria, pois contradiz o que se indica no *An attempt* (BERZELIUS, 1814). Nesse trabalho, Berzelius cita como fonte seu *Essay on nomenclature and the electro-chemical system*, de 1812, data que coincide com a indicada por Lopes (1995)²⁸.

A partir de elementos das teorias eletroquímica de Davy e dualista de Lavoisier (SALTZMAN, 1973; GAY, 1976), Berzelius estabeleceu inicialmente que:

Combinações e decomposições químicas são elétricas por natureza. (Isso é comum à teoria de Davy.) (2) Átomos são dipolares, exceto o oxigênio, que

²⁷ Berzelius (1814). A partir deste ponto, passaremos a indicar essa obra apenas por *An attempt*.

²⁸ Evidentemente, o esforço aqui não é no sentido de registrarmos uma “data de nascimento” do dualismo eletroquímico – já que este não foi concebido em uma forma completa e perfeitamente definida; antes, e como as demais teorias científicas, consistiu em um desenvolvimento contínuo, sendo submetido a inúmeras remodelações, especialmente diante das dificuldades enfrentadas no campo da química orgânica. Procuramos sim estabelecer o período em que seu desenvolvimento se iniciou, para que pudéssemos buscar no período documentos que nos informassem. Ademais, o estabelecimento de “datas de nascimento” como forma de cronologia da história da ciência não é condizente com os pressupostos da historiografia contemporânea da ciência (MARTINS, 2006).

é unicamente negativo. (Essa exceção é *ad hoc* e foi incluída para dar conta do fato de que o oxigênio era comum a certas bases fortes.) (3) Átomos têm cargas polares antes do contato. (Em certo sentido essa parte da teoria nasceu refutada; Davy, reconhecendo as dificuldades, propôs sua negação em sua teoria.) (4) Na maioria dos átomos a força de um polo predomina, com o resultado líquido que os átomos são tanto eletropositivos quanto eletronegativos. (A ideia de dipolos não balanceados era totalmente inaceitável aos físicos.) (5) Se átomos da mesma polaridade líquida entram em contato, aquele com maior polaridade pode induzir a polaridade oposta no outro. (Isso também é *ad hoc* e foi introduzido para dar conta de compostos como o dióxido de enxofre (SO₂), os quais contêm dois elementos eletronegativos.) (6) Compostos poderiam estar associados com polaridade residual. (Novamente, *ad hoc*; desta vez para dar conta da combinação de átomos com polaridade oposta mas desigual.) (GAY, 1976, p. 13)

A eletricidade, principalmente a partir da observação dos fenômenos possibilitados pela pilha de Volta, desempenha papel central no dualismo eletroquímico. De acordo com Berzelius, todo material teria matéria elétrica, composta de duas eletricidades (positiva ou negativa). Dois corpos de mesma eletricidade se repelem, e de eletricidades opostas se atraem (BERZELIUS, 1845). O modelo dualista de Berzelius distinguia a intensidade de carga em cada polo dos átomos da carga líquida, já que as cargas opostas não eram necessariamente de mesma intensidade. Em nenhum corpo simples essa carga seria nula, de acordo com o conceito de unipolaridade²⁹. A estabilidade dos sais seria uma indicação de que haveria cargas remanescentes nos ácidos e bases, que eram neutralizadas na sua combinação, em diversos níveis ou ordens (figura 3.1). Os ácidos e bases seriam formados por óxidos de radicais, e constituíam uma primeira ordem de compostos, a mais simples. Os compostos formados por esses óxidos – como os sais – representavam a segunda ordem, e estes ainda podiam se combinar, formando sais duplos ou ainda mais complexos, de ordens superiores (GREENAWAY, 1979; KLEIN, 2003).

Essas combinações, das ordens inferiores às superiores, refletiam o progressivo grau de neutralidade elétrica dos compostos. Berzelius exemplifica que o resultado da união de átomos de potassa (KO) e de ácido sulfúrico (SO³) é sulfato potássico neutro; mas um átomo de potassa tem ainda alguma afinidade residual, pois pode se combinar a dois átomos de ácido sulfúrico, originando o bissulfato potássico

²⁹ Uma evidência da unipolaridade era que as chamas de corpos combustíveis alcalinos se inclinavam para corpos com eletricidade negativa; dos ácidos, para corpos positivos. O fogo era considerado por Berzelius uma manifestação da neutralização elétrica dos corpos em sua transformação química, assim como faíscas eram produzidas em pilhas (BERZELIUS, 1845).

(BERZELIUS, 1845). De acordo com Russell (1963), “Na afirmação de que ‘sais são combinações de óxidos’ pode ser visto o germe da teoria dualística de Berzelius” (RUSSELL, 1963, p. 134).

Figura 3.1. Constituição³⁰ dualística dos sais (adaptado de KLEIN, 2003, p. 154).

Essa teoria fornecia uma excelente explicação para a formação de sais, dispensando qualquer explicação para a afinidade que não fosse a própria atração entre cargas opostas, e proporcionando previsibilidade, a partir de uma escala de eletropositividade determinada empiricamente (BROOKE, 1992; GAY, 1976; GREENAWAY, 1979; LOPES, 1995; MELHADO, 1992; RUSSELL, 1963).

3.3.2. Eletronegatividade

Em artigo de 1811 no *Journal de Physique*, Berzelius propõe uma das primeiras versões do seu conceito de eletronegatividade, que divide as substâncias em dois grandes grupos:

A respeito de suas relações com as eletricidades, nós as dividimos em substâncias “eletropositivas” e “eletronegativas”. Eu chamo as substâncias de “eletropositivas” se, nas decomposições acarretadas pela pilha elétrica, elas se acumulam em torno do polo positivo, e “eletronegativas” se elas se acumulam em torno do polo negativo. (BERZELIUS, 1811 *apud* RUSSELL, 1963, p. 127)

Assim, a classificação é dualista porque

³⁰ Greenaway (1979) indica que as teorias de composição e de constituição não eram uma só teoria no início do século XIX, e que Berzelius contribuiu para que se integrassem como partes de um só conceito. De acordo com Klein (2003), a composição se refere aos elementos químicos e suas quantidades, em termos de átomos, volumes ou pesos atômicos, em uma substância, enquanto que a constituição remete à forma com que os átomos estão ligados entre si. Assim, os resultados experimentais com a eletrólise de ácidos, bases e sais fornecem tanto a composição dessas substâncias quanto indícios para a interpretação dualista de sua constituição.

um critério é necessário para a divisão em duas grandes classes, e Berzelius o encontra na eletrólise: substâncias eram obviamente negativas se eram coletadas no polo negativo, e também “se em combinação com oxigênio elas se acumulavam em torno do polo positivo durante a operação da pilha”. (RUSSELL, 1963, p. 128)

A convenção de sinais no dualismo pode refletir duas formas de interpretação do fenômeno da eletrólise: uma baseada em atração, que diz que a eletricidade positiva atrai o oxigênio, que nesse polo é libertado; e outra que diz que ele é repelido pelo polo negativo e, por ele, libertado. Assim, Berzelius associou as partes eletro-negativa e eletropositiva aos polos negativo e positivo da pilha, respectivamente, de forma contrária a outros sistemas da época. Mais tarde ele adotou a convenção oposta, provavelmente quando percebeu que isso poderia facilitar a aceitação do seu sistema (RUSSELL, 1963).

O conceito de eletronegatividade determina, portanto, o de afinidade, e é sua base empírica. Berzelius construiu diversas séries de eletronegatividade (à medida que novas evidências eram reunidas, novos elementos eram incluídos, e mudavam-se suas posições), nas quais o oxigênio recebeu a eletronegatividade absoluta, já que não se conhecia elemento que se comportasse mais eletronegativamente que ele. Os demais tinham eletronegatividades relativas. Ao oxigênio se seguiam os metaloides (que produziam ácidos, como o enxofre) e metais, incluindo amônia (que produziam álcalis) (BERZELIUS, 1845). Quanto mais próximos ao oxigênio na série eletroquímica, mais fortes seriam os ácidos formados por esses elementos. Não havia eletropositividade absoluta, embora o potássio estivesse no outro extremo da série (BERZELIUS, 1814). Para Berzelius,

Os átomos devem suas propriedades às suas naturezas elétricas, que podem ser positivas ou negativas, em um grau específico para uma dada substância; devido a isso, qualquer elemento pode ser relacionado sem ambiguidade a um lugar na escala eletroquímica. (LEVERE, 1970, p. 112)

A série de Berzelius coincidia com a de Volta (determinada de acordo com a teoria da eletrificação por contato) e a de Ritter (estabelecida por meio de reações entre metais e seus sais em solução) (ARRHENIUS, 1907). Resultados semelhantes, obtidos de forma independente e baseados em métodos confiáveis, reforçavam uma teoria:

Eu [...] soube que o Sr. Smithson, um dos mais experientes mineralogistas da Europa, sem nenhum conhecimento do meu ensaio [sobre o estabelecimento da teoria eletroquímica, envolvendo as combinações da sílica para formar sili-

catos], publicou uma ideia similar em uma memória sobre a natureza da stilbita e do mesotipo [classes de minerais]. Não se pode negar que essa coincidência de resultado, derivada por um lado de pura química, e de outro de um ponto de vista mineralógico analítico, proporciona uma forte evidência da exatidão do resultado, que me dá a esperança de que nenhum mineralogista totalmente familiarizado com o presente estado da química irá ainda considerar qualquer dúvida a respeito disso. (BERZELIUS, 1814, p. 28)

A classificação a seguir, ordenando substâncias em termos de eletronegatividade, é de 1813:

- (i) “Absolutamente eletronegativo: oxigênio sozinho.”
- (ii) “Eletronegativos em geral”: estes consistiam de todos os combustíveis que formam óxidos ácidos, incluindo os “metaloides” e “os metais arsênico, molibdênio e volfrâmio.”
- (iii) “Corpos com uma natureza eletroquímica variável”: formavam óxidos de caráter intermediário entre eletropositivos e eletronegativos, ou eram alternativamente capazes de produzir, em diferentes estados de oxidação, óxidos básicos e ácidos.
- (iv) “Indiferentes”: tais substâncias não eram nem ácidas nem básicas, e incluíam certos óxidos e sais.
- (v) “Eletropositivos: corpos combustíveis e seus óxidos, os quais, durante a ação da pilha, nunca são coletados em torno do polo positivo”. Isso, é claro, incluía a maioria dos metais. (RUSSELL, 1963, p. 129)

O estabelecimento da série eletroquímica consistiu em uma importante forma de sistematização. Os corpos compostos foram classificados de acordo com o elemento mais eletropositivo – ou seja, de acordo com o radical ligado ao oxigênio. A eletronegatividade dos elementos acompanhava a dos óxidos, e era o elemento ligado ao oxigênio que ditava a eletronegatividade do composto – ou seja, a eletronegatividade não era uma propriedade somente dos elementos, mas também dos compostos (RUSSELL, 1963). Berzelius ainda não sabia, em 1814, a exata relação eletroquímica entre os corpos simples, mas nesse ano já apresentou uma primeira aproximação, provisória, conforme a tabela³¹ a seguir (BERZELIUS, 1814):

³¹ A tabela foi publicada, no original, em duas colunas, provavelmente por motivo relacionado à paginação, e aqui, pelo mesmo motivo, rediagramada em quatro colunas. Entretanto, ela deve ser entendida como uma “fila” única em cada categoria, de modo que o hidrogênio seria o menos eletronegativo dentre os metaloides, e o potássio seria o mais eletropositivo dentre os metais.

1. *Oxigênio.*

2. *Metaloídes.*

Enxofre	Radical muriático	Radical fluorídrico	Carbono
Nítrico ³²	Fósforo	Boro	Hidrogênio

3. *Metais.*

Arsênico	Ósmio	Estanho	Alumínio
Crômio	Bismuto	Níquel	Magnésio
Molibdênio	Írídio	Cobre	Cálcio
Tungstênio	Platina	Urânio	Estrôncio
Antimônio	Ouro	Zinco	Bário
Telúrio	Ródio	Ferro	Sódio
Silício	Paládio	Manganês	Potássio
Tântalo	Mercúrio	Cério	
Titânio	Prata	Ítrio	
Zircônio	Chumbo	Glucínio ³³	

Com a teoria dualista de Berzelius, o conceito de ácido e base passou a ser eletroquímico: as substâncias eram classificadas de acordo com a propriedade de se formar em um determinado polo da pilha de Volta. Mesmo substâncias que não apresentavam caráter ácido ou básico pelos critérios tradicionais se acumulavam em determinado polo, o que sugeria que acidez e basicidade eram apenas situações dentro de propriedades mais gerais: a eletronegatividade e a eletropositividade. A existência de óxidos metálicos básicos, proposta por Davy, e que não era coerentemente explicada pelo sistema de Lavoisier³⁴, passou a ser pelo de Berzelius (MELHADO, 1992). Mas para Berzelius a quantidade de oxigênio combinado poderia transformar um corpo eletropositivo em eletronegativo (BERZELIUS, 1845).

³² Para Berzelius, o nítrico era o radical que, combinado ao oxigênio, produzia o nitrogênio.

³³ Posteriormente chamado de berílio.

³⁴ Para Lavoisier, o oxigênio seria o princípio da acidez, daí o nome (oxigênio = gerador de ácidos).

3.3.3. O dualismo eletroquímico na mineralogia

Berzelius defendia que a abordagem de novas situações deveria ser feita com base no que era análogo em situações conhecidas. Ele cita, no *An attempt*, a analogia de Lineu dos seres vivos com o reino mineral, que procurava lançar luz, a partir de conhecimentos razoavelmente estabelecidos, sobre áreas mais obscuras da ciência (BERZELIUS, 1814). Assim, somente em 1813, sentindo-se seguro de seus feitos na química inorgânica, Berzelius estendeu sua classificação à mineralogia. A necessidade de conhecer a composição dos minerais era importante dentro da economia sueca, e contribuiu para que Berzelius desenvolvesse sua classificação dos tipos de matéria com ênfase na composição (espécies), e não nas propriedades, que resultavam de princípios (gêneros) (BERZELIUS, 1814; MELHADO, 1992), distanciando-se aqui da ciência de Lavoisier. Ademais, a extensão exitosa do sistema químico de Berzelius à mineralogia contribuía para sua validação e para a consolidação da química como ciência, com o dualismo eletroquímico exercendo o papel de lei geral, nos moldes do que já ocorrera na física. Berzelius tinha os requisitos necessários: uma grande capacidade de sistematização, com uma “propensão a reunir os mais diversos dados possíveis em um sistema de classificação abrangente” (RUSSELL, 1963, p. 127). Entretanto, essa lei geral poderia nunca estar ao alcance do químico: “Está além dos limites do nosso débil poder trazer qualquer ciência a um estado de perfeição; pois nesse caso todas as ciências seriam combinadas em uma” (BERZELIUS, 1814, p. 8).

Assim, no *An attempt*, Berzelius apresentou seu sistema de classificação mineral:

A teoria eletroquímica nos ensinou a procurar, em cada corpo composto, pelos ingredientes de propriedades eletroquímicas opostas, e nós aprendemos dela que as combinações estão relacionadas com uma força que é proporcional ao grau de oposição da natureza eletroquímica dos ingredientes. Disso decorre que em cada corpo composto há um ou mais ingrediente eletropositivo com um ou mais ingrediente eletronegativo, o que, como as combinações consistem de óxidos, é o mesmo que dizer que cada corpo na combinação por nós chamado de *base* deve ser contraposto por outro que atua como um ácido, mesmo supondo que isoladamente ele não possua as características gerais pelas quais um ácido é identificado, nomeadamente, um sabor azedo, e a propriedade de tornar vermelhos os vegetais azuis. O corpo o qual é, em uma situação, eletronegativo quando combinado com um fortemente eletropositivo, ou seja, o qual é ácido quando combinado com uma base forte, pode em outra situação ser eletropositivo, e estar unido a

um corpo fortemente eletronegativo, ou, o que é o mesmo, pode ser a base para um ácido forte. Assim, na união entre dois ácidos, o mais fraco serve como base para o mais forte. (BERZELIUS, 1814, p. 11–12)

Nesse trecho, podemos diferenciar uma componente metodológica e uma teórica, associadas. Quanto à primeira, representa como, no entendimento de Berzelius, sua teoria dualista permitiria a análise e classificação mineralógica sobre fundamentos essencialmente químicos. Ao associar teoricamente as propriedades ácidas e básicas à eletronegatividade, empiricamente verificadas, ressalta-se seu caráter relacional: um corpo ácido (eletronegativo) pode ser a base (eletropositiva) para um ácido forte.

A classificação mineralógica dualista de Berzelius era similar ao sistema taxonômico de Lineu: a parte eletropositiva do composto determinaria a família, que se dividiria em diversas ordens ou níveis de combinação. Gênero, espécie e variedades foram as subdivisões propostas. As regras de classificação eram baseadas na intensidade de eletronegatividade, em diversos exemplos que representavam sua proposta de classificação dos minerais. O objetivo principal era "criar um arranjo científico" (BERZELIUS, 1814, p. 54).

A figura 3.2 mostra um exemplo, para a família da prata. A relatividade do conceito de eletronegatividade fica clara na descrição da ordem dos antimonetos, quando esse metal passa a se comportar como o elemento eletronegativo, enquanto os metais aos quais o antimônio se liga (no exemplo, a prata) constituem os radicais eletropositivos. Toda a classificação era baseada em cálculos derivados da análise da proporção ponderal, dos quais eram deduzidas as fórmulas.

Figura 3.2. Família da prata (BERZELIUS, 1814, tradução livre do latim).

3.3.4. Proporções químicas e atomismo

O interesse de Berzelius pela análise quantitativa teria sido consequência da necessidade de determinar como a quantidade de oxigênio ligado a um radical modificava suas propriedades eletroquímicas, observadas na pilha de Volta. Berzelius procurava padrões de composição para séries de óxidos e para os radicais entre si em diversos estados de oxidação, e uma lei geral, que possibilitasse a previsão de propriedades e fenômenos (MELHADO, 1992). A partir de 1806, a necessidade de produzir um texto básico para seus alunos de química fisiológica exigiu uma revisão bibliográfica que o colocou em contato com o trabalho sobre as proporções recíprocas de Richter (ROCKE, 1992), e o levou à produção do *Lärbok i kemien*³⁵, sua coleção didática em seis volumes, escrita de 1808 a 1830³⁶. A importância dessa obra

³⁵ Berzelius, J. J. *Lärbok i Kemien*. Estocolmo, 1808-1830. 6 v. Neste trabalho, iremos nos referir a essa obra simplesmente como *Lärbok*, representada aqui pela edição espanhola de 1845, *Tratado de Química* (BERZELIUS, 1845). Entretanto, eventualmente serão inseridos trechos de diferentes edições citadas por outros autores.

³⁶ Rocke (1992) situa o início da escrita do *Lärbok* em 1806, possivelmente tomando como critério o levantamento bibliográfico inicial.

para o dualismo é evidenciada por Berzelius quando afirma: “a química animal com certeza teria sido permanentemente meu principal interesse se a necessidade de um livro de química para meus estudantes não me tivesse impelido a escrever um” (BERZELIUS, 1934 [1842], p. 171).

Os cálculos de Richter se limitavam às reações entre ácidos e bases, e se baseavam no modelo da “dupla decomposição”³⁷:

A lei da neutralidade, um caso especial das proporções equivalentes, se relacionava ao fenômeno da manutenção da neutralidade após mistura de duas soluções, cada uma contendo um sal neutro diferente. Se as proporções de combinação dos constituintes de cada um dos dois sais que eram misturados eram conhecidas, as proporções dos sais produzidos na dupla decomposição que se seguia após a mistura podia ser calculada diretamente. (MELHADO, 1992, p. 147)

Berzelius percebeu que os dados disponíveis de análises não concordavam com as relações estequiométricas de Richter, e desenvolveu suas próprias análises para testá-las. O resultado foi o aprimoramento de sua precisão analítica, que o tornou reconhecido na comunidade científica, e regras que permitiam generalizações sobre a composição de óxidos a partir de uma quantidade mínima de dados, como a regra dos óxidos, cuja primeira versão conhecida data de 1810:

Quando dois corpos oxidados saturam um ao outro, eles sempre contêm oxigênio de acordo com uma proporção tal que a quantidade de oxigênio no corpo que vai ao polo positivo no circuito da pilha elétrica é um múltiplo inteiro da quantidade de oxigênio no outro corpo, o que tende para o polo negativo. (BERZELIUS, 1809-1812 *apud* BERNHARD, 1992, p. 148)

Ou seja, a quantidade de oxigênio do ácido seria sempre um múltiplo inteiro daquela da base, o que restringia o número de compostos permitidos, contrariando a ideia de proporções indefinidas de Berthollet (KLEIN, 2003; LUNDGREN, 1992).

Berzelius defendia que fórmulas de primeira ordem em que nenhum átomo aparecesse como unitário “eram contrárias à lógica” (BROOKE, 1992, p. 186), e sugeriam que um átomo poderia ser dividido em partes mais simples. Eriksson (1992) ressalta que não se sabe no que Berzelius fundamentou essas conclusões, mas certamente elas evitavam o inconveniente de admitir proporções infinitas, ou que as

³⁷ A dupla decomposição era entendida como a reação entre dois sais, cujos ácidos e bases formadores eram trocados entre si (HIGGINS, 1818). Uma pesquisa em mecanismos de busca comuns na internet mostrou que ainda hoje os termos “dupla decomposição”, “metátese” e “dupla-troca” são entendidos como sinônimos em países de língua inglesa. Ver também a nota 52.

proporções definidas fossem confundidas com transições de proporção, resguardando a sua teoria das proporções. O átomo unitário era geralmente representado pelo radical, imutável, ao qual os demais átomos (como os de oxigênio) se ligavam respeitando princípios geométricos: as ligações, determinadas pela afinidade, se limitariam a 12 (figura 3.3), o número máximo de coordenação entre esferas que garantiria o contato entre elas (ERIKSSON, 1992). Ou seja, a ligação entre átomos, para Berzelius, envolvia o contato físico entre eles.

Figura 3.3. Limite geométrico de coordenação entre esferas: 12 esferas de igual diâmetro se organizam ao redor de uma esfera central, nos vértices de um cuboctaedro (BARNES, 2012).

Isso possibilitava a Berzelius estabelecer a série de espécies de qualquer gênero de substância, independentemente da complexidade e do seu comportamento em relação ao conceito original de ácido, base e sal (MELHADO, 1992). Assim, a classificação dos minerais – e das substâncias em geral, por extensão – seria cientificamente mais frutífera se se levasse em conta não só os ácidos e bases que formam um composto, mas também as proporções em que nele se unem (BERZELIUS, 1814). A regra dos óxidos permitia ainda escrever as fórmulas moleculares a partir das fórmulas mínimas – o que constituiu uma excelente ferramenta preditiva (ROCKE, 1992). Em muitos casos, fórmulas de substâncias ainda não obtidas eram previstas e confirmadas experimentalmente; em outros, chegava-se a conclusões incorretas, como considerar o cloreto de enxofre como sal oxigenado, na busca pelos óxidos inferiores de certos radicais (MELHADO, 1992).

Berzelius entendia as proporções ou limites de combinação entre os elementos, dadas pela regra dos óxidos, como manifestação mensurável da afinidade (LUNDGREN, 1992). As diferentes proporções entre os elementos – as chamadas “proporções de combinação” – seriam resultado da gradativa satisfação de suas afinidades pela neutralização de suas cargas elétricas líquidas desiguais (MELHADO, 1992). Essas proporções, para a série de óxidos de nitrogênio conhecidos à época, por

exemplo, considerando o átomo de nitrogênio sempre unitário e o sistema de pesos equivalentes utilizado, e as fórmulas que seriam decorrentes, são (BROOKE, 1992):

Proporções:	1 : ½	1 : 1	1 : 1½	1 : 2½	1 : 2
Fórmulas:	[N + ½O]	[N + O]	[N + 1½O]	[N + 2½O]	[N + 2O]

A princípio, Berzelius não via problema nas proporções de combinação fracionárias, pois podiam ser interpretadas como pesos ou volumes gasosos. Entretanto, suas fórmulas sempre eram escritas utilizando números inteiros, de acordo com a regra dos óxidos. Em meio a esse impasse, em 1809, Berzelius toma conhecimento da teoria atômica de Dalton.

A física de Newton admitia a existência de átomos materiais; porém, não foi exitosa em explicar a afinidade química. Richter havia dado um passo nessa direção, procurando determinar a massa de diferentes átomos que se combinavam com diversas bases, de forma coerente com a gravitação de Newton. Mas uma descrição física completa dos átomos exigia determinar sua forma, o que permanecia inacessível. Isso tinha dificultado a aceitação da ideia de átomos físicos, e a afinidade foi desenvolvida sobre um “vácuo teórico”, que mais tarde começou a ser preenchido com o átomo de Dalton. Para Dalton, era natural associar a ideia de átomos indestrutíveis com os elementos de Lavoisier, em consonância com as ideias newtonianas, em que os pesos dos átomos estariam relacionados com suas propriedades (LUNDGREN, 1992; VIANA; PORTO, 2007).

Se, por um lado, a interpretação das proporções estequiométricas como resultantes da união entre átomos parecia promissora para Berzelius, de outro, as proporções fracionárias implicavam na existência de “meios-átomos”, o que não era compatível com o átomo de Dalton. Para Dalton, esse problema não existia, pois suas representações admitiam mais de um átomo de um mesmo elemento. Assim, a série de óxidos de nitrogênio poderia ser reescrita como [2N + O]; [N + O]; [2N + 3O]; [2N + 5O] e [N + 2O] (BROOKE, 1992). Em 1812, Berzelius se alinhou mais explicitamente ao atomismo – apesar de, ao contrário de Dalton, considerar que os trabalhos de Gay-Lussac sobre as proporções gasosas apoiavam o atomismo, bem como seus próprios resultados em relação às proporções de combinação (ERIKSSON, 1992; LUNDGREN, 1992):

Vê-se que estas relações em volume estão em conformidade com o que disse anteriormente sobre a composição atomística dos corpos. Supondo que um mesmo volume dos gases de todos os corpos simples estejam compostos do mesmo número de átomos, se faz uso indistintamente das palavras átomo e volume, para designar o mesmo peso relativo desses corpos. (BERZELIUS, 1845, p. 140–141)

Berzelius transitava, nessa época, entre várias formas de nomear o que causava as proporções: átomos, pesos, unidades de proporção ou volumes, em função de quais dados eram usados para dar suporte à sua teoria (BERZELIUS, 1814). Ele, entretanto, não conseguiu dar clareza física a esses volumes, enquanto que os átomos eram mais bem definidos (ERIKSSON, 1992). Essa foi uma importante discussão para a consolidação de um modelo atômico químico (LUNDGREN, 1992).

Finalmente, em 1816, Berzelius começou a admitir combinações não unitárias para os átomos compostos. A partir de então, os átomos passam a fazer mais consistentemente parte de sua teoria, um processo de quase uma década entre o conhecimento da teoria atômica de Dalton por Berzelius e a consolidação de um atomismo dentro de seu dualismo eletroquímico, que só se dá em 1818 (LUNDGREN, 1992). Todavia, ao contrário de Dalton, Berzelius não expressou concordância com um modelo realista do átomo, pois não era possível testá-lo em laboratório. Para ele, “Uma teoria nunca deve ir ‘além do necessário para explicar o fenômeno’. Talvez a teoria atômica seja somente ‘uma forma de conceituar’ objetos e não uma descrição verdadeira deles; mas tem valor, funciona” (BERZELIUS, 1816 *apud* LINDROTH, 1992, p. 21).

Ao modelar a afinidade, entretanto, Berzelius teve que postular a existência de polos elétricos, que exigiam um lugar para existir: “Parece provável para mim que a eletroquímica específica dos corpos deve residir em uma polaridade elétrica das partículas integrantes” (BERZELIUS, 1813 *apud* LUNDGREN, 1992, p. 100). Ou seja, o átomo como partícula concreta era necessário ao dualismo eletroquímico, conciliando a afinidade e as proporções químicas.

3.3.5. Afinidade química

A afinidade era um problema em aberto no início do século XIX. Lavoisier nunca havia se preocupado em definir a afinidade que ele havia postulado (ERIKSSON, 1992; GAY, 1976). Carl Magnus Arrhenius afirmou que Berzelius “deu

à afinidade o que Lavoisier nunca pôde dar, um significado físico verdadeiro” (ARRHENIUS, C., 1814 *apud* ERIKSSON, 1992, p. 76).

Esse significado foi dado pela reunião de dois aspectos físicos: as proporções em massa entre os átomos nos compostos e a sua polarização elétrica. Bergman, no final do século XVIII, já desenvolvia seus estudos sobre afinidade com base em medidas de peso (LUNDGREN, 1992). Berzelius, também influenciado pelo “mecanicismo newtoniano, que visa comparar a força da afinidade química com a força mecânica” (LOPES, 1995, p. 8), dá nova interpretação a esses estudos e os expande, ao defender que “Afinidade química e polaridade das partículas são absolutamente uma só e a mesma coisa” (BERZELIUS, 1845, p. 112). Assim, a afinidade, razão das proporções químicas, passou a ser definida pela natureza eletroquímica, uma propriedade intrínseca dos átomos (HELMHOLTZ, 1881; ROCKE, 1992).

No *An attempt*, quando os resultados quantitativos das análises deixam margem a dúvidas, Berzelius se baseia na intensidade da afinidade para fazer previsões da composição mais provável:

A realidade das duas últimas fórmulas [de fluorossilicatos de alumínio] pode talvez parecer duvidosa à primeira vista. Mas eu estou inclinado a considerar altamente provável que uma partícula de ácido fluorídrico, devido à sua altíssima afinidade, pode reter duas partículas de alumina com igual, senão maior poder do que aquele com o qual duas partículas de sílica retêm uma partícula de alumina. (BERZELIUS, 1814, p. 93)

Além da relação entre a afinidade e as proporções químicas, o trecho exemplifica a metodologia que empregava em seu trabalho científico, em um movimento do empírico ao teórico. O vigor com que um metal se combinava com um metaloide (ou, em outras palavras, a afinidade existente entre ambos) dependia do seu grau de eletropositividade, que era determinado na eletrólise.

De acordo com Berzelius (1845), as afinidades podiam ser divididas em:

- afinidades de agregação, que determinariam o estado físico, e propriedades físicas como a dureza, viscosidade e a forma de cristalização. Atrito e fogo poderiam destruir essas afinidades;
- afinidades de composição, que ocorreriam entre as diferentes substâncias, simples ou compostas, que se unem. As diferenças entre as afinidades de agregação poderiam interferir na afinidade de composição: compostos gasosos, como o ácido carbônico, tenderiam a sair de outros corpos compostos

mais complexos e em outro estado físico, como o carbonato de cálcio, formado a partir da afinidade de composição entre o ácido carbônico e a cal;

- afinidades eletivas, que se manifestariam quando uma substância compete com outras e, se tiver maior afinidade por um de seus constituintes, remove o outro da substância composta. Por exemplo, “o ferro tem mais afinidade pelo enxofre do que o mercúrio, de forma que quando se misturam intimamente limalha de ferro e cinábrio [sulfeto de mercúrio(II), HgS] e se aquece a mistura, o ferro se combina com o enxofre e deixa o mercúrio em liberdade” (BERZELIUS, 1845, p. 15); ou, em termos eletroquímicos, “um metal dotado de grande afinidade pelo oxigênio se torna positivo ao perder sua eletricidade negativa para o metal que tem menos afinidade” (BERZELIUS, 1845 *apud* RUSSELL, 1963, p. 132–133). Reflete uma gradação e uma relatividade das afinidades químicas. A quantidade de um corpo poderia compensar uma baixa afinidade eletiva (embora houvesse muitas exceções ou anomalias), o que está provavelmente associado à gravitação de Newton;
- afinidades compostas ou duplas, que se manifestariam quando corpos compostos são misturados. O ácido mais forte se combina ao corpo com o qual ambos os ácidos têm afinidade, e o mais fraco se combina com o qual ambos tem menos afinidade. Berzelius exemplifica esse tipo de afinidade da seguinte maneira: “Quando se misturam dois sais, por exemplo, o sulfato amônico [atualmente entendido como $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] e o cloreto potássico [KCl], muda a composição de ambos [...] resulta uma mistura de sulfato potássico [K_2SO_4] e cloreto amônico [NH_4Cl]” (BERZELIUS, 1845, p. 16) – pois ambos os ácidos têm maior afinidade pela potassa, sendo o ácido sulfúrico o mais forte e o clorídrico, o mais fraco;
- afinidades predisponentes, que ocorreriam quando uma substância recebe ajuda de outra e consegue, assim, superar uma afinidade maior que a dela, como quando o ferro consegue remover o hidrogênio da água e se ligar ao oxigênio, com a ajuda do ácido sulfúrico, liberando o gás hidrogênio.

As reações químicas teriam lugar por um jogo de afinidades. A afinidade eletiva do ácido para com o manganês, por exemplo, é maior do que a deste pelo oxigênio, e este é libertado do óxido (BERZELIUS, 1845).

Observa-se certa similaridade entre a afinidade eletiva e o esquema do deslocamento (também com a afinidade predisponente, embora ela envolva uma interpretação mecanística diferenciada para o processo: há que se lembrar que os ácidos, em Berzelius, não são caracterizados pela presença de hidrogênio, mas sim pelo seu comportamento eletroquímico), bem como entre a afinidade composta e o esquema da dupla-troca. Entretanto, a ênfase aqui é dada ao princípio químico que explica a reação: é preciso conhecer as forças dos ácidos para prever o resultado da combinação (ou, ao contrário, é esse resultado que poderá identificar o ácido mais forte). Só então tem-se a classificação e a regra, no sentido de ferramenta preditiva. No *Lärbok*, bem como nas demais fontes primárias consultadas, não encontramos nenhuma equação genérica desses processos.

A reunião de fatos e teorias aparentemente tão diversos como a teoria das proporções múltiplas e constantes, a afinidade química, a ação de decomposição da eletricidade e o atomismo de Dalton sob o arcabouço do dualismo eletroquímico teria sido resultado da busca pelo embasamento experimental dessa teoria, com resultados muito precisos³⁸ e formando uma estrutura teórica bastante resistente e interdependente, frutífera aos químicos, pois permitia predizer fenômenos. Isso contribuía para uma desejável unificação da química e pode explicar, em parte, o sucesso de Berzelius e suas tentativas de preservar sua teoria a despeito das anomalias que se verificaram posteriormente (BERZELIUS, 1814; GAY, 1976; GREENAWAY, 1979; LOPES, 1995; LUNDGREN, 1992; MELHADO, 1992).

3.4. O reconhecimento científico de Berzelius

Devido à barreira linguística, Berzelius passa a ser reconhecido no exterior somente a partir de suas viagens, em busca de contato com a ciência do continente europeu. Sua primeira viagem data de 1812, ainda durante as guerras napoleônicas, mas nessa época ele já mantinha contato com pesquisadores em outros países,

³⁸ É preciso compreender o que era considerado um resultado preciso na época de Berzelius. No *An attempt*, Berzelius apresenta tabelas com resultados de suas análises ponderais, e admite como precisos resultados com cerca de 2% de discrepância entre si – ou até 6%, em alguns casos (BERZELIUS, 1814). Considerando que seu prestígio vinha, em boa medida, do reconhecimento de sua habilidade como analista e da precisão de suas medidas, esse era possivelmente um nível de precisão mais do que suficiente para a validação de resultados experimentais à época. Entretanto, não evitava que séries de compostos com variações sutis nas proporções entre seus elementos constituintes – como é o caso dos compostos orgânicos – levassem a resultados inconclusivos, ou mesmo causassem confusão e erros de interpretação.

como Berthollet, que preparava a viagem de Berzelius à França. Berthollet gozava de grande prestígio científico e posição política – Napoleão patrocinara, em grande medida, a pesquisa científica na Sociedade d’Arcueil³⁹, que Berthollet fundara com Laplace e o general Bernardotte, então herdeiro do trono sueco. Entretanto, a visita de Berzelius foi inviabilizada pela posição anti-napoleônica assumida pela Suécia (BERNHARD, 1992; ROCKE, 1992).

A Inglaterra se torna, então, seu primeiro destino internacional, viagem preparada pelo seu amigo genebrino, o médico e também químico Alexandre Marcet (1770–1822). Segundo Rocke (1992), essa teria sido uma das razões para o maior reconhecimento de Berzelius, pois na Inglaterra se pesquisavam tanto os átomos e sua implicação nas proporções químicas como a química animal, primeiro foco de estudo de Berzelius. Embora não houvesse traduções do *Lärbok* para o inglês, “um movimento crescente de químicos ingleses à Alemanha” – onde o *Lärbok* havia sido fielmente traduzido por Wöhler, ex-aluno de Berzelius, se tornando referência – “e o crescente prestígio da química alemã” deram notoriedade a Berzelius (GREENAWAY, 1979, p. 140).

Em 1815, Bernardotte confiou a Berzelius a educação em ciências de seu filho, o príncipe Oscar. Em consequência, os oficiais da corte e diplomatas estrangeiros passaram a frequentar as aulas de Berzelius no Instituto Karolinska, aumentando a reputação do cientista e fazendo com que a química estivesse mais presente nos assuntos da corte (JORPES, 1966).

Finalmente, em 1818, Berzelius viaja à França, ainda em pleno cenário de guerra, portando cartas de recomendação do príncipe Carlos João e do primeiro ministro sueco. Foi bem recebido pelos pares franceses, com quem declarava maior proximidade e afinidade em relação aos ingleses e partilhava os ideais Iluministas, e já gozava de grande prestígio como químico experimental e mineralogista. Seus estudos sobre a química animal e suas determinações de pesos atômicos eram reconhecidos, e já tinha publicado sua teoria eletroquímica e sua nomenclatura. Embora ele tenha absorvido métodos no estrangeiro, sua principal atividade lá foi defender suas ideias (BERNHARD, 1992).

³⁹ Berzelius trabalhou mais tarde na Sociedade d’Arcueil, que teve muita influência na ciência francesa entre 1806 e 1820, congregando grandes cientistas (BERNHARD, 1992).

Na figura 3.4, resumimos algumas das relações discutidas anteriormente.

Figura 3.4. Algumas relações entre Berzelius e a França.

Berzelius tinha um estilo calmo e bem humorado, mas profundo e bem informado (LINDROTH, 1992). Era um homem sóbrio, que dispensava e criticava trivialidades. Suas publicações e correspondências revelam sinceridade, perspicácia, estilo e grande habilidade descritiva. Essas qualidades teriam impressionado a sociedade europeia esclarecida da época (BERNHARD, 1992).

Ao final da década de 1810, Berzelius estava no auge de sua fama, e era considerado o mais importante *arbiter chemiæ* do seu tempo, ao menos na Alemanha. Lá, sua influência era tão grande que foi convidado pelo ministro da Prússia, em 1819, para suceder Klaproth, considerado o maior químico de sua época na Alemanha, na Universidade de Berlim, com alto salário. Berzelius recusou, e recomendou em seu lugar o jovem Mitscherlich, seu discípulo (LINDROTH, 1992; SCHÜTT, 1992).

Após 1821, como secretário da Academia de Ciências sueca, “Berzelius construiu um nome para si como juiz rigoroso da ciência”, tanto que “todo o mundo químico se submetia ao seu julgamento” (BERNHARD, 1992, p. 231). Uma de suas atribuições como secretário era a redação de um relatório anual sobre o progresso em diversas áreas da ciência, em que Berzelius emitia seus pareceres críticos sobre os trabalhos de diversos autores. Esses relatórios eram

uma espécie de coleção de sentenças pronunciadas por um juiz supremo da coletividade dos cientistas. E valiam muito suas críticas! Quantas vezes pôde-se ler, em cartas trocadas entre pesquisadores, como eles esperavam com ansiedade a crítica de um seu trabalho neste anuário, como se sentiam orgulhosos aqueles cujo trabalho havia obtido uma aprovação, encorajamento ou mesmo louvor. Não raras vezes a posição e a carreira de um pesquisador jovem dependiam da crítica [de Berzelius]. (RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951], p. 140)

Schütt (1992) confirma a importância dos relatórios da Academia de Ciências como forma de convencimento e suporte de uma nova teoria na época, ao lado do poder de persuasão de cientistas franceses, então muito influentes na ciência europeia. Não raras vezes, Berzelius priorizou, nesses relatórios, estudos que apoiavam suas próprias teorias, como o isolamento de radicais. Ao final de 1830, Berzelius era considerado a maior autoridade em química da Europa (LINDROTH, 1992; RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951]).

3.5. O dualismo eletroquímico na química orgânica

Rocke (1992) afirma que a razão pela qual Berzelius teria se voltado às proporções químicas foi pelo que essa pesquisa poderia oferecer à química animal, cuja análise era pouco confiável e precisa, e lembra que a reputação de Berzelius começou a ser construída como um químico fisiológico. A pesquisa em química orgânica teria ajudado Berzelius a encontrar caminhos na química inorgânica, e vice-versa (MELHADO, 1992).

Berzelius exibe uma visão de química orgânica que obedece as mesmas leis gerais da inorgânica, mas é mais complexa. A princípio, não tem base dualista. Berzelius afirma, de forma talvez bastante especulativa, que há uma “modificação eletroquímica” nos elementos que é desfeita quando estes retornam à forma inorgânica, por fermentação ou corrupção (BERZELIUS, 1811 *apud* RUSSELL, 1963, p. 136). É somente mais tarde, no *Lärbok*, que ele procura estender o dualismo aos compostos orgânicos, aplicando seu sistema de formulação e identificando radicais complexos formados por carbono, hidrogênio e nitrogênio (KLEIN, 2003). Em 1819, em seu *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*, sugere, ainda sem grande convicção, que “o dualismo é aplicável à química orgânica, e cada produto orgânico pode ser considerado como divisível em oxigênio e um radical composto” (BERZELIUS, 1819 *apud* RUSSELL, 1963, p. 137). No *Lärbok*, afirma que

O princípio na composição orgânica consiste no fato de que mais do que dois corpos, geralmente três ou quatro, dos quais o oxigênio é sempre um, são combinados em um o qual não pode ser considerado como a composição de dois ingredientes *binários*. Assim, a natureza inorgânica consiste de corpos *binários* e suas combinações, e a natureza orgânica consiste de corpos *ternários* e *quaternários*, parcialmente separados, parcialmente unidos entre si, e parcialmente com corpos binários, isto é, inorgânicos. (BERZELIUS, 1845, p. 47)

Os radicais ternários já haviam sido estabelecidos por Lavoisier. O fato de o oxigênio não ser identificado nos hidrocarbonetos seria, provavelmente, uma limitação analítica (MELHADO, 1992). Isso era aceitável à época, já que eram poucos os compostos conhecidos que não continham oxigênio (RUSSELL, 1963).

Os compostos orgânicos aparentemente não respeitavam a mesma regularidade eletroquímica dos inorgânicos, sugerindo uma relação diferente entre as polaridades e afinidades. Por exemplo, regras formuladas por Gay-Lussac e Thenard estabeleciam que, quando um composto orgânico tivesse proporção O : H igual à da água, seria neutro; se tivesse mais oxigênio, seria ácido. Mas Berzelius mostrou exceções, como o ácido benzoico, cuja razão O : H é baixa; o açúcar, que, mesmo com elevada proporção de oxigênio, é neutro; e o ácido oxálico (C_2O_3), que é mais ácido que o carbônico (CO_2). Ou seja, os elementos sofriam alguma modificação em seu comportamento eletroquímico quando na matéria orgânica que, apesar de não implicarem, para Berzelius, forças outras que não as mesmas forças químicas presentes na química inorgânica, traziam problemas ao uso das proporções químicas como ferramenta de previsão de propriedades (BROOKE, 1992). Berzelius não encarava isso como uma contestação da sua teoria, apenas como uma limitação, perfeitamente aceitável dentro de uma concepção vitalista⁴⁰ (RUSSELL, 1963).

As anomalias não pareciam ser um problema para Berzelius, e nem para a química da época. No *Lärbok*, ele muitas vezes dedica mais espaço às exceções do que às regras: isomeria, metameria, polimeria, dimorfismo e eletromorfismo são anomalias acomodadas de forma natural (BERZELIUS, 1845). Desde cedo, Berzelius acreditava que “[...] o atomismo e a eletroquímica ‘gradualmente lançarão mais luz mesmo sobre a química orgânica’” (BERZELIUS, 1812 *apud* ROCKE, 1992, p. 127).

⁴⁰ Para uma discussão aprofundada sobre o vitalismo em Berzelius ver Rocke (1992).

Havia ao menos duas maneiras dualistas de representar certos compostos orgânicos⁴¹: o ácido benzoico, por exemplo, podia ser representado como $[(C^{12}H^{12}) + 2(CO^2)]$ – ou seja, composto de uma base e um ácido, com o dualismo no sentido de que cada parte era formada de dois elementos – ou $[(C^{14}H^{12}O^2) + O] + H^2O$ – com o dualismo no sentido de se tratar de um hidrato de um óxido de um radical, análogo às bases inorgânicas. Embora ambas as formas sejam compatíveis com o dualismo eletroquímico, a tendência de Berzelius era admitir a segunda forma, com o uso de radicais, muitos dos quais estavam sendo confirmados experimentalmente, como o radical benzoíla, isolado em 1832 por Wöhler e Liebig:

em consequência dos nossos experimentos nós acreditamos que há um corpo composto por três elementos, sempre permanecendo o mesmo em seu comportamento em relação a outros agentes, e o qual pode ser considerado não somente como o radical do ácido benzoico, mas ao mesmo tempo como a raiz – talvez com leves variações – de uma enormidade de combinações similares. (LIEBIG; WÖHLER, 1832 *apud* GAY, 1976, p. 21)

Em 1833, Kane propôs uma analogia entre o radical amônio, NH^4 , inorgânico, e o etério, orgânico, rebatizado por Berzelius como etila e representado por Liebig como C^4H^{10} (considerando o peso equivalente do carbono igual a 6, aproximadamente metade da massa atômica aceita hoje para esse elemento) (GAY, 1976):

Inorgânico	Orgânico
NH^4Cl , cloreto de amônio	$C^4H^{10}Cl$, cloreto de etila
KO, óxido de potássio	$C^4H^{10}O$, éter

As analogias eram comuns, e ainda hoje “é perfeitamente natural para os químicos usar princípios familiares da química inorgânica e que pareçam bem sucedidos quando consideram problemas da química orgânica” (BROOKE, 1971 *apud* GAY, 1976, p. 20). Mas, para Berzelius, essa direção da analogia era especialmente importante: “a aplicação daquilo que já é ou virá a ser conhecido a partir de agora sobre as leis da combinação na natureza inorgânica é o único guia para as nossas investigações sobre a forma de combinação na natureza orgânica” (BERZELIUS, [s.d.] *apud* LEVERE, 1970, p. 112). No *Lärbok*, defende que

⁴¹ As diversas formas de representação demonstram que o dualismo eletroquímico de Berzelius, em certa altura, já havia sido incorporado pela comunidade química, e já tinha existência independente do seu criador. Entretanto, enquanto viveu, Berzelius representou a autoridade máxima de seu próprio sistema.

a descrição dos corpos simples e de suas combinações se divide em duas partes distintas: a química inorgânica e a química orgânica. *Como é absolutamente impossível estudar esta última sem ter conhecimento da primeira, examinarei antes o modo com que os corpos ponderáveis se comportam na natureza inorgânica [...].* (BERZELIUS, 1845, p. 123–124, grifo nosso)

Mas Berzelius também era capaz de fazer analogias no sentido oposto: em abril de 1814, Berzelius escreveu a Marcet que “O estudo da natureza orgânica ilumina a inorgânica em um grau completamente inesperado” (ROCKE, 1992, p. 127).

O radical etila não foi obtido experimentalmente, mas outros radicais, além da benzoíla, foram isolados, como o ciano, em 1815 por Gay-Lussac; a metila, em 1834, por Dumas e Peligot; e, principalmente, a cacodila, por Bunsen, em 1843. Listando 37 compostos contendo cacodila e sintetizando o que acreditou ser o radical cacodila livre, Bunsen mostrou que este existia independentemente, o que deu grande apoio à teoria dos radicais. Nas reações, a cacodila se comportava analogamente ao potássio. Berzelius afirmou que “A pesquisa [com a cacodila] é a pedra de fundação da teoria dos radicais compostos, dos quais a cacodila é apenas um; as propriedades deste, em cada particularidade, correspondem às dos radicais simples” (BERZELIUS, [s.d.] *apud* GAY, 1976, p. 22).

Frankland, em 1848, sintetizou o que acreditava ser o radical etila livre, pela reação entre iodeto de etila e zinco. A etila se decompunha formando etileno e hidreto de etila (o que entendemos hoje como etano). As equações a seguir foram utilizadas por Frankland para representar o processo⁴² (GAY, 1976):

Observa-se, na primeira equação, a semelhança com o esquema do deslocamento.

⁴² Nessas equações, o peso equivalente do carbono é igual a 6 e o do hidrogênio é 1. Gay não indica o peso equivalente dos demais elementos, o que poderia justificar a fórmula do iodeto de zinco, diferente da atualmente aceita.

Até 1820, pelo menos, os compostos orgânicos puderam ser encaixados no modelo dualista, escrevendo-se ácidos como hidratos e bases como óxidos de radicais (BROOKE, 1992).

3.6. A superação do dualismo eletroquímico

A superação do dualismo eletroquímico se deu de forma gradativa e mediante diversos fatores, especialmente a busca de respostas às anomalias que se multiplicavam à medida que a investigação dos compostos orgânicos avançava, abrindo espaço para teorias concorrentes.

3.6.1. Contestação na química orgânica

A busca da confirmação dos radicais propostos por Berzelius durante a década de 1840, motivada, em grande medida, pelo seu prestígio científico, levou a um efeito contrário ao esperado. Diversos desses radicais apresentavam fórmulas incompatíveis com o dualismo eletroquímico, e exigiram um grande esforço em sua representação e teorização (ambas as dimensões profundamente interdependentes em química), acompanhado de constantes mudanças de posição teórica de Berzelius. Essas mudanças, segundo Russell, teriam como objetivo “manter sua posição de liderança no pensamento químico” (RUSSELL, 1963, p. 140), mas esse propósito é contestado por Brooke (1992), que afirma que o que Berzelius defendia era o valor de sua teoria como unificadora da química.

Nesse período, com o positivismo de Comte dominando a cena científica francesa, de grande projeção na Europa, a busca da sistematização da química orgânica passou a ser o problema central a ser resolvido na química. Em 1833, Dumas sistematizou quantitativamente seus estudos de cloração de compostos orgânicos, chegando à conclusão de que o cloro, entre outros átomos, substituíra o hidrogênio na proporção de 1:1. Seu aluno Laurent, em 1836, verificou que as propriedades do naftaleno clorado eram tão próximas do hidrocarboneto de origem que propôs que o cloro atuava exatamente como o hidrogênio no composto⁴³ (LEVERE, 1970). A anomalia mais importante, porém, foi a substituição do hidrogênio por cloro no ácido

⁴³ Um problema semelhante era conhecido desde 1815, com a cloração do ácido prússico (cianídrico) por Gay-Lussac, mas não foi estudado a fundo até que mais exemplos surgissem (GAY, 1976).

acético, por Dumas, em 1832, levando ao ácido tricloroacético, sem que, supostamente, grandes alterações em suas propriedades fossem observadas (BROOKE, 1992; GAY, 1976; GREENAWAY, 1979; JORPES, 1966; LEVERE, 1970; RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951]; RUSSELL, 1963).

De acordo com Russel (1963), para tentar explicar a síntese do ácido tricloroacético, Berzelius escreveu a fórmula do ácido acético como um óxido hidratado de um hidrocarboneto⁴⁴:

As propriedades semelhantes relatadas para o ácido tricloroacético sugeriam que sua fórmula deveria ser escrita de forma similar:

Essa representação exigia admitir que um átomo eletropositivo como o hidrogênio pudesse ser substituído por átomos eletronegativos de cloro, o que indicava que a eletronegatividade não era determinante para as propriedades de um composto, contrariamente ao dualismo eletroquímico. Assim, Berzelius propôs outra fórmula para o ácido tricloroacético, que sugeria que o hidrogênio não era diretamente substituído por cloro:

No entanto, a descoberta de que o ácido tricloroacético podia ser facilmente reconvertido em ácido acético reforçava a similaridade entre os dois compostos.

Dumas defendia uma abordagem dinâmica newtoniana para explicar o fenômeno, com as substâncias sendo formadas por sistemas em equilíbrio de forças como os planetas, diferentemente do modelo estático de radical de Berzelius. Quando uma partícula era substituída, o sistema dinâmico se alterava, e o grau de alteração determinava a similaridade entre as substâncias análogas, seu comportamento, etc. A afinidade era considerada a resultante dessas forças, das quais a eletricidade poderia ser uma componente. Seguindo essa mesma linha, Laurent defendeu tese em que criticava a imutabilidade dos grupos de átomos, argumentando que os áto-

⁴⁴ Os hidrocarbonetos eram considerados por Berzelius como substâncias inorgânicas, produtos de decomposição da matéria orgânica (RUSSELL, 1963).

mos poderiam alterar suas posições durante as reações, e que seria impossível dizer algo sobre suas posições relativas (LEVERE, 1970).

Epistemologicamente, para Laurent, as teorias eram o motor dos experimentos, impulsos para buscas frutíferas ou infrutíferas (nunca certas ou erradas). Ao contrário de Berzelius, ele não se preocupava muito com as causas, mas sim com as classificações e seu valor para a ciência (LEVERE, 1970). Laurent sistematizou diversas substituições em 1835, e acabou por propor uma primeira elaboração da teoria dos tipos, enfatizando a importância do arranjo tridimensional dos átomos em detrimento de sua natureza, o que implicava passar as características eletroquímicas dos átomos para um segundo plano. Laurent se baseou mais na analogia com a cristalografia e o isomorfismo (segundo o qual compostos com mesma forma de cristalização apresentariam composição semelhante) do que na eletroquímica (BROOKE, 1992; GAY, 1976). Isso representava ameaça ao sistema de Berzelius e seus esforços para estendê-lo à química orgânica (BROOKE, 1992; GREENAWAY, 1979). Mais do que isso, Laurent tencionava expandir seus resultados com as substituições em compostos orgânicos para os inorgânicos, virando do avesso a metodologia de Berzelius. Era inconcebível para Berzelius que o resultado de uma única reação orgânica pudesse ameaçar toda a estrutura teórica que ele havia desenvolvido (BROOKE, 1992). Assim, essa ameaça merecia um esforço em contrário – caracterizado, por muitos autores, como uma exagerada atitude reacionária de Berzelius, com consequente perda de sua autoridade⁴⁵. Mas, devido ao seu rigor e prestígio, as críticas de Berzelius exigiram que os substitucionistas desenvolvessem argumentos à altura, solidificando ainda mais a teoria dos tipos (BROOKE, 1992).

Inicialmente, Dumas e Laurent não queriam contrariar Berzelius. Laurent propôs sua teoria de forma conciliatória com o dualismo:

Quando uma molécula, contendo átomos agrupados de acordo com certa forma, é confrontado com outra molécula, os átomos influenciados pela presença da nova molécula adotam outro arranjo, *mas sem serem privados de sua influência recíproca*; o mesmo vale para os átomos da nova molécula. (LAURENT, 1836 *apud* LEVERE, 1970, p. 118, grifo nosso)

⁴⁵ Greenaway sugere que o sistema de nomenclatura desenvolvido por Berzelius e largamente adotado à época teria chegado a ser rejeitado como resposta à sua resistência. Para Gay (1976), entretanto, essa rejeição pode estar mais relacionada às limitações dessa nomenclatura em expressar adequadamente os novos fatos investigados na química orgânica. Klein (2003) mostra que as fórmulas de Berzelius foram amplamente utilizadas, de forma instrumental, durante a controvérsia entre as teorias dos radicais e dos tipos.

Assim, as moléculas orgânicas seriam formadas por um grupo característico que determinava a classe química, e qualquer alteração nesse grupo alteraria a classe. As propriedades químicas seriam devidas mais à disposição dos átomos do que à sua natureza, mas, ao redor desse grupo, outros grupos coadjuvantes poderiam sofrer modificação, como o hidrogênio e o cloro na substituição. Dumas defendeu que

A teoria das substituições expressa uma relação simples entre o hidrogênio produzido e o cloro absorvido ... Mas ... se você me disser que o hidrogênio é substituído pelo cloro, o qual desempenha o mesmo papel, então você me está atribuindo uma opinião contra a qual eu protesto veementemente. (DUMAS, 1838 *apud* LEVERE, 1970, p. 114)

Para Berzelius, admitir que duas substâncias diferentes desempenhavam o mesmo papel era uma tentativa de subversão da ordem dada à química. Laurent e Dumas procuraram argumentar que o permanganato e o perclorato de potássio tinham exatamente a mesma forma cristalográfica, apesar da substituição do manganês (um metal) pelo cloro (um metaloide), de acordo com o isomorfismo, mas Berzelius simplesmente ignorou o argumento, já que ele considerava isso um efeito mecânico, não relacionado com as afinidades químicas. Os argumentos em favor da teoria dos tipos se baseavam em fatos isolados, e ainda eram muito frágeis para abalar a teoria dualista e o prestígio de Berzelius (BROOKE, 1992). Interessante notar, entretanto, que no *An attempt*, Berzelius relativizou o comportamento ácido-base – ou seja, não viu a mudança da eletronegatividade de um átomo como um problema (BERZELIUS, 1814). Arrhenius destacou que a ideia de que um mesmo átomo pode ter diferentes cargas, dependendo do outro átomo ao qual se combina, é central na teoria de Berzelius, e que isso poderia ter sido usado para explicar a possibilidade de substituição de hidrogênio por cloro, acomodando-a dentro do dualismo eletroquímico, mas não se dedicou a conjecturar as razões pelas quais Berzelius não o fez (ARRHENIUS, 1907).

Brooke (1992) afirma que Berzelius procurou contestar o método de Laurent, e sugere que essa pode ter sido uma forma retórica de contestar a validade de suas implicações, uma estratégia utilizada na época na disputa entre teorias rivais, utilizada diversas vezes por Berzelius. Nesse sentido, a objeção de Berzelius seria muito frágil, pois consistia apenas em retórica de autodefesa da sua própria teoria, atacando como o conceito teria sido desenvolvido, e não o conceito em si.

A contestação da teoria dos radicais pela teoria dos tipos levou a um novo entendimento em relação às anomalias, que agora não eram mais admissíveis (GAY, 1976). Laurent e Berzelius cederam algumas posições: o primeiro admitiu que a substituição alterava algumas propriedades das substâncias; o segundo, que poderia haver um efeito mecânico em moléculas muito grandes que absorviam os distúrbios da troca de um átomo por outro de diferente eletronegatividade (BROOKE, 1992; LEVERE, 1970).

Em 1843, Berzelius propôs que os grupos C^4H^6 e C^4Cl^6 eram passivos – denominados *copulæ* – em relação ao C^2O^3 , e que este, portanto, definia as propriedades do composto. Assim, a natureza eletroquímica dos átomos permanecia determinante para as propriedades dos compostos (BROOKE, 1992; RUSSELL, 1963). Para Dumas, que aceitava a existência de carbono positivo e negativo, isso não deveria ter sido um problema, mas ele preferiu caminhar na direção de uma nova teoria que acomodasse essa anomalia – segundo Gay (1976), uma decisão pessoal, que pouco pode ser relacionada à uma suposta metodologia científica padrão.

Como se vê, o dualismo estava sofrendo contínuas adaptações para se manter como modelo explicativo. No entanto, um ponto de convergência final entre Berzelius e Laurent não era possível, já que para o primeiro era inadmissível que as propriedades químicas (em última instância, a afinidade) se devessem à estrutura, uma analogia que vinha da química orgânica. Em carta a Laurent, Berzelius escreveu: “Será melhor se cada um de nós seguir seu próprio caminho amigavelmente, na esperança de que a ciência se beneficie de ambos” (BERZELIUS, 1844 *apud* LEVERE, 1970, p. 120). As teorias dos tipos e dualista concorreram e progrediram concomitantemente, entre 1830 e 1860, permitindo previsão de novos compostos, seu comportamento e rotas de síntese (GAY, 1976).

Teorias que levam em conta a forma obviamente falham ao ignorar o papel dos diferentes elementos químicos nas propriedades dos compostos. Dumas aprofundou a teoria dos tipos em 1840, admitindo a importância da natureza dos elementos nas propriedades da substância – embora de forma secundária –, ao mesmo tempo em que negou a constituição dualista das mesmas: “cada composto químico forma um todo completo e não pode, por isso, consistir de duas partes [...]. Seu comportamento químico depende primariamente do arranjo e do número de seus

átomos e em menor grau de sua natureza química” (DUMAS, 1840 *apud* GAY, 1976, p. 26). Mais tarde, em 1855, em sua obra *Método químico*, Laurent escreve:

Eu admito, com todos os químicos, que as propriedades dos corpos compostos dependem da natureza, do número e do arranjo dos átomos. Mas eu admito, acima de tudo, que ordem ou arranjo tem frequentemente uma influência maior sobre as propriedades do corpo que a natureza do material do qual é composto. (LAURENT, 1855, p. 321–322)

Em 1839, Gerhardt publicou a sua teoria dos resíduos. Ela procurava resolver anomalias enfrentadas pela teoria dos tipos, e se concentrou nas reações de dupla decomposição. Na reação de nitratação do benzeno, por exemplo, a água formada podia ser entendida como resultado da combinação de hidrogênio (proveniente parcialmente do benzeno) e oxigênio (proveniente do ácido nítrico). As partes restantes (C_6H_5 e NO_2) eram chamadas de resíduos. Essa reação poderia ser representada, em simbologia atual, pela equação a seguir:

Essa representação é compatível, em forma, com o modelo dualista (também se observa sua semelhança com o esquema da dupla-troca). No entanto, não compreende uma teoria explicativa que envolva polarização elétrica ou afinidade. Além do pouco embasamento teórico, a teoria dos resíduos tinha também pouco valor empírico, mas era instrumentalmente aplicável. Além disso, pode ter levado a uma primeira reconciliação das teorias dos tipos e dos radicais (GAY, 1976), e mostrava que esta ainda se mantinha frutífera.

Mesmo após a morte de Berzelius, a controvérsia seguia não resolvida, mas cada vez mais o dualismo se via enfraquecido pelas evidências empíricas. Frankland, por exemplo, obteve séries de hidrocarbonetos, pondo em xeque a interpretação de Berzelius de que se tratavam de substâncias inorgânicas. No ano seguinte à morte de Berzelius, foram descobertas as aminas primárias, secundárias e terciárias, e cianetos, haletos e organometálicos eram cada vez mais usados, contestando a presença obrigatória do oxigênio nos compostos orgânicos (RUSSELL, 1963). Em 1848, Hofmann pesquisou a anilina, que era considerada por Berzelius como contendo amônia como um radical, mas Hofmann preferiu interpretá-la como resultado da substituição de hidrogênio por um radical fenila. Observa-se aqui uma migração de uma teoria à outra para explicar os mesmos resultados experimentais em química orgânica, o que, ao menos para esse caso específico, ajuda a validar a teoria dos

tipos tanto quanto a dos radicais como modelo explicativo. Hofmann publicou uma extensa lista de compostos de amônia substituída em 1850, com fórmulas como as representadas a seguir:

Esse novo tipo de fórmula, não dualista, além de mostrar uma mudança no sentido da analogia (da química orgânica para a inorgânica), nos remete a uma nova noção similar à da valência e das fórmulas estruturais (GAY, 1976).

Assim, teria havido uma fertilização cruzada entre as teorias concorrentes: as fórmulas reuniam características estruturais, dos tipos, e dualistas, com átomos eletronegativos em um mesmo lado da representação, além de sugerirem aspectos da moderna teoria da valência. Foi “um avanço na sistematização, teve um grande poder preditivo e estimulou a busca de novos compostos” (GAY, 1976, p. 31). A aceitação não era unânime, mas preferencial entre aqueles que, ao contrário de Berzelius, não enfatizavam os resultados experimentais, mas sim a sistematização. Mas mesmo as novas teorias não conseguiram se sustentar ante a rápida expansão do número de compostos orgânicos conhecidos e as anomalias decorrentes (GAY, 1976).

Levere (1970) conclui que Dumas, Laurent e Gerhardt foram os responsáveis pela quebra do monopólio do dualismo na química, e que as teorias dos radicais e dos tipos chegaram a 1850 ainda inconciliáveis. A reconciliação entre essas teorias teria envolvido, na verdade, profundas modificações em ambas, que as teriam tornado irreconhecíveis (RUSSELL, 1963). A noção de radical imutável, por exemplo, foi abandonada, enquanto o papel da natureza dos átomos voltou a ser considerado. Finalmente, as teorias dos radicais e dos tipos teriam convergido e formado as bases da moderna teoria da valência, na qual a química orgânica encontrava campo mais fértil para sua sistematização (GAY, 1976).

3.6.2. Limitações em outras áreas da química

Berzelius defendeu, inicialmente, a existência de radicais que se mantinham inalterados nas transformações químicas, considerando que os óxidos dos radicais estavam presentes nos compostos de segunda ordem assim como se constituíam nos de primeira ordem. Essa conclusão era apoiada em bases empíricas: o sulfato de potássio seria formado por potassa – KO, de carga residual positiva – e ácido sulfúrico – SO^3 , de carga residual negativa, pois a eletrólise do sulfato de potássio regenerava nos polos negativo e positivo a potassa e o ácido, respectivamente. Assim, o sulfato de potássio seria mais bem representado por $[\text{KO} + \text{SO}^3]$ (ARRHENIUS, 1907; BROOKE, 1992). Mas a cristalografia de Haüy impunha um obstáculo à imutabilidade dos radicais: ela defendia que a geometria dos cristais era resultado da junção de pequenas partículas com geometrias definidas. No entanto, duas partículas de primeira ordem, com certa geometria cristalográfica, poderiam resultar numa terceira com geometria totalmente incompatível. O enxofre, por exemplo, formado por cristais octaédricos rômnicos, se combina com chumbo, de geometria octaédrica regular, e forma cristais cúbicos de galena. As geometrias dos reagentes e dos produtos, que deveriam ter sua forma relacionada aos arranjos dos átomos, eram incompatíveis, o que sugeria que a galena era constituída por algo mais do que a simples justaposição dos átomos dos reagentes. Isso só poderia ser explicado se os átomos mudassem de arranjo, o que significa que as partes duais não se mantinham na reação⁴⁶. Esse problema era, no entanto, negligenciado pelos químicos, que em geral não procuravam relação entre cristalografia e composição (LEVERE, 1970).

Com o tempo, Berzelius passou a admitir que o sulfato de potássio poderia ser representado também como $[\text{K} + \text{SO}^4]$, pois no sal não necessariamente se manteriam os grupos preformados KO e SO^3 , mas sim os átomos estariam rearranjados em uma “substância única e coerente”, como teria declarado diversas vezes em seus relatórios para a Academia de Ciências. Apesar de Berzelius buscar as partes em que um composto orgânico podia se dividido, isso se referia a uma questão clas-

⁴⁶ Observa-se aqui, sob uma perspectiva histórica, um bom exemplo de como os modelos para a estrutura submicroscópica da matéria devem fornecer explicações às observações macroscópicas, o que pode apoiar o desenvolvimento de relações entre os níveis fenomenológico e teórico desejado no ensino de química.

sificatória; ele não considerava que o composto era formado efetivamente por essas partes. Entretanto, durante as controvérsias na química orgânica, na década de 1840, o problema voltou à tona, e ele foi acusado de ser preformacionista (BROOKE, 1992).

O isomorfismo de Mitscherlich, discípulo de Berzelius, também teve um papel importante na contestação do dualismo eletroquímico. Ele evidenciou que “o mesmo número de átomos combinados do mesmo modo produzem a mesma forma cristalina, e que esta é independente da natureza química dos átomos e é determinada apenas pelo número e posição relativa dos átomos” (MITSCHERLICH, 1821 *apud* SCHÜTT, 1992, p. 172). Inicialmente, essa analogia ajudou Berzelius a confirmar seus resultados para as proporções de oxigênio nas séries do arsênio e do fósforo, mas já se podia notar que, assim como na química orgânica, havia também na inorgânica um debate entre os que defendiam a posição ou a natureza dos átomos como explicação das propriedades das substâncias (LEVERE, 1970). O isomorfismo viria a apoiar, mais tarde, a teoria dos tipos.

A teoria dos tipos também trouxe implicações para a química inorgânica. Ficou evidente que as eletronegatividades podiam falhar como ferramenta de previsão do comportamento químico, como se observava para o hidrogênio e o cloro, a despeito de seus lugares na escala de eletronegatividade (LEVERE, 1970). Explicações alternativas para o mecanismo das reações também surgiram. A representação de Laurent para a reação entre hidrogênio e bromo, por exemplo, considerava moléculas diatômicas, e tentava explicar por que a reação acontecia apenas entre hidrogênio e bromo “nascentes”: $\text{HH} + \text{BrBr}$ não reagiriam, mas $2\text{H} + 2\text{Br}$ sim. A explicação é que as propriedades dos átomos seriam subjugadas pelos arranjos moleculares, o que reforçaria a hipótese de que a forma seria mais importante do que natureza (LEVERE, 1970). Gerhardt tentou estender seu modelo de substituição à química inorgânica. Ele considerava, por exemplo, a reação de formação de sulfato de potássio como a substituição do enxofre por oxigênio⁴⁷ (BROOKE, 1992):

⁴⁷ De acordo com Brooke (1992), essa reação pode ser entendida atualmente como uma adição: $\text{K}_2\text{S} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{SO}_4$.

Berzelius também se envolveu em uma controvérsia com Faraday. Este defendia a existência de equivalentes eletroquímicos, ou seja, uma mesma quantidade de eletricidade formaria o mesmo número de equivalentes de um dado íon (como era denominada a parte de um composto obtida em um eletrodo). Berzelius refutou a hipótese de Faraday, pois acreditava que a estabilidade dos compostos, relacionada à sua afinidade, era proporcional à quantidade de carga necessária para os decompor. Assim, jamais equivalentes de substâncias diferentes, que apresentavam diferentes estabilidades, poderiam apresentar a mesma carga. Mais tarde, Faraday acabou demonstrando que as forças de atração variavam não em função da carga, mas sim da distância entre elas (ARRHENIUS, 1907).

Arrhenius forneceu um argumento empírico contrário à existência das cargas residuais propostas por Berzelius. Tais cargas residuais implicariam em que, no cloreto de amônio, um dos hidrogênios estaria ligado ao nitrogênio de forma diferente, ou seja, pela carga residual negativa da amônia. Assim, o composto representado hoje por NH_4Cl poderia ser escrito dualisticamente como $\text{NH}_3\cdot\text{HCl}$. A substituição de um hidrogênio por um radical orgânico monovalente levaria a dois compostos isômeros: $\text{NH}_2\text{R}\cdot\text{HCl}$ e $\text{NH}_3\cdot\text{RCl}$. Como isso não se observa, conclui-se que todos os hidrogênios são equivalentes (ARRHENIUS, 1907). Para além da contestação da teoria de Berzelius, esse argumento mostra o quanto a fórmula deve corresponder às propriedades da substância e proporcionar previsibilidade, e como a relação entre as dimensões fenomenológica e representacional é fundamental para a química, aspectos que são muito relevantes para o ensino de química.

A partir do caso histórico apresentado, é possível compreender de forma mais detalhada o percurso do dualismo eletroquímico. De forma resumida, essa teoria de Berzelius começa a se constituir formalmente a partir de seus estudos, com Hisinger, com as eletrólises de sais proporcionadas pela pilha de Volta. A partir da publicação dos primeiros artigos e das viagens de Berzelius ao continente europeu em 1812, o dualismo eletroquímico é divulgado e encontra aceitação na comunidade química da época, especialmente na França, Inglaterra e Alemanha, influentes centros de pesquisa química, e se mantém como principal explicação para os fenômenos químicos. Somente a partir de 1832, com a constatação da substituição do hidrogênio por cloro no ácido acético por Dumas, as anomalias se tornam mais relevantes e, ao longo da década de 1840, mais numerosas, abrindo caminho para no-

vos problemas de pesquisa e novas teorias. Gradativamente, o dualismo eletroquímico deixa de ser a teoria mais aceita pela comunidade química; alguns de seus elementos são abandonados e outros, incorporados às novas teorias, notadamente a teoria da valência, a partir da década de 1850. Na figura 3.5, procuramos representar graficamente esse percurso, que reflete aproximadamente a trajetória da validade da teoria dualista ao longo do tempo.

Figura 3.5. Representação gráfica do percurso do dualismo eletroquímico.

3.6.3. A teoria da dissociação eletrolítica

Embora desenvolvida já no final do século XIX, em um momento posterior ao abandono do dualismo eletroquímico como resultado das controvérsias na química orgânica (e, como vimos, em menor escala, também na química inorgânica), a teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius pode nos auxiliar a compreender importantes limitações da teoria de Berzelius, pela oportunidade de comparação desta com uma teoria ainda considerada válida⁴⁸. Os elementos dessa teoria, discutidos a seguir, foram extraídos do *Theories of chemistry; being lectures delivered at the University of California, in Berkeley*⁴⁹, obra produzida por Arrhenius em 1907.

A teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius se relaciona, em parte, à teoria de Johann Wilhelm Hittorf, de meados do século XIX, que estabeleceu o movimento diferenciado dos íons em solução. Arrhenius propôs que as partes que for-

⁴⁸ Como se fará notar, diversos elementos da teoria da dissociação eletrolítica, conforme descrita por Arrhenius (1907), não correspondem exatamente aos atualmente aceitos e presentes nos livros didáticos.

⁴⁹ Arrhenius (1907). A partir deste ponto, passaremos a indicar essa obra apenas por *Theories of chemistry*.

mam as moléculas se separam em solução, conservando suas cargas elétricas opostas (nos termos de Arrhenius, formam íons). Ao aplicar um potencial elétrico, os íons se moveriam para os polos com cargas opostas, com velocidades que dependem do potencial elétrico e da fricção do íon com a água, que é diferente para cada íon. Segundo Arrhenius, quando um metal como o sódio é adicionado a uma solução bastante diluída de ácido clorídrico, este estaria ionizado, e o metal seria dissolvido pela água. A dissolução do sódio neutro levaria à liberação de hidrogênio neutro (um mecanismo que envolve ainda um jogo de afinidades), que deixaria sua carga positiva na solução. Essa carga migraria para o sódio, já que todo o restante da solução permaneceria sem se transformar. Como a carga do hidrogênio é transferida integralmente para o sódio, considera-se que eles são eletroquimicamente equivalentes: se atribuirmos arbitrariamente uma única carga ao hidrogênio, o sódio também será monovalente, com carga equivalente à do hidrogênio, mas oposta. Essa carga, medida experimentalmente para 1 g de hidrogênio neutro liberado, corresponde a 96.500 C, o que está de acordo com a lei de Faraday (ARRHENIUS, 1907).

A noção de equivalente permitia atribuir um número de cargas relativas (ou valências) aos íons de carga de mesmo tipo. Esse conceito não corrobora o mecanismo de reação dualista de Berzelius, o qual não considerava transferências de cargas, ou mesmo cargas unitárias nos átomos. (ARRHENIUS, 1907).

O mecanismo proposto por Arrhenius para a eletrólise é também diferente daquele defendido por Berzelius. No exemplo anterior, todas as substâncias que podem substituir o sódio no cloreto de sódio representam, como ele, o papel de íon positivo, sejam metais ou radicais orgânicos complexos. Arrhenius ressaltou, no entanto, que essa conclusão remetia novamente ao dualismo eletroquímico de Berzelius, “que tem que enfrentar dificuldades muito importantes” (ARRHENIUS, 1907, p. 58).

Arrhenius considerava a “velha ideia de afinidade” (ARRHENIUS, 1907, p. 61) pouco precisa, e propôs uma forma de medida da afinidade baseada em uma força física, realização que Berzelius sempre perseguiu: o trabalho, em joules, necessário à decomposição de um equivalente de substância (A) é dado pelo produto da carga constante de 96.500 C pela força eletromotriz (e). Portanto,

$$A = (96.500 \cdot e) \text{ J}$$

Determinando-se experimentalmente e , calcula-se A , que seria uma medida da afinidade. Esse novo conceito de afinidade teria sido possível a partir da investigação do movimento dos íons realizado por Hittorf, cinco anos após a morte de Berzelius (ARRHENIUS, 1907).

Em 1854, Hittorf teria obtido resultados que sugeriam que compostos moleculares se comportavam na eletrólise como sendo formados de dois íons: o hidrogênio (ou um metal) e um ânion complexo. Essa proposta, embora dualista, oferecia uma explicação para a composição das substâncias diferente daquela do dualismo de Berzelius, baseado em óxidos de radicais. Para a eletrólise do sulfato de potássio, por exemplo, Daniell teria proposto um novo mecanismo, com base na eletrólise do sulfato de cobre: se formaria potássio metálico, que se combinaria à água para formar potassa cáustica e hidrogênio no polo negativo, e ácido sulfúrico e oxigênio no positivo (ARRHENIUS, 1907). Arrhenius não mencionou quando Daniell teria proposto tal mecanismo (do qual Arrhenius não tinha dúvida quanto à correção), mas sua primeira célula eletroquímica data de 1836, época em que a teoria dualista ainda contava com ampla aceitação, o que sugere que, mesmo nessa época, explicações concorrentes para a eletrólise se faziam presentes na química inorgânica.

No capítulo XIII do *Theories of chemistry*, Arrhenius apresentou sua teoria de dissociação eletrolítica. Embora não haja menção direta ao dualismo eletroquímico, fica claro que essa teoria não poderia explicar a dissociação parcial dos compostos proposta por Arrhenius. É importante ressaltar, entretanto, que a teoria eletrolítica está relacionada com os estudos de Van't Hoff e outros pesquisadores, desenvolvidos somente no final do século XIX (ARRHENIUS, 1907).

Uma consequência da dissociação eletrolítica é que as propriedades de soluções diluídas seriam o resultado das contribuições das propriedades do solvente e dos íons presentes. Entre outros exemplos, Arrhenius citou o fato de que o ferrocianeto de potássio não forma o azul da prússia com ferricianeto de potássio, o que indica que na verdade esse teste é específico para os íons ferro(III), e não para qualquer composto contendo ferro, e que quantidades equivalentes de determinados íons em sais diferentes, dissolvidos nos líquidos corporais, apresentariam os mesmos efeitos terapêuticos (ARRHENIUS, 1907). Ficam evidentes as limitações do modelo dualista para compostos em solução, pois nele não se faz diferenciação entre átomos e íons, tampouco são consideradas as propriedades do solvente.

Arrhenius apresentou uma nova notação, a equação iônica:

Nela, os dois primeiros termos representam o ácido; o terceiro e quarto a base; o quinto e sexto o sal, todos dissociados em solução diluída. A neutralização gera água, e isso independe do ácido e base envolvidos. Esse modelo explica por que a neutralização de ácidos e bases fortes sempre gera a mesma quantidade de calor, independentemente da natureza do ácido e da base (ARRHENIUS, 1907). Esse fato não poderia ser explicado pelo dualismo eletroquímico, para o qual diferentes afinidades estariam em jogo em ácidos e bases diferentes.

De forma geral, embora Berzelius seja frequentemente citado por Arrhenius no *Theories of chemistry*, ele o fez como referência histórica, base de comparação para a explicação de um conceito discordante e, por vezes, como curiosidade, por similaridades casuais com outros pontos de vista mais modernos. A teoria dualista não encontrava mais terreno fértil para a explicação dos fatos, e foi substituída, como modelo para as reações em solução, pela teoria da dissociação eletrolítica. Suas contribuições foram respeitadas, mas devidamente colocadas em um tempo passado, e não pertenciam mais ao corpo de conhecimentos da química no início do século XX.

Tendo agora como referência o estudo de caso aqui desenvolvido sobre a teoria dualista de Berzelius, o Capítulo 4 traz a análise dos livros didáticos atuais, em busca de eventuais resquícios dessa teoria e implicações para o ensino de química.

CAPÍTULO 4. Análise dos livros didáticos e implicações para o ensino de química

A seguir, apresentamos as US consideradas relacionadas ao nosso objetivo de identificar se e como o dualismo eletroquímico sobrevive em cada livro didático. Elas se encontram identificadas pelo livro didático a que pertencem e pelos títulos dos capítulos (apresentados no quadro 2.3). Estão codificadas conforme explicado no tópico 2.4.4 e nomeadas de acordo com os subtítulos em que se inserem no livro. Procuramos evidenciar nossas escolhas e interpretações nos comentários que acompanham as US.

Química: ensino médio (MORTIMER; MACHADO, 2014)

Introdução às transformações químicas

LD1.05/244 - Escrevendo equações químicas

Não é apresentada nenhuma forma de classificação das reações ou equações químicas (ou seja, esquemas como o da dupla-troca ou deslocamento não estão presentes). As equações químicas são introduzidas como forma de representação, a partir da observação experimental de uma série de reações diferentes: entre ácido clorídrico e zinco; entre hidróxido de sódio e sulfato de cobre(II); entre ácido clorídrico e hidróxido de sódio (sem e com fenolftaleína). Também são utilizados experimentos para discutir as evidências de reações químicas e a conservação da massa nas reações. Essa abordagem é coerente com as atividades apresentadas, que não mencionam nenhum esquema classificatório – embora, como vimos em 1.3, a presença de esquemas não represente, nessa abordagem, nenhum problema, já que se está privilegiando o desenvolvimento do conceito de reação química e de sua representação.

Não são explicitados mecanismos de reação, embora sua identificação possa ocorrer como resultado da sistematização dos experimentos propostos. De acordo com os autores, “As formas com que os átomos se combinam são determinadas pela valência dos elementos e pelo arranjo espacial dos elétrons de valência” (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 244).

Não se poderia, portanto, relacionar nenhum elemento do dualismo eletroquímico a essa US. Ao mesmo tempo, percebem-se elementos epistemológicos se-

melhantes àqueles presentes no trabalho de Berzelius: a generalização, na forma de um mecanismo de reação, é resultado dos fenômenos observados, valorizando o experimento como base para a teorização; a representação expressa tais mecanismos e propriedades, e deve estar de acordo com as demais teorias vigentes (teoria atômica, por exemplo), mas não o faz por meio de um algoritmo. Acreditamos que essa abordagem colabora para que o aluno compreenda o papel científico da generalização e como ela pode ser conseguida.

Não há elementos históricos na abordagem. É difícil avaliar se a história da ciência poderia trazer ganhos ao processo de ensino-aprendizagem nesse momento mas, considerando que esse tipo de abordagem está presente em outros momentos da obra (como mostramos adiante), temos que considerar que os autores optaram conscientemente por não utilizá-la aqui, possivelmente com ganhos para a objetividade e clareza dos conceitos e sua compreensão pelos alunos.

Ligações químicas, interações intermoleculares e propriedades dos materiais

LD1.06/280 - Que evidências sobre a natureza das ligações químicas podemos obter conhecendo a condutividade elétrica dos materiais?

O conceito de ligação química foi estabelecido posteriormente ao dualismo eletroquímico, e sua análise nos livros didáticos pode nos ajudar a confirmar a ausência de concepções dualistas ultrapassadas. Os modelos de ligação química apresentados nesta US partem de observações experimentais sobre a condutividade em solução e no estado sólido, e envolvem o conceito de íons em solução: “[...] a condutividade elétrica da solução do cloreto de sódio em água deve-se à mobilidade dos íons (partículas carregadas) na solução aquosa [...]” (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 280). O conceito de íon foi desenvolvido a partir do trabalho de Faraday, e não estava presente no dualismo eletroquímico de Berzelius, que postulava a presença desigual de cargas positivas e negativas em todos os átomos – aspecto histórico que não é discutido no trecho analisado, sem prejuízo à construção do conceito. Também se recorre ao conceito de elétron e se estabelece a limitação do modelo de ligação iônica, abrindo espaço para a explicação de situações não admitidas pelo dualismo eletroquímico, como a formação de moléculas diatômicas em substâncias simples.

Modelos para o átomo e uma introdução à tabela periódica

LD1.02/152 - A ideia de átomo: da Grécia antiga aos tempos atuais

Ao discutir a ideia de átomo, não se faz menção a Berzelius, e as controvérsias históricas que fizeram parte da construção desse conceito no século XIX são citadas apenas superficialmente:

Em 1803, John Dalton (1766-1844) retomou a hipótese atômica para explicar o comportamento dos diversos gases da atmosfera e das misturas gasosas. Assim como Leucipo, Demócrito e Epicuro, Dalton acreditava que a matéria seria constituída por átomos indivisíveis e espaços vazios.

Durante todo o século XIX, no entanto, a hipótese atômica enfrentou adversários ferrenhos, tanto na Química quanto na Física. A falta de evidências experimentais para sua existência tornava os átomos suspeitos, numa atmosfera impregnada pela crença na verdade dos fatos e pela desconfiança em relação a hipóteses teóricas. O atomismo, porém, se revelou um caminho frutífero na Química e na Física, e ao final do século XIX toda a comunidade científica rendia-se à hipótese atômica, já bem diferente da proposta originalmente por Dalton. (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 153)

O trecho destacado afirma que não havia evidências experimentais para os átomos, referindo-se provavelmente à observação direta dessas partículas (embora isso não fique claro). Evidências indiretas, como a fornecida pelas proporções fixas entre os átomos estudadas por Berzelius, se apresentadas, poderiam facilitar a compreensão, pelo aluno, do que seriam consideradas evidências em ciência e o papel da interpretação dessas evidências pelos cientistas. Os termos “verdade dos fatos” e “hipóteses teóricas” não são esclarecidos nesse momento. O primeiro, que acreditamos remeter à importância da observação experimental, nos parece fora do alcance do aluno, já que o contexto histórico e o significado de “verdade” naquele contexto não são apresentados em mais detalhes. Pode indicar uma crença generalizada na existência de uma realidade objetiva em ciência – que, como vimos, não correspondia, por exemplo, à visão de Berzelius, que aceitava o átomo como modelo frutífero, e não como entidade real e, a considerar seu prestígio à época, não correspondia também à visão de muitos de seus pares. A existência de uma realidade objetiva pode ser reforçada em frases como “A ciência do século XX tornou a realidade atômica observável” (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 153), acompanhada de imagens de difração de raios X e microscopia de tunelamento eletrônico. O segundo dos termos referidos acima, “hipóteses teóricas”, pode ser interpretado erroneamente como sinônimo de mera especulação.

LD1.03/154 - A hipótese atômica de Dalton

Embora um retrato de Berzelius seja apresentado na página, sugerindo que tivesse papel importante na hipótese atômica, Berzelius é citado superficialmente, e como um seguidor da doutrina de Dalton, limitando-se a confirmar sua hipótese atômica:

A hipótese atômica de Dalton foi retomada em 1803 para explicar o comportamento dos diversos gases da atmosfera e das misturas gasosas. Dalton era um atomista e acreditava que a matéria seria constituída por átomos indivisíveis e espaços vazios. E mais: os diferentes elementos químicos seriam constituídos por átomos diferentes e cada tipo de átomo seria caracterizado por um peso atômico. Essa ideia foi essencial para o desenvolvimento do atomismo, pois criou uma entidade a ser procurada pelos adeptos desse programa de pesquisa. Assim, *quem acreditasse em átomos* teria que procurar pelos seus pesos atômicos e foi o que fizeram muitos cientistas que na época aderiram ao atomismo, como Berzelius (1779-1848). (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 154, grifo nosso)

Essa descrição dos fatos não é suficientemente exata. Berzelius não aderiu ao atomismo tão facilmente como o trecho leva a supor, e nem se poderia considerá-lo um adepto de Dalton, pois divergia deste em diversos aspectos. Tampouco o átomo, em Berzelius, deveria ser provado por meio da determinação de seus pesos. Essa busca já se havia iniciado antes e de forma independente da hipótese atômica, levando a ideias alternativas como a de unidades equivalentes e volumes. Antes, o átomo para Berzelius era uma teorização frutífera, dentro do dualismo eletroquímico, na explicação das proporções encontradas a partir da determinação dos pesos, ou seja, consequência das proporções, e não causa dos pesos. O trecho sugere que ideias científicas contribuem contínua e cumulativamente para produzir teorias cada vez mais bem elaboradas, mas desconsidera que tais ideias são, muitas vezes (como nesse caso), apropriadas pelos pesquisadores com interpretações diferentes das originais: o átomo de Berzelius não era o átomo de Dalton. Adicionalmente, a expressão “quem acreditasse em átomos” não contribui para uma visão adequada de ciência, à medida que relaciona a construção científica a dogmas aceitos sem evidências (especialmente frente à “falta de evidências experimentais” apontada no trecho LD1.02/152 citado anteriormente).

LD1.04/155 - Evidências para a natureza elétrica na constituição dos materiais

Uma atividade prática proposta para discutir evidências da natureza elétrica dos materiais proporciona oportunidade de observar modelos criados pelos alunos. Das questões sobre essa atividade citadas a seguir, concepções semelhantes à de Berzelius, com cargas desiguais em cada átomo, poderiam surgir dos alunos:

“Q5. Considerando que os materiais sejam constituídos por dois tipos de partículas com cargas elétricas opostas – positiva e negativa –, desenhem como as cargas se distribuem [...]”

“Q6. Proponham um modelo para o átomo que seja coerente com as observações e hipóteses discutidos nessa atividade”. (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 156)

Apesar de essa oportunidade de relação com o modelo dualista não ser explorada, entendemos que essa atividade contribui para uma aproximação entre os alunos e a ciência, à medida que reproduz o pensar científico e mostra que este não é privilégio de algumas poucas mentes brilhantes. Também explora a limitação dos modelos, que cria a necessidade de seu aperfeiçoamento ou substituição, aspecto amplamente presente no estudo de caso apresentado, seja na própria proposição de um dos primeiros modelos atômicos que considerava as cargas elétricas, seja na controvérsia entre as teorias dos radicais e dos tipos. A abordagem da obra valoriza a elaboração de modelos sobre as regras e definições, o que é expresso pelos autores nas orientações para a atividade no manual do professor:

O exercício de propor modelos é fundamental para a construção do conhecimento químico. É importante destacar, para os alunos, que o que está em questão neste momento não é a construção do modelo correto, mas de um modelo que seja coerente com o que foi observado nos fenômenos e que possibilite explicá-los.

O fundamental é que os alunos compreendam que os fenômenos estudados nos permitem imaginar que os materiais são constituídos por cargas elétricas. A partir disso, o modelo proposto deve explicitar a presença dessas cargas. (MORTIMER; MACHADO, 2014, p. 397–398)

Com base nas unidades analisadas, concluímos que a obra não traz resquícios do dualismo eletroquímico nos conteúdos químicos apresentados. Ao lado disso, promove a apropriação, pelo aluno, de uma visão de ciência como construção humana, limitada e provisória, valorizando o papel dos experimentos e das teorias. Quanto à abordagem historiográfica, está presente, mas traz algumas imprecisões: Berzelius é mencionado como personagem coadjuvante no contexto do desenvolvi-

mento de modelos atômicos, e a relação entre estequiometria e atomismo distancia-se dos fatos. Não se faz referência histórica ao dualismo eletroquímico.

Química (FONSECA, 2013)

Compostos inorgânicos

LD2.08/296 - Sais - Acidez e basicidade dos sais

A autora apresenta as reações de dupla-troca:

Podemos considerar genericamente que, quando reagimos uma solução aquosa de um ácido e uma solução aquosa de uma base, obtemos uma solução aquosa de um sal.

A reação entre um ácido e uma base produzindo sal e água é conhecida como reação de dupla-troca. (FONSECA, 2013, p. 296)

Não são discutidos os conceitos ou contextos históricos relacionados. Na sequência do texto, um esquema é apresentado (figura 4.1).

Figura 4.1. Reprodução de trecho da obra de Fonseca (2013, p. 296) sobre a dupla-troca.

Na primeira parte da citação, indica-se que as substâncias se encontram em solução aquosa, remetendo portanto à teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius. Entretanto, no segundo trecho, que na obra se encontra destacado por um recurso gráfico (caixa de texto com fundo cinza), a água aparece não como solvente,

mas sim como produto da reação, da mesma forma que no esquema, também destacado, que se segue ao trecho.

Após o esquema, a autora explica que ele “significa que o **cátion** do sal **vem de uma base**, e o **ânion** do sal **vem de um ácido** [...]” (FONSECA, 2013, p. 296). Essa abordagem privilegia o esquema em detrimento do conceito.

Entretanto, a suposta relação entre tal esquema e o dualismo eletroquímico sugerida por Mortimer e colaboradoras (2000) e por Lopes (1995) é, no mínimo, questionável. A mencionada troca se realiza, na unidade analisada, entre íons, que correspondem a desenvolvimentos teóricos posteriores ao dualismo eletroquímico. As representações mostram que os ácidos e bases não são considerados como óxidos, e o sal formado não é uma substância de segunda ordem formada a partir desses óxidos, de primeira ordem – como seriam para Berzelius e seus seguidores.

Mantém-se aqui uma ideia dualista em que, de forma semelhante ao dualismo de Berzelius, um sal é produto da neutralização entre um ácido e uma base. Mas essas duas ideias dualistas, reunidas pelo fato empírico, se distanciam pelos modelos teóricos explicativos a que recorrem, expressos em suas representações simbólicas (embora estas não expressem a ionização e a dissociação que ocorrem em solução, situação presente no texto). Há que se lembrar, ainda, que o dualismo eletroquímico de Berzelius era reforçado pelo fato de que o sal regenerava, por decomposição eletrolítica, o ácido e base de partida, reforçando a hipótese da existência e permanência de radicais, fatos e teorias não abordadas na US analisada. Assim, parece haver não uma sobrevivência do dualismo eletroquímico, mas uma hibridização de alguns elementos dessa teoria a teorias químicas sancionadas. O conhecimento escolar construído dessa forma não corresponde totalmente ao conhecimento químico contemporâneo.

De forma simplificada, uma abordagem histórica no ensino privilegia a compreensão do processo de desenvolvimento das teorias, relacionando-as aos fatos, a partir do que a compreensão dos modelos é facilitada. O estudo de caso do dualismo eletroquímico nos auxilia a compreender que as fórmulas e equações representam fenômenos, cujas semelhanças podem ser sistematizadas e levar a modelos mecanísticos gerais, embora limitados a determinado tipo de fenômeno, como o dualismo, na teoria dos radicais, e a substituição, na teoria dos tipos. Essa abordagem não está presente e nem é compatível com a estrutura do texto desta US, es-

truturado de forma sintética e esquemática, tendo o conceito, a definição e o esquema como pontos de partida.

LD2.10/298 - Óxidos

De forma geral, ao longo dessa US, o que se observa é o uso predominante de fórmulas e equações químicas classificadas em tipos, com evidente ênfase nos aspectos representacionais em detrimento da discussão dos fenômenos e teorias relacionadas. Ou seja, ao contrário do que se observa no trabalho de Berzelius (e que permanece válido em ciência e desejável no ensino de ciências), observa-se a ênfase no ensino ritualístico em detrimento da compreensão dos conceitos em busca de generalizações frutíferas, compreensão esta que poderia ser favorecida com a abordagem histórica sugerida para a US anterior (LD2.08/296). As fotos na página pouco auxiliam nesse sentido, pois a única imagem que apresenta um fenômeno (reação entre óxido de cálcio e água) não é discutida e nem claramente relacionada ao conteúdo, que se encontra duas páginas após a apresentação da imagem. Não se faz presente uma abordagem histórica, exceto por um pequeno quadro na lateral da página 300 em que, de forma anedótica e não alinhada à historiografia contemporânea da ciência, se comenta o uso do monóxido de dinitrogênio no século XIX como anestésico, e em festas, como agente para promover a socialização entre os convidados.

Metais e oxirredução

LD2.13/312 - Deslocamento simples

Sob esse título são abordadas as reações de oxirredução entre elementos metálicos. A autora prioriza o ensino de esquemas sobre a compreensão de fenômenos, já que, logo de início, apresenta esse tipo de transformação de forma algébrica:

Se colocarmos em contato um metal X (mais reativo) na forma de substância simples (NOX igual a zero), com outro metal Y (menos reativo) na forma de cátion (NOX maior que zero), vai ocorrer uma “transferência” espontânea de elétrons do metal X para o cátion do metal Y. [...] Em uma reação, o metal mais reativo desloca o cátion do metal menos reativo”. (FONSECA, 2013, p. 312)

O exemplo dado é a reação entre sódio metálico e cloreto de prata coloidal, representada por uma equação. Essa equação é apresentada também na forma iônica, com os íons em solução, o que já evidencia a limitação do esquema do deslo-

camento como esquema classificatório frutífero para a previsão de fenômenos. O mesmo enfoque se observa na abordagem do deslocamento entre ametais.

Nas fontes históricas pesquisadas, não foi constatado o uso de esquemas algébricos para sistematizar mecanismos dualistas de reações químicas. O conceito de número de oxidação, utilizado aqui pela autora, evidencia que as explicações teóricas para o fenômeno descrito são diferentes das explicações dualistas, que não consideravam partículas subatômicas ou unidades de carga elétrica discretas.

A reatividade tem, aqui, explicação diversa da que é proporcionada para o mesmo fenômeno, no dualismo eletroquímico, pela afinidade, medida empiricamente com base no comportamento das substâncias frente à pilha de Volta e identificado com a eletropositividade ou eletronegatividade. A afinidade eletiva explicava reações como a que ocorre entre a prata e o cloreto de sódio pela transferência de eletricidade negativa da prata para o sódio. A prata teria, assim, maior afinidade pelo cloro do que o sódio. A afinidade eletiva considerava também a influência da quantidade de composto, de acordo com a gravitação de Newton. Na obra analisada, a afinidade é baseada em uma propriedade atômica: “Um metal é mais reativo que outro quando sua tendência a doar elétrons (sua eletropositividade) é maior. [...] Um ametal é mais reativo que outro quando sua tendência de atrair elétrons, isto é, sua eletronegatividade, é maior” (FONSECA, 2013, p. 314). A eletricidade negativa no dualismo eletroquímico não corresponde à transferência de elétrons, teoria estabelecida no século XX, e os conceitos de eletronegatividade e de eletropositividade citados nesta US não se relacionam aos conceitos empíricos dualistas.

Vale, porém, observar a terminologia utilizada ao discutir o exemplo. Existe um desacordo entre a frase “Dizemos que o sódio desloca a prata” (FONSECA, 2013, p. 312) e equação iônica apresentada logo em seguida, que evidencia somente a mudança do número de oxidação. O referido desacordo parece apontar para um resquício implícito de antigas teorias sobre afinidade química: o uso do verbo “deslocar”, referindo-se aos elementos químicos (e não aos elétrons, que constituem o fundamento das explicações oferecidas no livro). Ou seja, um termo antigo (“deslocar”, “deslocamento”) se mantém, no contexto de uma teoria na qual ele não faz mais sentido, mas nenhuma explicação sobre isso é oferecida ao leitor.

pel na reação é *passivo*, ou seja, em relação à carga elétrica, o cloro é encontrado da mesma forma nos produtos e nos reagentes” (FONSECA, 2013, p. 312, grifo nosso). A ideia de uma espécie passiva está também presente no dualismo eletroquímico de Berzelius, quando este o remodela procurando justificar a semelhança de propriedades entre certos compostos hidrogenados e seus análogos substituídos com cloro. Entretanto, o significado do termo é diferente: no caso do dualismo eletroquímico, se refere a um átomo (simples ou composto) que não confere características químicas à substância da qual participa, porque suas propriedades não são dominantes frente a outro átomo; no caso do livro didático, emprega-se o termo no sentido de espécie que não reage. O termo “passivo” poderia ser substituído, nesta US, por “espectador”, de uso mais corrente.

Notações químicas

LD2.01/115 - Notações químicas

A notação química proposta por Berzelius é apresentada como baseada no trabalho de Lavoisier.

[...] foi o químico sueco Jöns Jacob Berzelius (1779-1848) que, com base no trabalho de Lavoisier, conseguiu chegar a um sistema simples e lógico de notação química, abrangendo o nome e a fórmula das substâncias. A sistematização proposta por Berzelius foi publicada em 1814. Cinco anos depois, em 1819, já era amplamente adotada nos meios científicos e continua sendo usada até hoje (FONSECA, 2013, p. 116).

Nessa tentativa de abordagem histórica, Berzelius é apresentado como um continuador do trabalho de Lavoisier. Não se discute o poder de previsão dessa notação e sua relação com as propriedades das substâncias, nem seu princípio de organização em gêneros e famílias, influenciado por Lineu, com base no radical eletropositivo apresentado no *An attempt* (que supomos ser a publicação de 1814 citada) e que distanciava sua nomenclatura daquela proposta por Lavoisier, De Morveau, Berthollet e Fourcroy. Há que se lembrar que a nomenclatura traduzia – e ainda o faz – os princípios teóricos nos quais é baseada, o que não é discutido nesta US. Desta forma, a compreensão do significado de sistematização em ciência fica limitada. Também são omitidas as controvérsias a respeito do dualismo eletroquímico que se refletiram na aceitação da nomenclatura de Berzelius e na representação das fórmulas (como nas representações para o sulfato de potassa e do ácido cloroacético e na transição das fórmulas monodimensionais, da teoria dos radicais, para bidi-

mensionais, na teoria dos tipos), levando a entender que ela foi consensual e que permaneceu inalterada por mais de 200 anos desde a sua concepção: “As regras criadas por Berzelius em 1814 e adotadas pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (*Iupac*) para sistematização dos símbolos dos elementos são internacionais” (FONSECA, 2013, p. 117, grifo nosso). Correções pontuais, mas cuidadosas, com base neste e em outros estudos historiográficos, solucionariam, a nosso ver, as distorções detectadas sem que fossem necessárias alterações substanciais na estrutura do texto, e com ganhos, para os alunos, em relação à compreensão dos conceitos e de aspectos da construção da ciência.

LD2.03/118 - Fórmulas das substâncias

Nesta US se afirma que “Para indicar as proporções em que átomos se combinam para formar as substâncias, Berzelius propôs a adoção de um índice numérico escrito à direita do símbolo” (FONSECA, 2013, p. 118). Esta poderia ser uma oportunidade para apresentar a concepção de átomo que Berzelius adotou por ocasião da estruturação de sua nomenclatura, mais relacionada a volumes ou unidades de proporção do que a átomos como partículas formadoras da matéria, enriquecendo a discussão da construção do conceito de átomo.

Eletricidade e radioatividade

LD2.06/153 - Eletricidade

O conceito de eletricidade de Volta é apresentado como parte de uma cronologia de acontecimentos relacionados. Segundo a obra, Volta teria provado “que a contração da rã observada por Galvani era por causa do fio de cobre e da placa de ferro que, ao entrarem em contato com a umidade salina da rã, geravam eletricidade por meio de reações químicas” (FONSECA, 2013, p. 154). Essa afirmativa omite a controvérsia, ainda vigente à época de Berzelius, sobre a origem comum da eletricidade galvânica e voltaica. Está também em desacordo com registros históricos do próprio Berzelius de que a eletricidade era originada do contato entre os metais – o que teria sido demonstrado por Davy – e que não se originava das reações químicas, mas sim que as provocava (ARRHENIUS, 1907; BERZELIUS, 1845).

Observamos, portanto, elementos da teoria dualista de Berzelius hibridizados a conceitos modernos em algumas US analisadas. Quanto aos aspectos históricos

(a despeito das limitações e imprecisões evidenciadas nesta análise), são usados meramente como estratégia para a introdução de conceitos, ou seja, a história da química é usada essencialmente para legitimar os conceitos como atualmente são aceitos. Diante do que se omite, podemos nos perguntar: que imagem da história da química é construída pelos alunos a partir dessa obra?

Ser protagonista (ANTUNES, 2013)

Balanceamento de equações e tipos de reações químicas

LD3.06/189 - Tipos de reações

Os autores⁵¹ afirmam que

Durante o desenvolvimento da ciência, os químicos procuraram classificar as reações químicas numa tentativa de facilitar o seu estudo. Os critérios de classificação podem se basear no número de substâncias formadas, no número de reagentes, na presença ou não de substâncias simples, etc. (ANTUNES, 2013, p. 189)

Não são levadas em consideração, entre os critérios apresentados, as semelhanças de comportamento químico – por exemplo, em uma perspectiva histórica, os resultados das eletrólises obtidos por Berzelius com a pilha de Volta –, ou seja, os fenômenos em si que, de acordo com o estudo de caso apresentado, norteavam a sistematização em química, e nem fica claro que essa sistematização tinha por objeto a compreensão dos mecanismos pelos quais as reações químicas se processavam, permitindo a previsão de fenômenos. Os critérios são predominantemente numéricos, o que corresponde a uma visão limitada dos critérios adotados pelos químicos. Essa classificação se torna, assim, exclusiva de uma ciência escolar, desvinculada da ciência química, sugerindo ênfase em regras e não nos princípios químicos.

Afirma-se ainda que “os livros didáticos apresentam diferentes classificações para as reações. Neste volume, a opção dos autores foi adotar o critério mais atualizado” (ANTUNES, 2013, p. 189). Isso reforça a visão de que a classificação das reações limita-se à esfera didática, já que não se menciona sua utilidade científica. Além disso, haveria muitas opções – dentre as quais mesmo as “menos atualizadas” teriam

⁵¹ Essa é uma obra coletiva, elaborada por diversos autores, a maioria licenciados e atuantes do ensino médio, de acordo com as informações constantes na página de créditos da obra.

valor –, o que não contribui para que o aluno compreenda a utilidade do estabelecimento de critérios, e possa até mesmo questionar o rigor científico que isso requer.

LD3.08/189 - Tipos de reações - Reações de metátese

Os autores escrevem que “As reações de metátese muitas vezes são chamadas de **reações de dupla troca**”⁵², e que “Nesse tipo de reação, átomos ou grupos de átomos das substâncias reagentes são **permutados** (trocados)” (ANTUNES, 2013, p. 189). Como exemplo, é apresentada a reação entre soluções aquosas de hidróxido de cálcio e sulfato de alumínio, por meio de fotos e da equação química (figura 4.3).

Reações de metátese

A palavra **metátese** é de origem grega (*methatesis*) e significa “transposição”. Nesse tipo de reação, átomos ou grupos de átomos das substâncias reagentes são **permutados** (trocados).

Observe o que ocorre quando se adiciona cal hidratada, Ca(OH)_2 , a uma solução aquosa de sulfato de alumínio, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, substância usada para floculação no tratamento de água.

Fotografias: Sérgio Doria Jr./The NextIDBR

solução de cal hidratada (A). solução de sulfato de alumínio (B)

A reação entre o sulfato de alumínio e a cal hidratada origina um precipitado branco.

As transformações que ocorrem podem ser equacionadas da seguinte forma.

$$3 \text{Ca(OH)}_2(\text{aq}) + \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{aq}) \longrightarrow 2 \text{Al(OH)}_3(\text{s}) + 3 \text{CaSO}_4(\text{s})$$

hidróxido de cálcio sulfato de alumínio hidróxido de alumínio sulfato de cálcio

Figura 4.3. Apresentação das reações de metátese em Antunes (2013, p. 189).

Os autores prosseguem: “Nessa reação, o cálcio (Ca) se une ao sulfato; o alumínio, por sua vez, se liga ao hidróxido. Esse tipo de reação é classificado como **reação de metátese**” (ANTUNES, 2013, p. 189).

Observa-se que a descrição acima ignora a dissociação eletrolítica dos compostos, aproximando-a, nesse aspecto, do modelo dualista de Berzelius, que desconsiderava a ação do solvente no comportamento químico. Os termos “átomos” e “gru-

⁵² O termo “metátese” é utilizado, pelo menos desde a década de 1960, para designar as reações entre compostos orgânicos insaturados, nas quais as insaturações são rearranjadas na presença de um catalisador, formando ligações múltiplas entre carbonos (FREDERICO *et al.*, 2005). No manual do professor da obra de Antunes (2013), entretanto, afirma-se que o termo é a designação mais atual para o tipo de reação denominado de “dupla-troca”.

pos de átomos” podem ser interpretados como radicais e seus óxidos, permutados sem alteração, exatamente como no dualismo eletroquímico. Isso é ainda reforçado pela representação dos compostos, em sua forma não dissociada. O que se representa por Ca seria, na concepção atual, mais adequadamente representado por $\text{Ca}^{2+}(\text{aq})$. No manual do professor, contudo, se afirma que “As equações iônicas são usadas na representação de reações de precipitação. Para isso, é necessário utilizar uma tabela de solubilidade [que é apresentada na obra]” (ANTUNES, 2013, p. 373).

Embora o fenômeno seja apresentado antes da equação que o representa, por meio de fotos, ele não é explorado no sentido de estabelecer um padrão de comportamento químico (como a formação de compostos insolúveis a partir de soluções aquosas, por exemplo) que possa ser comparado a outras situações ou utilizado para prevê-las, e que se reflita em sua representação simbólica. Como não há um esforço de sistematização, a reação apresentada fica como único exemplo. Mais exemplos (utilizando equações na forma não iônica) são apresentados em um outro momento, após a definição de metátese e sua representação, e da apresentação de outros tipos de reações. Não é apresentado um esquema geral do tipo $\text{AB} + \text{CD} = \text{AD} + \text{CB}$.

Apesar de ser orientada a contextualização no manual do professor, essa ação fica somente a critério do professor e, se não for feita, prevalecerá a abordagem do livro do aluno, que se utiliza de conceitos desatualizados que remetem ao dualismo eletroquímico, valoriza a regra em detrimento do conceito, e pode dificultar o estabelecimento de relações e a generalização pelos alunos.

LD3.10/189 - Tipos de reações - Reações de metátese

No parágrafo seguinte, afirma-se que “Uma reação de metátese ocorre entre substâncias compostas, as quais trocam seus íons *ou radicais* e formam produtos que também são substâncias compostas” (ANTUNES, 2013, p. 189, grifo nosso). Definição semelhante é oferecida à página 194. Destacamos o uso do termo radical, em um sentido distinto da acepção atual do termo (como espécie que apresenta um elétron desemparelhado e, por isso, bastante reativa), e semelhante ao utilizado na teoria dualista de Berzelius, ou seja, como um átomo ou grupo de átomos que se mantêm inalterados durante uma reação. Não localizamos uma definição para esse termo no livro analisado.

Apesar de não ser apresentado um algoritmo, o texto citado sugere o esquema geral da dupla-troca, sem que princípios químicos sejam discutidos. Analisada em conjunto com a US anterior (LD3.08/189), vemos que os autores recorrem ao modelo de íons e a fórmulas atuais. O texto não colabora para que o aluno construa conceitos adequados de reações químicas, uma vez que a ciência ratificada convive com conceitos ultrapassados, pois a noção de radical imutável foi abandonada na segunda metade do século XIX (GAY, 1976).

LD3.11/192 - Tipos de reações - Reatividade dos metais

É apresentada a reação entre cobre metálico e solução aquosa de nitrato de prata, ressaltando que “haverá, com o tempo, deposição de prata metálica sobre a lâmina de cobre e formação de íons cobre(II) na solução aquosa” (ANTUNES, 2013, p. 192). Todavia, apresenta fotos do sistema nas situações inicial e final em cuja legenda se lê: “O nitrato de prata (incolor) reage com o cobre metálico, resultando em nitrato de cobre(II), $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$, solução levemente azulada” (p. 192). Aqui, e nas equações que são apresentadas em seguida, não se faz nenhuma menção à dissociação eletrolítica das substâncias dissolvidas, embora equações iônicas tenham sido apresentadas anteriormente na obra.

Não se observam resquícios *explícitos* do dualismo eletroquímico, tampouco se faz opção por uma abordagem histórica, dando preferência a um texto sintético, em que descrições se alternam com imagens de fenômenos e suas representações simbólicas, ora na forma iônica, ora não. A mudança na interpretação dos fenômenos no decorrer do século XIX, quando se passou a considerar a influência do solvente sobre as espécies envolvidas nas reações, poderia ser utilizada pelo professor para ajudar os alunos a transitarem mais facilmente entre as duas formas de representação. Elementos do estudo de caso apresentado e discutidos anteriormente também poderiam ser utilizados em sala de aula para enfatizar o papel das equações na representação dos fenômenos, proporcionando uma exploração mais adequada das imagens que ilustram essa US.

LD3.12/192 - Tipos de reações - Reatividade dos metais

Os autores explicam o fato de que o cobre reage com nitrato de prata, mas a prata não reage com nitrato de cobre, lançando mão da reatividade:

A diferença de reatividade entre o cobre metálico e a prata metálica explica os diferentes resultados desses dois experimentos. O metal cobre é mais reativo (reage mais facilmente), e por esse motivo ocorre reação com a solução aquosa de nitrato de prata. A prata é um metal menos reativo (mais nobre) e, portanto, apresenta uma reatividade menor (p. 192).

Novamente, não se faz menção aos íons em solução, ou ao fenômeno de oxirredução apresentado na página anterior da obra. Assim, a impressão que pode ficar para o aluno é que a reação ocorre “com a solução aquosa de nitrato de prata”, e não entre os cátions prata e o cobre metálico.

A reatividade, no nível em que é apresentada neste momento da obra, poderia ser relacionada ao conceito de afinidade de Berzelius, quando é apresentada uma “tendência de reatividade dos metais”:

Interessante notar que esta série apresenta inversões não somente em relação à série de Berzelius por nós transcrita no item 3.3.2, mas também em relação àquela apresentada na US LD2.15/312 da obra de Fonseca (2013), o que poderia ser utilizado pelo professor para estimular discussões em sala de aula a respeito de como os dados científicos são obtidos e da importância de se considerá-los dentro de certas condições e limites⁵³.

Como em Fonseca (2013), a afinidade não é mencionada nesta US. Na página seguinte, é apresentada a série de reatividade dos ametais, de forma semelhante, porém mais sucinta.

LD3.13/192 - Tipos de reações - Reatividade dos metais

Após a apresentação da tendência de reatividade, explica-se que:

Geralmente, um metal situado à esquerda reage com uma substância formada por íons de metais situados à direita. Por exemplo, o cobre (mais à esquerda) reage com íons de prata (situada mais à direita). Não ocorre o

⁵³ Os potenciais padrão de redução apresentados no *Handbook of chemistry and physics* (LIDE, 2003), reconhecida obra de referência da química contemporânea, foram medidos a 25 °C e 1 atm, e são especificadas outras condições, como os eletrodos utilizados e o número de oxidação das espécies envolvidas. A variação de tais condições leva a alterações nos valores dos potenciais padrão, o que ajuda a entender por que diferentes autores, em diferentes momentos, chegaram a diferentes “filas” de reatividade. Esse aspecto é pouco discutido no ensino de química.

mesmo se a prata metálica (metal nobre, pouco reativo) for colocada para reagir com uma substância que contenha íons cobre(II).

O metal mais reativo em geral reage com substâncias iônicas cujos cátions são de metais menos reativos (p. 192).

Vemos que a ênfase é dada para o fenômeno, procurando um modelo – ainda que empírico – para sistematizá-lo, distanciando-se aqui do tratamento dado em Fonseca (2013). As representações não são feitas na forma de esquemas memorísticos, e não se menciona um “deslocamento” de íons. Também fica implícita a ideia de que é em relação às outras substâncias que se caracteriza o comportamento químico de uma determinada substância, ou seja, este não é absoluto, como também era entendido por Berzelius.

Isso poderia ser ainda mais bem estabelecido se o experimento que envolve a construção de uma série de reatividade dos metais, apresentado seis páginas adiante, fosse realizado neste momento (essa possibilidade não é sinalizada no manual do professor). Entretanto, a abordagem, ora com base em íons, ora com base em substâncias, não colabora para a compreensão dos fenômenos, o que reforça a pertinência de uma abordagem histórica como a sugerida para a US LD3.11/192.

LD3.14/193 - Tipos de reações - Reações de metais com soluções em que há íons hidrogênio, $H^+(aq)$

Nesse tópico são apresentadas reações entre metais e ácidos. A ênfase é dada ao fenômeno, com a apresentação de uma foto, da descrição do fenômeno e das equações representativas.

Diferentemente da abordagem das reações entre metais e íons metálicos em solução, apresentam-se aqui as semirreações de oxirredução. Essa variedade de modelos não colabora para que o aluno sistematize as reações entre ácidos e metais juntamente com aquelas entre metais e íons metálicos, cuja representação é feita sem lançar mão de equações iônicas. Houve intenção de que essa relação fosse feita, pois se diz que “Na tendência de reatividade apresentada na página anterior, percebe-se a inserção do hidrogênio, que não é um elemento metálico. Essa inserção permite comparar a reatividade entre ácidos e metais” (ANTUNES, 2013, p. 193).

Não se utiliza abordagem histórica, e não foram localizados indícios da presença de elementos do dualismo eletroquímico. Pelo contrário, recorre-se à presen-

ça de íons em solução e à transferência de elétrons entre as espécies como modelo explicativo.

LD3.18/194 - Exemplos de reações de metátese

São apresentadas reações de metátese que formam gás, indicando-se que “os exemplos a seguir são de reações que envolvem um sal (primeiro reagente em cada uma dessas reações) e uma substância ácida (segundo reagente)” (ANTUNES, 2013, p. 194). A ênfase não é dada ao fenômeno, mas sim à sua representação, a um modelo explicativo e à regra, já que poucos exemplos são comentados – e apenas um deles é acompanhado pela ilustração do fenômeno macroscópico –, dificultando a sistematização ou busca, pelos alunos, de um padrão para o comportamento químico apresentado. A sistematização é oferecida de antemão na citação acima, e logo após as equações:

Nesses dois exemplos, os produtos correspondem à formação de outro sal e de um ácido volátil, que escapa da solução para o ar [...]. Assim, quando dois reagentes correspondem a duas substâncias compostas e pelo menos um dos produtos é identificado como gás, observa-se uma reação de metátese com a formação de um produto volátil.” (ANTUNES, 2013, p. 194)

Entendemos que essa abordagem não colabora para que o aluno compreenda como a observação de regularidades leva ao estabelecimento de modelos, já que não seria possível realizar essa inferência somente a partir dos dois casos exemplificados, e valoriza a regra sobre o conceito. Não há abordagem histórica.

LD3.21/194 - Exemplos de reações de metátese

A neutralização entre ácidos e bases é apresentada tendo como fundamento a reação entre íons $H^+(aq)$ e $OH^-(aq)$, de forma coerente com as teorias atualmente aceitas na química. Justamente por isso, não existe relação entre esse tópico e os anteriores, já que o esquema da metátese, apresentado como a troca entre íons ou radicais, se torna inaplicável. O esquema volta a ser utilizado, entretanto, em um quadro na margem da página, onde se apresentam a dissociação de bases e a ionização de ácidos. Após uma série de equações na forma iônica, o quadro conclui: “Quando um ácido e uma base reagem, ocorre a neutralização, ou seja, há formação de água. $HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O$ ” (ANTUNES, 2013, p. 195).

Esse esquema parece trazer um resquício do dualismo eletroquímico hibridizado a teorias mais modernas, pois resulta da discussão de equações iônicas e re-

corre ao modelo de pares eletrônicos. Mas novamente se ignora a teoria eletrolítica de Arrhenius, e pouco se colabora para a compreensão dos fenômenos e sua sistematização, já que se utiliza um quadro lateral, que não faz parte do texto principal para o aluno.

A explicação proposta por Arrhenius de que a neutralização se daria somente entre as espécies H^+ e OH^- em água, coerente com o fato de que o calor de neutralização observado para quantidades equivalentes de qualquer ácido e base fortes era sempre o mesmo, e que não podia ser explicado pelo modelo de Berzelius, poderia ser utilizada pelo professor para auxiliar a compreensão do conceito e sua representação pelos alunos, bem como para inserir elementos da construção da ciência, como a provisoriidade de modelos e do papel do experimento na teorização. A teoria de Arrhenius, entretanto, só é apresentada mais adiante na obra analisada.

Ácidos e bases

LD3.22/210 - Ácidos - Ácido segundo a teoria de Dissociação de Arrhenius

Os fenômenos discutidos para os ácidos são retomados, levando a entender que é a partir desses fenômenos que se propõe seu agrupamento em uma função química. A seguir, é apresentada uma explicação teórica baseada na teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius, estabelecendo o conceito de ácido, para então introduzir equações representativas. A ênfase é dada, portanto, no fenômeno e conceito, e não na regra:

Provavelmente você já percebeu que os ácidos fazem parte de uma função química bastante comum no seu dia a dia. Além disso, eles reagem com vários metais e carbonatos e atuam sobre a cor dos indicadores. Agora, você vai voltar ao conceito de soluções iônicas e ver o que elas indicam em relação aos ácidos. (ANTUNES, 2013, p. 210)

Uma generalização pode ser oportunamente feita pelos alunos a partir de uma série de equações de ionização de ácidos apresentada após o trecho. Observa-se que os princípios aqui considerados não se relacionam ao dualismo eletroquímico, e não há abordagem histórica.

Sais e óxidos

LD3.23/225 - Sais

Os sais são apresentados como “substâncias iônicas que podem ser obtidas de reações entre ácidos e bases” (ANTUNES, 2013, p. 225). Ressalta-se que, durante a neutralização, as propriedades ácidas ou básicas de partida são alteradas, explicando-se esse fenômeno por meio da neutralização dos íons $\text{H}^+(\text{aq})$ e $\text{OH}^-(\text{aq})$ com produção de água. Afirma-se ainda que “em solução, permanecem os íons $\text{Na}^+(\text{aq})$ e $\text{Cl}^-(\text{aq})$ ” (ANTUNES, 2013, p. 225), que só formarão o cloreto de sódio após evaporação de toda a água. Apesar de algumas imprecisões (por exemplo, não é necessário que toda a água do sistema seja evaporada para a formação do cloreto de sódio, já que esse é um processo gradual que depende da sua solubilidade nas condições em que a evaporação ocorre), uma teoria é proposta para explicar o fenômeno, o que nos leva a entender que o conceito é discutido antes que qualquer regra seja apresentada.

Logo a seguir, entretanto, a equação que representa o processo é mostrada, ignorando que os íons estão em solução como se afirmou antes, o que é inconsistente. O que corresponderia aos cátions e ânions é discriminado em cores, ressaltando o esquema dualista da dupla-troca (figura 4.4).

Figura 4.4. Esquema para a neutralização apresentado em Antunes (2013, p. 225). As cores originais dos símbolos no livro didático são: Na – vermelho; Cl – verde-oliva; OH, H, HOH, H^+ , OH^- , H_2O – verde. O restante do texto é impresso em preto.

Mais uma vez, temos um resquício do dualismo, hibridizado, porém, ao conceito de íon.

LD3.24/226 - Reação de neutralização

As equações que representam a neutralização ácido-base voltam a ser apresentadas, e novamente desconsideram, para o sal, sua dissociação iônica. Afirma-se que “A neutralização total ocorre quando todos os átomos de hidrogênio ionizáveis provenientes do ácido são neutralizados por todos os ânions hidróxido provenientes da base, produzindo água e um sal” (ANTUNES, 2013, p. 226). A ênfase é, pois, na regra, e não no fenômeno, e reforça a formação de um sal, que na verdade encontra-se dissolvido, na forma dissociada. A essa afirmação, segue-se um conjunto de equações químicas que exemplificam a neutralização total e a parcial (figura 4.5), que poderia ser mais bem compreendida com o uso de equações iônicas.

Figura 4.5. Exemplos de reações de neutralização total e parcial em Antunes (2013, p. 226).

LD3.25/227 - Reação de neutralização - Reações entre ácidos e hidróxidos

É apresentada uma classificação dos sais, com ênfase na composição – embora, antes de apresentá-la, se advirta que essa classificação é feita “de acordo com alguns critérios, que se relacionam com sua composição ou com as propriedades que apresentam” (ANTUNES, 2013, p. 227). A classificação compreende os sais normais, hidrogenossais, hidroxissais, sais duplos ou mistos, hidratados e anidros, e remete àquela proporcionada pelo dualismo eletroquímico e suas ordens – embora utilizando agora o conceito de íon, e não de óxidos de radicais. Há que se lembrar, ainda, que a

classificação de Berzelius partia de um conceito teórico, que era o do dualismo eletroquímico dos corpos simples e compostos, a partir de observações empíricas da eletrólise dos compostos por meio da pilha de Volta, e levava ao estabelecimento de famílias, proporcionando sistematização e previsibilidade. O enfoque aqui é na regra que leva à tipificação dos sais, sem qualquer utilidade como ferramenta científica. O desenvolvimento da taxonomia química por Berzelius poderia ser uma oportunidade para o professor relacionar os desenvolvimentos científicos de uma época ao seu contexto, já que estava intimamente relacionado ao trabalho de Lineu, na biologia, que influenciou profundamente a ciência nos séculos XVIII e XIX. Pode, ainda, contribuir para humanizar e dar maior sentido e interesse ao estudo da nomenclatura e formulação químicas, geralmente caracterizado pela ênfase em regras.

LD3.26/227 - Reação de neutralização - Reações entre ácidos e hidróxidos

Observa-se um paralelo com a classificação proposta por Berzelius especialmente no caso dos sais duplos, que passaram a ser assim nomeados a partir de sua racionalização como compostos de segunda ordem, dentro do arcabouço teórico do dualismo (BERZELIUS, 1814), e com o esquema da dupla-troca, à medida que as equações apresentadas ignoram sua ocorrência em solução e não apresentam os compostos ionizados ou dissociados, enfatizando, com cores, a troca de partes de carga oposta. Porém, diferente do dualismo eletroquímico, os sais não são considerados como sendo formados por óxidos. A permanência de certas formas de representação que, nesse caso, pouco se alteraram desde meados do século XIX, são indícios da hibridização de aspectos do dualismo eletroquímico, totalmente descontextualizados, com teorias posteriores.

sal duplo

sal duplo

LD3.30/231 - Óxidos

O conceito de óxido como “substâncias formadas geralmente pelo oxigênio e outro elemento qualquer” (p. 231) é apresentado como princípio para sua classificação, apoiado pela discussão da disponibilidade do oxigênio e como isso concorre

para a formação dos óxidos e sua abundância, principalmente em minerais, com fotos. Entretanto, são dedicados apenas dois parágrafos a essa discussão, seguidos de duas páginas e meia dedicadas à nomenclatura e classificação dos óxidos. Nessas páginas, poucas linhas adicionais são dedicadas aos conceitos, e ainda assim sugerindo regras deles derivadas:

Óxidos básicos são aqueles que reagem com água, formando íons OH^- , e com ácidos, formando sal e água [...].

Óxidos ácidos reagem com a água, formando ácidos, e com soluções básicas, formando sal e água [...].

[óxidos anfóteros] são sólidos iônicos pouco solúveis em água que reagem tanto com ácidos fortes como com bases fortes [...].

[óxidos neutros] São óxidos moleculares que não apresentam caráter ácido ou básico em água [...].

[óxidos duplos ou mistos] São aqueles que se comportam como se fossem formados por dois óxidos de um mesmo elemento ou de elementos diferentes. (ANTUNES, 2013, p. 232–233)

Observa-se que a descrição das reações remete ao esquema de dupla-troca (efetivamente seguida de equações que seguem esse modelo, sem considerar a teoria da dissociação eletrolítica de Arrhenius referida no trecho), e também que os óxidos duplos remetem à formação de compostos de segunda ordem previstos pelo dualismo eletroquímico. Tais descrições são acompanhadas de definições que se baseiam em conceitos desenvolvidos posteriormente ao dualismo eletroquímico, como os de ligações iônicas e moleculares.

Modelos atômicos e características dos átomos

LD3.05/87 - Os primeiros modelos atômicos - Limitações e aprimoramento do modelo atômico de Dalton – contribuições de Berzelius

Um fato sem paralelo nas demais obras analisadas é a tentativa de apresentar o dualismo eletroquímico de Berzelius de forma mais completa, em uma perspectiva histórica. A teoria dualista de Berzelius é apresentada sob o nome de “Teoria eletroquímica”:

[O modelo atômico de Dalton] apresentava algumas limitações relacionadas ao comportamento das substâncias sob ação da eletricidade [...]

Nesse contexto, foram muito importantes as contribuições de Jöns Jacob Berzelius (1778-1848), que elaborou, entre diversos outros trabalhos, duas

teorias: a Teoria eletroquímica e a Teoria corpuscular; ambas aprimoraram as ideias de Dalton sem desvalorizá-las.

Em sua Teoria eletroquímica, publicada pela primeira vez em 1811, Berzelius considera os átomos como dipolos elétricos, ou seja, todos os átomos teriam carga elétrica negativa e positiva, exceto o oxigênio, que só teria carga negativa. Para ele, o comportamento dos átomos sob a ação da eletricidade dependia de qual tipo de carga preponderasse no átomo.

Em sua Teoria corpuscular, Berzelius propôs um arranjo dos “átomos compostos” de Dalton em diferentes ordens de complexidade: os de primeira ordem seriam formados por átomos elementares (por exemplo, potássio + oxigênio = potassa; enxofre + oxigênio = ácido sulfúrico); os de segunda ordem seriam formados por aqueles de primeira ordem (por exemplo: sulfato de potassa = potassa + ácido sulfúrico) e assim por diante. Nota-se assim que a potassa, que era considerada um elemento na representação de Dalton, passa a ser “átomo composto”. Isso porque Berzelius incorporou em sua teoria descobertas de Humphry Davy (1778-1829), em seus trabalhos com eletrólise, com o isolamento do elemento potássio, em 1808.

Quanto à simbologia, Berzelius adotou um sistema de letras e números para representar os “átomos” e “átomos compostos”, que é utilizado até hoje, com pequenas alterações para representar elementos e compostos [...].

Além disso, Berzelius recalculou as massas atômicas de vários compostos, especialmente aqueles formados por oxigênio. Com isso, a proporção dos átomos nas substâncias foi recalculada e as fórmulas foram modificadas. A fórmula de Berzelius para a água, por exemplo, era H^2O . A representação atual é H_2O . Já para Dalton, os átomos de hidrogênio e de oxigênio se combinavam na proporção de 1 : 1 e não de 2 : 1, como a que conhecemos hoje e que foi indicada nos trabalhos de Berzelius. (ANTUNES, 2013, p. 87)

O modelo dualista de Berzelius é adequadamente apresentado como um modelo atômico elaborado para explicar fenômenos elétricos, papel que, nos livros didáticos, é geralmente atribuído ao modelo de Thomson, proposto somente no final do século XIX, como forma de aperfeiçoar o modelo de Dalton, sem considerar que os fenômenos verificados com a pilha de Volta exigiam um novo modelo explicativo ainda no início daquele século. Também ressaltamos a tentativa de enfatizar a provisoriedade da ciência (como nas fórmulas da água ou no modelo atômico) e o trabalho colaborativo (entre Berzelius, Dalton e Davy), de forma condizente com o que se espera da contribuição da historiografia contemporânea para o ensino.

No entanto, há algumas distorções e limitações: a atribuição dos nomes “Teoria eletroquímica” e “Teoria corpuscular” não nos parece adequada. Embora Berzelius tenha se referido frequentemente à sua teoria como “teoria eletroquímica”, esta, a teoria corpuscular, a nomenclatura e simbologia, a afinidade e outros aspectos eram partes indissociáveis de sua teoria dualista, que com esse nome ficou con-

sagrada. Além disso, a eletronegatividade absoluta do oxigênio atribuída por Berzelius é erroneamente interpretada como ausência de carga positiva em seus átomos. Não fica claro, para os alunos, a que “comportamento dos átomos” o texto se refere. É justamente esse comportamento que permite a classificação dos compostos em termos de eletronegatividade, ressignificando o conceito de acidez e basicidade de Lavoisier, por exemplo. A hierarquização dos compostos em ordens, embora apresentada corretamente, não enfatiza seu verdadeiro papel, que é o de classificar as substâncias em séries que permitissem racionalizar e prever seu comportamento químico e sintetizar novos compostos. A discussão se concentra em uma suposta divergência entre Berzelius e Dalton a respeito da composição de certas substâncias, divergência esta que não foi identificada nas fontes utilizadas na nossa investigação. Mesmo a colaboração entre Davy e Berzelius é interpretada como mera apropriação por Berzelius dos resultados obtidos por Davy, sem levar em conta como cada um desses cientistas compreendia seus resultados experimentais, e nem disputas e controvérsias entre eles ou a proliferação de modelos explicativos para os fenômenos elétricos da pilha de Volta.

O texto sugere que o trabalho de Berzelius levou à modificação de todas as fórmulas das substâncias, quando sua contribuição foi no sentido de um aumento da precisão dos resultados, do estabelecimento de regras empíricas (apoiadas pelo isomorfismo, por exemplo) que permitiam prever proporções e da análise de um número muito grande de substâncias – o que, em muitos casos (mas não em todos), levou à correção das fórmulas de substâncias.

As limitações do dualismo eletroquímico não são apresentadas, e o modelo atômico proposto por Berzelius não é retomado quando se discute a contribuição de Thomson para a compreensão da estrutura da matéria. Esta é confrontada somente com o modelo de Dalton, ignorando as contribuições de Berzelius para a compreensão dos fenômenos elétricos apresentadas no próprio livro, duas páginas antes. Afirma-se que “As principais ideias relacionadas ao modelo atômico de Dalton foram aceitas durante praticamente todo o século XIX” (ANTUNES, 2013, p. 87). Na verdade, o atomismo não foi aceito consensualmente e nem facilmente, e transitava entre volumes, partículas, unidades de proporção, etc.

Finalmente, ressaltamos que o título da seção sugere que Berzelius tenha sido um continuador do trabalho de Dalton, omitindo sua contribuição na elaboração

de uma teoria abrangente e original que reunia o atomismo, as proporções, a ação da pilha e as afinidades.

Embora defendamos que a abordagem histórica nos livros didáticos não possa ser a mesma de um estudo historiográfico, já que os objetivos, público, processo de produção, espaço, etc., não são os mesmos, é preciso garantir que o recorte ou a síntese das informações não leve a um texto impreciso e que passe uma imagem errônea dos fatos históricos, como vimos no tópico 2.3.3.

Química cidadã (SANTOS; MÓL, 2013)

Substâncias inorgânicas

LD4.13/272 - Ácidos e bases

O conceito de acidez é apresentado de forma extensiva, com ênfase nos fenômenos e nos conceitos, a partir do levantamento de ideias prévias e de um experimento com indicador ácido-base, sem a apresentação de nenhum esquema memorístico, e sob uma perspectiva histórica, como no trecho a seguir:

Já na Idade Média, ao estudar os materiais, os alquimistas perceberam que muitas substâncias e materiais podiam ser classificados quanto à alteração que produziam na cor de certos extratos vegetais. Essa classificação deu origem a dois grupos. Um deles constitui os ácidos e o outro, as bases.

Das ideias do alquimista vitalista belga Johan Baptist van Helmont [1580-1644] surgiu uma teoria ácido-base que classificava as substâncias de acordo com esse critério. Ele acreditava que poderia unificar a Química e a Fisiologia porque a fermentação de produtos da digestão de seres vivos segregava, ao fim, materiais ácidos ou básicos. (SANTOS; MÓL, 2013, p. 275)

Embora o trecho não tenha conseguido se desvencilhar de uma visão relativamente continuísta – fruto, a nosso ver, da simplificação inerente à história da ciência em textos didáticos –, e possa sugerir ao leitor certa identidade entre termos usados no passado com significados distintos dos atuais – como a fermentação –, há coerência com pressupostos da historiografia contemporânea da ciência, como a tentativa de situar os desenvolvimentos científicos dentro de seu contexto, ao procurar esclarecer as finalidades que guiavam a pesquisa de Van Helmont, e a ênfase nas propriedades químicas como base para a classificação das substâncias, aspecto favorecido pelo experimento citado. Infelizmente, as fontes consultadas para a caracterização das ideias de Van Helmont não foram as mais adequadas, como indici-

am: um erro factual (o ano de nascimento de Van Helmont foi 1579 e não 1580); a associação de seu nome, de forma anacrônica, a uma “teoria ácido-base”; e a excessiva simplificação ao associar a unificação da química e da fisiologia (que, para Van Helmont, eram uma só, e não áreas a serem unificadas) a essa suposta “teoria ácido-base”.⁵⁴

Porém, após apresentar o conceito de ácido de Lavoisier, baseado na presença de oxigênio, há uma lacuna histórica, pois não se menciona o desenvolvimento desse conceito diante dos fenômenos eletroquímicos por Davy ou Berzelius, passando-se diretamente à teoria de Arrhenius, como comentamos mais adiante. Faz-se presente, ainda, uma visão de ciência construída por indivíduos, e não de forma coletiva, representada pela inserção de imagens de filósofos em um quadro intitulado “Pequena galeria de cientistas”⁵⁵ famosos que estudaram os ácidos e bases”.

A abordagem conceitual não inclui o dualismo eletroquímico.

LD4.14/278 - Ácidos e bases - Ácidos

Os ácidos mais comuns são apresentados descritivamente, com ênfase em seus usos cotidianos (também são apresentadas algumas bases, prejudicando de certa forma a sequência lógica do conteúdo). São apresentadas equações que representam os fenômenos envolvidos na formação de cavernas. A abordagem é descritiva, sem que se destaque um padrão comum às transformações ou se ofereça um esquema geral. Ao contrário, é apresentada uma grande variedade de equações químicas, sem referências à dupla-troca ou ao dualismo eletroquímico.

LD4.15/280 - Ácidos e bases - Chuva ácida

Os fenômenos relacionados à chuva ácida são descritos, e sistematiza-se a formação do íon H_3O^+ como teorização para os ácidos – distanciando-se, assim, de

⁵⁴ Sobre Van Helmont, vide: Porto, P. A.; *Van Helmont e o conceito de gás: química e medicina no século XVII*. São Paulo: EDUC/EDUSP, 1995; Porto, P. A.; Apontamentos sobre a farmácia helmontiana, in Alves, I. M. e Garcia, H. M. (Eds.), *VI Seminário Nacional de História da Ciência e da Tecnologia: Anais*, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de História da Ciência/CNPq/FAPERJ, p. 172–177, 1997; Porto, P. A.; O laboratório farmacêutico de J. B. Van Helmont: teoria e prática de um *philosophus per ignem*, in Alfonso-Goldfarb, A. M. e Beltran, M. H. R. (Orgs.), *O laboratório, a oficina e o ateliê: a arte de fazer o artificial*, São Paulo: EDUC/FAPESP, p. 87–113, 2002; Porto, P. A.; *Summus atque felicissimus salium: the medical relevance of the liquor alkahest*. *Bulletin of the History of Medicine*, n. 76, p. 1–29, 2002; Porto, P. A.; O *archeus* na medicina química helmontiana, in Martins, L. A.-C. P.; Regner, A. C. e Lorenzano, P. (Eds.), *Ciências da vida: estudos filosóficos e históricos*, Campinas: AFHIC, p. 361–392, 2006.

⁵⁵ O termo “cientistas” é também utilizado de forma anacrônica, já que os personagens citados são Van Helmont, Boyle e Lavoisier, que viveram em períodos anteriores à consolidação do termo na acepção usada no trecho.

qualquer relação com o dualismo eletroquímico. São apresentadas equações representativas da reação entre óxidos de enxofre e de nitrogênio em água.

Apesar de o enfoque não ser em esquemas, não há, tampouco, à exceção da apresentação do íon H_3O^+ , elementos que remetam a um padrão para o comportamento ácido-base ou representação dos processos, em consonância com a busca pela generalização e sistematização dos fenômenos frequentemente observada na história da química, de forma a produzir modelos de comportamento químico que sejam frutíferos para a previsão de fenômenos. Não são feitas, por exemplo, até aqui, correlações entre a formação de cavernas e a corrosão de estátuas pela chuva ácida. Este último processo não é representado por equações químicas. A abordagem não é histórica.

LD4.16/282 - Ácidos e bases - Bases

Para as bases é feita uma breve descrição, listando cinco bases e suas aplicações. O critério é provavelmente o da sua importância ou presença no cotidiano, e não remete às famílias de compostos propostas por Berzelius ou qualquer outro conceito dualista. Na verdade, não são apresentados conceitos ou teorizações, diferentemente do que foi feito anteriormente para os ácidos, tampouco elementos históricos.

LD4.17/283 - Teorias de ácidos e bases

Os autores afirmam que “a Química sempre buscou teorias e modelos que explicassem o comportamento das substâncias, entre as quais o de ácidos e bases” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 283). São apresentadas, ao longo de três páginas, as teorias de Arrhenius, Brønsted-Lowry e Lewis, com suas representações de equações químicas características e distintas entre si. Assim, explicita-se uma ênfase em teorias e modelos, e não em esquemas.

LD4.18/283 - Teorias de ácidos e bases - A teoria ácido-base de Arrhenius

A teoria de Arrhenius é apresentada como forma de teorizar o comportamento ácido-base: “o íon de hidrogênio, H^+ , que, na presença de água forma o cátion hidrônio (H_3O^+), é responsável pelas propriedades ácidas; enquanto o íon hidroxila (OH^-) é responsável pelas propriedades básicas” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 283). No entanto, não fica clara uma relação entre a formação de H^+ ou OH^- em água com os comportamentos químicos apresentados anteriormente. Equações de ionização e de dissociação são apresentadas de forma bastante repentina, e supomos que isso

possa causar alguma confusão no aluno, pois as equações apresentam o íon H^+ , quando se afirma anteriormente que esse íon forma H_3O^+ . Entretanto, essas equações, a despeito de suas semelhanças, não chegam a sugerir um esquema memorístico:

Enfatizam-se as limitações dessa teoria e as propostas por Brönsted, Lowry e Lewis. O tratamento histórico é sintético e, acreditamos, anacrônico, pois se afirma que “A primeira crítica [à teoria de Arrhenius] foi sobre a natureza do próton em solução aquosa” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 284); entretanto, o termo “próton” não era ainda aplicado, na época, com esse significado.

LD4.20/286 - Nomenclatura de ácidos e bases

Quando afirmam que “Os químicos [...] desenvolveram sistemas de nomenclaturas para as substâncias com regras as quais são fundamentadas nas estruturas dos constituintes” (p. 286) o fazem de forma coerente com o que se observou nos trabalhos de Berzelius – embora limitada, sem definir o que seriam essas estruturas e sem se referir à tentativa de exprimir suas propriedades, os conceitos teóricos que sustentam uma representação (como o conceito dualista de formação de sais a partir de ácidos e bases, na forma de óxidos, representado na fórmula $KO+SO_3$ do sulfato de potassa ou, atualmente, K_2SO_4 , com base no conceito de íons, por exemplo) ou à sistematização em famílias, de acordo com o radical eletropositivo (ou, atualmente, no cátion). Não se verifica a presença de elementos do dualismo eletroquímico.

LD4.22/290 - A neutralização de ácidos e bases - sais

A conceituação da neutralização não é feita sob uma abordagem histórica. Afirma-se que “As reações de neutralização de ácidos e bases produzem, em geral, sal e água, $HCl(aq) + NaOH(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(l)$ ” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 290). É apresentada a definição de sal como “toda substância que, em água, libera pelo menos um cátion diferente de próton H^+ e pelo menos um ânion diferente de hidroxila OH^- ” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 290), menciona-se o efeito da neutralização sobre a acidez e apresenta-se a dissociação do cloreto de sódio em água por meio de uma equação química. Explica-se que “O ânion do ácido formado depois de sua ionização

combina-se com o cátion da base formando um sal, que estará dissolvido na água” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 291). Uma equação química é mostrada em seguida:

Essa reação, mais do que um exemplo, sinaliza um esquema: ácido + base → sal + água. Embora ele tenha sido precedido por conceitos, não consideramos esse tratamento suficiente para que o aluno não priorize a memorização do esquema em detrimento do conceito e do fenômeno. Essa ênfase no esquema é reforçada em um quadro apresentado em seguida, com uma reação genérica que pode ser associada ao esquema da dupla-troca (figura 4.6).

Figura 4.6. Esquema de reação de neutralização em Santos e Mól (2013, p. 291). Observa-se um erro tipográfico importante: o produto da neutralização aparece como sendo “H₂” em vez de “H₂O”.

O esquema se baseia na formação de íons em solução, de forma coerente com a teoria de dissociação eletrolítica de Arrhenius. Entretanto, tais condições não são representadas no esquema genérico oferecido, resultando, mais uma vez, em um hibridismo com o dualismo eletroquímico, como discutido para outros livros.

LD4.28/297 - A neutralização de ácidos e bases - sais - A química dos sabões e detergentes: exemplo de sais que limpam

Em certos momentos da obra são apresentados esquemas que remetem à dupla-troca. Seu uso aplicado às substâncias orgânicas parece reproduzir a opção metodológica de Berzelius, estendendo, por analogia, os conceitos da química inorgânica à orgânica: após tratar a neutralização ácido-base, quando o esquema transcrito no trecho L4.22/290 é apresentado, os autores discorrem sobre o sabão. Os conceitos são apresentados antes de qualquer equação, mas é o esquema apresentado anteriormente que acaba permanecendo em mente quando a reação entre éster e base é apresentada:

Embora se advirta que essa é uma representação simplificada, salta aos olhos o esquema éster + base $\rightarrow$ sal + álcool, análogo ao esquema anterior ácido + base $\rightarrow$ sal + água. Ao explicar as etapas omitidas nessa equação, novas equações são oferecidas, sugerindo os esquemas: éster + água $\rightarrow$ ácido + álcool e ácido + base $\rightarrow$ sal + água:

Para a última equação, ressalta-se que “É a chamada reação de neutralização, em que um ácido reage com uma base, formando um sal e a água. Podemos dizer, portanto, que sabões são sais orgânicos” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 298). Abordagens históricas não se fazem presentes nessa US, mas é interessante observar que as semelhanças entre o comportamento químico de ésteres e sais inorgânicos apoiaram, na década de 1830, a validade do dualismo eletroquímico na química orgânica (BROOKE, 1992). Os compostos não são representados em sua forma iônica em solução, embora seja apresentado o símbolo (aq). Na primeira equação, no entanto, o estearato de sódio é apresentado com o símbolo (s), a despeito da presença de água evidenciada pela solução de hidróxido de sódio.

É apresentada uma figura que representa um sabão como um sal de ácido carboxílico “em que o hidrogênio do ácido foi substituído por um cátion” (SANTOS; MÓL, 2013, p. 298), reforçando a analogia (figura 4.7).

Figura 4.7. Semelhança entre sais orgânicos e inorgânicos ressaltada em Santos e Mól (2013, p. 298).

Se por um lado não parece ter havido intenção *explícita* de relacionar fatos, conceitos ou metodologias ao dualismo eletroquímico, por outro, uma abordagem historiográfica que trouxesse os elementos apontados anteriormente, presentes em nosso estudo de caso, poderia proporcionar aos alunos melhor compreensão dos conceitos, bem como de características da ciência química como o uso de analogias que permitem construir hipóteses e teorias sobre fenômenos ainda obscuros, teorias essas que estão sujeitas à permanente reconstrução, à medida que novos fatos tragam maior compreensão sobre tais fenômenos, ou que novas teorias proporcionem explicações alternativas e coerentes – seja de um ponto de vista estritamente racional ou pela influência de fatores externos à ciência, como o prestígio de indivíduos ou grupos.

O quadro 4.1, a seguir, resume os resultados da análise para as quatro obras. Nele, ressaltamos a presença de resquícios do dualismo eletroquímico e de esquemas memorísticos.

Quadro 4.1. Resultados da análise dos livros didáticos.

Obra	US	Conceitos desatualizados relacionados ao dualismo eletroquímico	Presença da dupla-troca, deslocamento ou esquemas similares	Abordagem histórica
LD1	LD1.05/244	Ausentes	Não	Ausente
	LD1.06/280	Ausentes	Não	Ausente
	LD1.02/152	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo
	LD1.03/154	Ausentes	Não	Presente, com referência a Berzelius, mas com distorções

	LD1.04/155	Ausentes	Não	Ausente
LD2	LD2.08/296	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD2.10/298	Ausentes	Não	Ausente
	LD2.13/312	Presentes	Deslocamento	Ausente
	LD2.15/312	Ausentes	Não	Ausente
	LD2.16/312	Presentes	Deslocamento	Ausente
	LD2.01/115	Ausentes	Não	Presente, com referência a Berzelius, mas com distorções
	LD2.03/118	Ausentes	Não	Presente, com referência a Berzelius
	LD2.06/153	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo e com distorções
LD3	LD3.06/189	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.08/189	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD3.10/189	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD3.11/192	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.12/192	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.13/192	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.14/193	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.18/194	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD3.21/194	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD3.22/210	Ausentes	Não	Ausente
	LD3.23/225	Presentes	Neutralização	Ausente
	LD3.24/226	Presentes	Neutralização	Ausente
	LD3.25/227	Presentes	Não	Ausente
	LD3.26/227	Presentes	Neutralização	Ausente
	LD3.30/231	Presentes	Dupla-troca	Ausente
	LD3.05/87	Ausentes	Não	Presente, com referência a Berzelius e com distorções
LD4	LD4.13/272	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo
	LD4.14/278	Ausentes	Não	Ausente
	LD4.15/280	Ausentes	Não	Ausente

LD4.16/282	Ausentes	Não	Ausente
LD4.17/283	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo
LD4.18/283	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo
LD4.20/286	Ausentes	Não	Presente, sem referência a Berzelius ou ao dualismo
LD4.22/290	Presentes	Neutralização	Ausente
LD4.28/297	Presentes	Neutralização	Ausente

Vemos que conceitos desatualizados relacionados ao dualismo eletroquímico permanecem em três das quatro obras analisadas, em geral hibridizados a conceitos sancionados pela química atual e associados a esquemas memorísticos, com ênfase em um ensino ritualístico, contribuindo para a aversão dos alunos pela química e dificultando a compreensão de seus fundamentos.

Em LD3 a relação com o dualismo eletroquímico se faz presente de forma mais evidente, com o uso do termo “radical” no sentido dualista. É também nessa obra que encontramos a menor frequência de abordagens históricas dos conteúdos investigados. Entretanto, a despeito de incongruências pontuais observadas e indicadas anteriormente, a abordagem é alinhada com pressupostos da historiografia contemporânea da ciência – o que se nota também para as obras LD1 e LD4. Já na obra LD2, que apresenta uma das maiores frequências de abordagens históricas para os conteúdos investigados, estas são utilizadas apenas como estratégia de apresentação ou legitimação dos conceitos atualmente aceitos.

Controvérsias científicas são mencionadas apenas em LD1 (a resistência ao atomismo no século XIX, LD1.02/152) e em LD3 (a discordância entre Dalton e Berzelius para a fórmula da água, LD3.05/87), mas de forma superficial. Assim, em nenhuma obra são suficientemente explorados elementos inerentes à ciência, como a possibilidade de múltiplas interpretações a partir de um mesmo fato, a necessidade de argumentação e seu nível de racionalidade, e a influência do prestígio científico e político dos cientistas envolvidos. A abordagem constatada em todas as obras favorece, em maior ou menor grau, uma visão de construção da ciência como um processo linear, cumulativo e continuísta, sem relação com o contexto sócio-histórico.

CAPÍTULO 5. Considerações finais

O estudo de caso histórico apresentado, produzido de acordo com os pressupostos da historiografia contemporânea da ciência, constituiu laboratório adequado para que o dualismo eletroquímico pudesse ser caracterizado em seu contexto histórico. A partir desse estudo de caso, pudemos avaliar a suposta presença do dualismo eletroquímico em livros didáticos de química e discutir suas implicações para o ensino, cumprindo os objetivos específicos desta investigação.

O mapeamento realizado nos permitiu mostrar que o dualismo eletroquímico foi produto não apenas do contexto científico da época, mas também do cenário político, econômico e cultural do final do século XVIII e início do século XIX. A busca de explicações para a afinidade, a consolidação da química como ciência, em bases matemáticas, o sucesso do sistema taxonômico de Lineu, o estágio de desenvolvimento da química orgânica e mineral, as investigações em proporções químicas, a teoria atômica de Dalton e os resultados obtidos com a pilha de Volta recém construída foram fatores internos que, aliados a fatores externos como a recessão pós-guerra, com o direcionamento mercantilista da economia sueca, e as relações políticas desse país com a França constituíram, nas mãos de Berzelius, o ambiente propício para o surgimento e sobrevivência do dualismo eletroquímico.

A partir da publicação dos primeiros artigos, ainda em 1803, e das viagens de Berzelius ao continente europeu em 1812, o dualismo eletroquímico foi gradualmente sistematizado, divulgado e encontrou aceitação na comunidade química da época, especialmente na França, Inglaterra e Alemanha, influentes centros de pesquisa química, e, ratificada pela comunidade científica, se manteve como principal explicação para os fenômenos químicos por cerca de quatro décadas. Do ponto de vista internalista, o sucesso do dualismo eletroquímico pode ser atribuído a seu valor como lei geral, buscada por meio da extensão dos conhecimentos bem estabelecidos em uma área da química a outra, por analogia; ao forte embasamento empírico; à matematização proporcionada pelos resultados estequiométricos e à reunião desses resultados – dos fenômenos eletroquímicos, da afinidade e do atomismo – sob um único arcabouço teórico, que mostrou grande poder de previsão. Os debates e críticas aos quais o dualismo eletroquímico foi submetido exigiram o seu fortalecimento, de acordo com os critérios da época, em bases experimentais e teóricas habilmente

combinadas por Berzelius. Esse trabalho de décadas, que tanto nos revela acerca da epistemologia da época, resultou em um arcabouço teórico tão resistente – por sua simplicidade e caráter unificador – que impulsionou a comunidade científica na busca do dualismo na química orgânica, resultando no acúmulo imprevisto de anomalias – no início, ignoradas ou absorvidas. Somente a partir de 1832, com a substituição do hidrogênio por cloro no ácido acético por Dumas, as anomalias se tornam mais relevantes e, ao longo da década de 1840, mais numerosas, abrindo caminho para novos problemas de pesquisa e novas teorias. Ainda assim, o rigor do dualismo impôs dificuldades às teorias concorrentes para que se mostrassem à altura de sucedê-la – o que parece ter tido mais a ver com uma mudança nas questões centrais da química, da explicação da afinidade para a sistematização da química orgânica, do que com qualquer outra questão metodológica. Gradativamente, o dualismo eletroquímico deixa de ser a teoria mais aceita pela comunidade química; alguns de seus elementos são abandonados e outros, incorporados às novas teorias, notadamente à teoria da valência, a partir da década de 1850.

Esse abandono não pode ser um processo repentino, simplesmente porque os problemas convivem por longos períodos. As teorias, que constituem respostas a determinados problemas, têm de ser adaptadas ou substituídas na medida da transição entre os problemas. A teoria da dissociação eletrolítica não é um marco do abandono do dualismo, mas nos ajuda a perceber que os conceitos dualistas eletroquímicos não são mais válidos na química atual – e, portanto, não podem estar presentes no ensino de química, salvo em uma perspectiva histórica.

A coerência de pressupostos entre a historiografia e a epistemologia contemporâneas da ciência já está estabelecida. Nossa contribuição metodológica consistiu em demonstrar a mesma coerência em relação à ATD, estabelecendo um quadro teórico-metodológico coeso e capaz de conferir sistematização adicional à produção de estudos de caso como este. Historiografia e epistemologia da ciência compartilham do mesmo objeto de investigação: a construção do conhecimento científico como atividade humana. As evidências para a investigação desse objeto estão geralmente em documentos textuais. A ATD mostra-se adequada à natureza humana desse objeto e sua forma de registro ao propor uma atitude fenomenológica que, diante da profunda impregnação com os textos e dos sucessivos movimentos descritivos e interpretativos – nos quais nos colocamos no lugar do outro, mas sem negli-

genciar nosso próprio contexto –, promove a emergência de significados e o julgamento dos conceitos no passado, livre das dicotomias externalista-internalista e anacrônica-diacrônica.

Ao desenvolver nossa fundamentação teórico-metodológica, direcionamos nossa atenção aos pesquisadores que, iniciando-se na investigação historiográfica, carecem de referências que subsidiem seu trabalho. Essa abordagem, mais do que uma intenção consciente, foi resultado da busca pessoal do autor dessa investigação para superar suas próprias limitações, terminando por adicionar caráter meta-historiográfico ao trabalho. Aqueles que, pretendendo se dedicar a pesquisa semelhante, sentem-se inseguros, podem resgatar nesse trabalho nosso percurso metodológico, e fazer o mesmo em relação à sua própria pesquisa, em qualquer momento dela, adaptando-se mais facilmente às mudanças inerentes ao processo.

Entendemos, porém, que essa metodologia é internalizada e praticada de forma tácita por muitos pesquisadores – em especial, os mais experientes. Também nós, à medida que progredíamos na investigação, internalizamos conceitos e práticas, afastando-nos algumas vezes do rigor do método (por exemplo, acrescentando elementos extraídos de novas fontes sem recorrer à sua categorização em unidades de análise ou de significado). Essa flexibilidade, praticada de forma consciente, é consequência natural do processo, e não diminui, a nosso ver, a confiabilidade do método.

A afirmação de Lopes (1995) e de Mortimer e colaboradoras (2000) de que os esquemas de dupla-troca e de deslocamento seriam baseados na já superada teoria do dualismo eletroquímico pôde, assim, ser investigada em seu aspecto histórico. A confirmação ou contestação de tal afirmação, entretanto, não implica a mesma conclusão a respeito do efeito pernicioso da repetição acrítica de tais fórmulas didáticas defendida por esses autores, com cuja argumentação, nesse sentido, concordamos. É preciso considerar que a afirmação foi feita não em trabalhos centrados em pressupostos historiográficos, mas sim em trabalhos que discutiam o uso didático de conceitos químicos, como uma proposta curricular que procurava capacitar professores para a produção autônoma de materiais didáticos, repensando criticamente o currículo tradicional de química e ressaltando práticas a serem evitadas. Nesse sentido, os problemas apontados pelos autores em relação ao ensino ritualístico permanecem válidos, embora a origem histórica dos esquemas de dupla-troca e de deslo-

camento possa ser questionada. Não obstante, acrescentamos a essa constatação que o uso da história da química no ensino – a partir, por exemplo, do caso histórico aqui apresentado – pode contribuir para a crítica a tais fórmulas, e para que os fundamentos conceituais que as justificam sejam mais bem compreendidos pelos alunos. Procuramos dar exemplos no decorrer da nossa análise, no capítulo 4.

Não encontramos indícios de que os esquemas algébricos $AB + CD = AD + CB$ e $AB + C = A + CB$ tenham sido propostos no contexto do dualismo eletroquímico de Berzelius. Ao contrário, não há, nas fontes primárias analisadas, referência a esse tipo de esquema (à exceção da obra de Arrhenius, já no final do século XIX, e referindo-se não ao dualismo eletroquímico, mas às reações ácido-base, de acordo com o modelo da dissociação eletrolítica). Essa conclusão, evidentemente, pode ser contestada ou corroborada por uma análise mais abrangente e exaustiva de fontes primárias, para além do nosso recorte, mas é fato que, embora a química do século XIX perseguisse para os fenômenos uma lei geral – como o dualismo eletroquímico se propunha a ser –, e a matematização representasse uma importante ferramenta nesse sentido, o texto descritivo era privilegiado sobre tais esquemas.

Ao reconstituir o caminho seguido pelo dualismo eletroquímico, percebemos que não se tratava do mesmo caminho que levou aos esquemas de dupla-troca e de deslocamento presentes nos livros didáticos: os conceitos envolvidos em cada caso não são comuns, pertencem ao seu próprio contexto, a despeito das semelhanças sugeridas por certos termos (como “dupla decomposição”, “radical”, “eletronegatividade”, “afinidade”, “carga”, entre outros), e foram desenvolvidos a partir de experimentos com diferentes intenções. Ao longo dos séculos XIX e XX, as investigações eletroquímicas desenvolveram uma linguagem que deu novo sentido a esses termos, sem relação semântica com seu uso no dualismo de Berzelius – o que inclusive confirma sua superação. Nos livros onde esquemas como o da dupla-troca se fazem presentes, eles aparecem associados a conceitos posteriores, como o de íon e o de cargas discretas, ausentes à época de Berzelius. Em algumas situações nos livros didáticos analisados, entretanto (notadamente, em LD3), essa associação sugere uma hibridização de conceitos originais do dualismo eletroquímico com conceitos posteriores.

O dualismo eletroquímico teve sucesso como resposta ao problema da afinidade química. Uma suposta permanência do dualismo teria que estar ligada à permanência da afinidade como problema central da química atual, o que não se verifica. Talvez, contudo, esse problema seja revisitado em momentos particulares no ensino de química, sob o pretexto de certa progressão didática dos alunos rumo à ciência estabelecida, abrindo espaço para que elementos dualistas ressurgam anacronicamente nas salas de aula, como em um túnel do tempo. Destacamos o uso, em LD2, do termo “deslocamento”, referindo-se aos elementos químicos e não aos elétrons, que – de acordo com a concepção atual – constituem o fundamento do fenômeno apresentado. Esse termo está associado ao problema da afinidade química no contexto dos séculos XVIII e XIX. Nesse caso, a história da química poderia contribuir para que tais conceitos fossem mantidos em seus devidos contextos.

A presença de esquemas algorítmicos em obras didáticas (de forma mais frequente do seria de se esperar para livros produzidos com base em critérios estabelecidos pelo PNLD e submetidos à avaliação de especialistas em educação) nos faz conjecturar que os autores desses materiais atribuem valor ainda maior a esse tipo de esquema do que a própria ciência o faz. Eles seriam, assim, característicos da ciência escolar, teriam história própria, sem necessariamente encontrar correspondência na ciência formal. Podem ainda constituir uma aspiração à generalização talvez inerente à química (embora sua utilidade científica e didática sejam discutíveis) – haja vista que o dualismo eletroquímico e a teoria dos tipos procuraram impor suas próprias generalizações à química, com mecanismos de troca entre partes duais ou de substituição de átomos para as reações químicas, que se mostraram, posteriormente, muito mais diversas do que se poderia supor. Era de se esperar que, na busca de uma lei geral, e levando em consideração os fatos e quantidade de substâncias conhecidos à época, seria inconcebível para Berzelius admitir que as reações químicas pudessem seguir distintos mecanismos. O do dualismo eletroquímico parecia dar conta dos fenômenos. Diante disso, um algoritmo para sistematizar um único tipo de reação química deveria ser pouco útil, e talvez com isso se possa explicar sua ausência nas fontes primárias até que outras teorias surgiram com modelos alternativos. Sob esse ponto de vista, os resquícios dessa ciência do passado estariam não nos esquemas algébricos, mas na intenção de generalização que os gera.

O caráter algébrico dos esquemas, por sua vez, pode ser um resquício da busca, pela química, de afirmação em bases matemáticas, e os esquemas classificatórios poderiam estar relacionados ao movimento taxonômico que ganhou força com Lineu no século XVIII.

Em que momento os esquemas de dupla-troca e de deslocamento teriam sido introduzidos nos livros-texto e sob que pretexto são perguntas que podem justificar novas investigações. De nossa parte, parece claro que tais esquemas, classificações e generalizações e, principalmente, sua presença nos livros didáticos, embora carreguem elementos do dualismo eletroquímico, não podem ser atribuídos somente a essa teoria. O que devemos nos perguntar, enquanto educadores, é: quais esquemas são realmente necessários a um aprendizado em química que se pretende fiel aos conceitos atuais dessa ciência? Eles realmente contribuem para desenvolver competências esperadas para os cidadãos em geral? E para os cientistas? A ênfase classificatória ainda presente no ensino de química, em que algoritmos procuram sistematizar fenômenos de forma totalmente alijada dos fatos, cria uma química virtual, que é o objeto a ser apropriado pelo aluno, destituindo a química de significado. Não é de se estranhar a aversão à essa ciência desenvolvida pelos alunos. Digna de celebração, nesse sentido, é a constatação, no universo de livros pesquisados, de que essa abordagem, embora presente, não é mais absoluta, com o abandono ao menos parcial de esquemas classificatórios tradicionais em L1 e, em menor grau, em L4, e o retorno aos princípios químicos como base da sistematização dessa ciência.

Além de promover reflexões conceituais e curriculares, o estudo de caso apresentado pode sugerir formas de inserção de aspectos da construção da ciência no ensino que nem sempre ficam claros (muitas vezes, nem mesmo cabem) nos livros didáticos. Continuidades e descontinuidades, como entre o dualismo eletroquímico e o dualismo de Lavoisier, com o oxigênio permanecendo como elemento-chave na determinação das propriedades dos compostos, e a realocação do modelo de acidez e basicidade de Lavoisier dentro de bases eletroquímicas; a sucessão de teorias explicativas, em que um mesmo fato é explicado de diferentes (e coerentes) formas, e na qual as teorias concorrem no tempo e espaço, participando de um jogo político de aceitação ou abandono por parte da comunidade científica; as relações entre ciência, política e economia, que podem contribuir para que os alunos questionem se uma visão científica aceita pode estar relacionada a um modelo econômico

vigente, ou se uma conquista científica não pode estar sendo usada para corroborar uma decisão política, e o quanto isso é ético; a ideia de verdade científica como produto do consenso entre cientistas e, portanto, relativa e efêmera. O verdadeiro, em ciência, não é mais do que o conveniente em um determinado contexto (veja-se o exemplo da cacodila, um radical que chegou a ser isolado, oferecendo suporte ao dualismo eletroquímico na química orgânica). Essa visão de ciência menos dogmática e mais humana concorre para que os alunos, em contato com materiais subsidiados por pesquisas como esta, desenvolvam uma visão crítica da ciência menos simplista e ingênua, mais adequada aos objetivos educacionais da atualidade expressos nos documentos oficiais e pesquisas em educação em ciências. Ao comparar conceitos válidos no passado com aqueles válidos no contexto presente, por meio de uma controvérsia histórica, combatemos a visão de uma ciência estática, presa às páginas dos livros, mostrando-a em contínuo processo.

Também é preciso refletir, na produção dos livros didáticos e em seu uso em sala de aula, a respeito da quantidade de episódios históricos a serem abordados. Um menor número de abordagens históricas, que exigem grande espaço nos livros didáticos e tempo nas aulas, pode possibilitar que os episódios sejam tratados com maior profundidade, colaborando para que os objetivos educacionais sejam atingidos sem incorrer (ou incorrendo o mínimo possível) em distorções históricas ou superficialidades. É possível que a expectativa dos professores de que os materiais didáticos cumpram o papel de oferecer múltiplas opções para as aulas esteja selecionando, no mercado, livros que priorizam a quantidade em detrimento da qualidade. A solução parece passar pela capacidade do professor de selecionar criticamente, ora em um material, ora em outro, os episódios históricos a abordar, adotando diversos materiais para criar o seu próprio, em vez de “ser adotado” por um único livro didático.

Este trabalho pretendeu oferecer uma contribuição para minimizar a escassez de textos sobre história da química alinhados à historiografia contemporânea da ciência e, ao mesmo tempo, que dialoguem com o ensino. Ainda que as oportunidades de intervenção nos materiais didáticos e salas de aula que apontamos sejam limitadas, procuramos construir nossa análise crítica de forma a estabelecer um diálogo com o professor para que, diante de um determinado conteúdo curricular, possa questionar não só sua forma de abordagem, mas até mesmo sua validade, fortalecendo seu protagonismo. Isso torna ainda mais importante que estudos de caso que

tenham controvérsias científicas estejam presentes na formação do professor de química, para que ele possa, entre outras coisas, posicionar-se política e cientificamente frente a tais controvérsias, em benefício do ensino de ciências. A efetividade de tal estratégia, bem como o acesso e uso desse tipo de material pelo professor, podem constituir objetos de futuras investigações.

Os resultados obtidos, como em qualquer pesquisa desse tipo, estão vinculados às nossas opções de delimitação do tema, aos documentos disponíveis e sua organização, guiados por nossos objetivos específicos. Quanto à análise dos livros didáticos, o recorte realizado pode ter ocultado conteúdos relacionados ao dualismo de Berzelius – especialmente considerando que os campos de investigação de Berzelius compreendiam praticamente toda a química conhecida à época. Assim, conteúdos de eletroquímica, estequiometria e química orgânica, tradicionalmente abordados em outros volumes dos livros didáticos, deixaram de ser investigados. Dessa forma, seria interessante e enriquecedor compará-la a outras investigações que, na busca da caracterização da teoria dualista ou na análise de livros didáticos, dispuseram de outras fontes e as organizaram de forma diferente, condicionadas por outros contextos sociais. É muito recompensador pensar que este trabalho possa fazer parte de um mosaico de investigações, contribuindo para uma compreensão mais ampla desse evento da história da química.

Ressaltamos que procuramos aqui julgar a presença de um conceito desatualizado, e não o valor das obras didáticas como um todo, até porque isso não seria possível diante do recorte realizado. Em todas as obras encontramos qualidades e pontos de atenção, para os quais procuramos dar nossa contribuição. O livro didático perfeito é uma utopia que não se justifica perante o papel crítico do professor em sala de aula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS⁵⁶

ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; FERRAZ, M. H. M.; BELTRAN, M. H. R. A historiografia contemporânea e as ciências da matéria: uma longa rota cheia de percalços. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Org.). *Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas*. São Paulo: EDUC/Livraria da Física/Fapesp, 2004. p. 49–73.

ANTUNES, M. T. *Ser protagonista: química*. 2. ed. São Paulo: Edições SM, 2013.

ARRHENIUS, S. *Theories of chemistry; being lectures delivered at the University of California, in Berkeley*. London: Longmans, Green, and Co., 1907.

BARNES, J. *Gems of geometry*. [S.l.]: Springer, 2012.

BELTRAN, M. H. R.; SAITO, F. História da ciência, epistemologia e ensino: uma proposta para atualizar esse diálogo. *Atas do VIII ENPEC: Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências / I CIEC: Congresso Iberoamericano de Investigación en Enseñanza de las Ciencias*, 2011. Disponível em: <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/viiienpec/resumos/R1396-1.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

BERNHARD, C. G. Berzelius as a European traveler. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 222–239.

BERZELIUS, J. J. *An attempt to establish a pure scientific system of mineralogy, by the application of the electro-chemical theory and the chemical proportions*. London: C. Baldwin, 1814.

BERZELIUS, J. J. *Autobiographical notes*. Baltimore: The Williams & Wilkins Company, 1934.

BERZELIUS, J. J. *Tratado de Química*. Madrid: D. Ignacio Boix, 1845.

BOGDAN, R. C.; BIKLEN, S. K. *Investigação qualitativa em educação*. Porto: Porto, 2010.

⁵⁶ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília: Ministério da Educação, 2015. Disponível em: <<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documentos/BNCC-APRESENTACAO.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

BRASIL. *Edital de convocação 01/2013 – CGPLI*: Edital de convocação para o processo de inscrição e avaliação de obras didáticas para o programa nacional do livro didático PNLD 2015. Brasília: Ministério da Educação, 2013. Disponível em: <<http://www.fnde.gov.br/programas/livro-didatico/livro-didatico-editais/item/4032-pnld-2015>>. Acesso em: 10 jul. 2015.

BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais: Ensino Médio*. Brasília: Ministério da Educação, 1999. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

BROOKE, J. H. Berzelius, the dualistic hypothesis, and the rise of organic chemistry. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 180–221.

CANGUILHEM, G. El objeto de la historia de la ciencia. *Revista de metodología de ciencias sociales*, n. 18, p. 195–210, 2009.

CANGUILHEM, G. *Ideologia e racionalidade nas ciências da vida*. Lisboa: Edições 70, 1977.

CANGUILHEM, G. The history of science. In: DELAPORTE, F. (Org.). *A vital rationalist: selected writings from Georges Canguilhem*. New York: Zone Books, 1994. p. 25–40.

CHAGAS, A. P. O ensino de aspectos históricos e filosóficos da química e as teorias ácido-base do século XX. *Química Nova*, v. 23, n. 1, 2000.

CUELLAR FERNÁNDEZ, L.; QUINTANILLA GATICA, M.; BLANCAFORT, A. M. La importancia de la historia de la química en la enseñanza escolar: análisis del pensamiento y elaboración de material didáctico de profesores en formación. *Ciência & Educação*, v. 16, p. 277–291, 2010.

DEBUS, A. G. A ciência e as humanidades: a função renovadora da indagação histórica. *Revista da SBHC*, v. 5, p. 3–13, 1991.

ECHEVERRIA, A.; MELLO, I. C.; GAUCHE, R. O programa nacional do livro didático de química no contexto da educação brasileira. In: ROSA, M. I. P.; ROSSI,

A. V. (Org.). *Educação química no Brasil: memórias, políticas e tendências*. Campinas: Átomo, 2008. p. 63–83.

ERIKSSON, G. Berzelius and the atomic theory: the intellectual background. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 56–84.

FONSECA, M. R. M. da. *Química*. São Paulo: Ática, 2013.

FREDERICO, D.; BROCKSOM, U.; BROCKSOM, T. J. A reação de metátese de olefinas: reorganização e ciclização de compostos orgânicos. *Química Nova*, v. 28, n. 4, p. 692–702, ago. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000400024&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 7 jul. 2016.

FREUND, I. *The study of chemical composition: an account of its method and historical development*. Cambridge at University Press, 1904.

GAY, H. Radicals and Types. *Stud. Hist. Phil. Sci.*, v. 7, n. 1, p. 1–51, 1976.

GILLISPIE, C. *Dicionário de biografias científicas*. [S.l.]: Contraponto, 2007.

GREENAWAY, F. Jöns Jakob Berzelius: the creative conservative. *Endeavour*, v. 3, n. 4, p. 138–143, 1979.

GREENBERG, A. *Chemistry: decade by decade*. Facts on file, 2007.

HEILBRON, J. L. Robert Symmer and the two electricities. *Isis*, v. 67, n. 1, p. 7–20, 1976.

HELMHOLTZ. On the modern development of Faraday's conception of electricity. *Science*, v. 2, n. 43, p. 182–185, 1881.

HIGGINS, W. On the atomic theory. *The Philosophic Magazine and Journal*, v. 51, p. 161–172, 1818.

JORPES, J. E. *Jac. Berzelius: his life and work*. Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1966.

KLEIN, U. *Experiments, models, paper tools: cultures of organic chemistry in the nineteenth century*. Stanford: Stanford University Press, 2003.

KRAGH, H. *Introdução à historiografia da ciência*. Porto: Porto, 2001.

LAURENT, A. *Chemical method, notation, classification, & nomenclature*. [S.l.]: Harrison and Sons, 1855.

LEVERE, T. H. Affinity or structure: an early problem in organic chemistry. *Ambix*, v. 17, p. 111–126, 1970.

LIDE, D. R. (Org.). *Handbook of chemistry and physics*. 84. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

LIEDMAN, S.-E. “Truth, the Angel of Light”: Berzelius, Agardh and Hwasser. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 35–55.

LINDROTH, S. Berzelius and his time. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 9–34.

LOPES, A. R. C. Livros didáticos: obstáculos ao aprendizado da ciência química I – obstáculos animistas e realistas. *Química Nova*, v. 15, p. 254–261, 1992.

LOPES, A. R. C. Reações químicas: fenômeno, transformação e representação. *Química Nova na Escola*, v. 2, n. 2, p. 7–9, 1995.

LUNDGREN, A. Berzelius, Dalton, and the chemical atom. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 85–106.

MACHEREY, P. A filosofia da ciência de Georges Canguilhem. In: CANGUILHEM, G. (Org.). *O normal e o patológico*. 6. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2009. p. 137–154.

MARTINS, R. de A. A história das ciências e seus usos na educação. In: SILVA, C. C. (Org.). *Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino*. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. XXI–XXXIV.

MARTINS, R. de A. Ciência versus historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: ALFONSO-GOLDFARB, A. M.; BELTRAN, M. H. R. (Org.). *Escrevendo a história da ciência: tendências, propostas e discussões historiográficas*. São Paulo: EDUC/Livraria da Física/Fapesp, 2004. p. 115–145.

MEGID NETO, J.; FRACALANZA, H. O livro didático de ciências: problemas e soluções. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 9, n. 2, p. 147–157, 2003.

MELHADO, E. M. Novelty and tradition in the chemistry of Berzelius. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 132–170.

MINAYO, M. C. de S. *O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde*. 8. ed. São Paulo: Hucitec, 2004.

MÓL, G. de S.; SANTOS, W. L. P. dos; CARNEIRO, M. H. S. Livro didático inovador e professores: uma tensão a ser vencida. *Ensaio: Pesquisa e Educação em Ciências*, v. 7, p. 119–130, 2005.

MORAES, R.; GALIAZZI, M. do C. *Análise textual discursiva*. 2. ed. Ijuí: Unijuí, 2011.

MORTIMER, E. F. A evolução dos livros didáticos de química destinados ao ensino secundário. *Em Aberto*, v. 7, n. 40, p. 25–41, 1988.

MORTIMER, E. F.; MACHADO, A. H. *Química: ensino médio*. 2. ed. São Paulo: Scipione, 2014.

MORTIMER, E. F.; MACHADO, A. H.; ROMANELLI, L. I. A proposta curricular de química do Estado de Minas Gerais: fundamentos e pressupostos. *Química Nova*, v. 23, n. 2, p. 273–283, 2000.

MORTIMER, E. F.; SANTOS, W. L. P. dos. Políticas e práticas de livros didáticos de química: o processo de constituição da inovação X redundância nos livros didáticos de química de 1833 a 1987. In: ROSA, M. I. P.; ROSSI, A. V. (Org.). *Educação química no Brasil: memórias, políticas e tendências*. Campinas: Átomo, 2008. p. 85–103.

PIMENTEL, A. O método da análise documental: seu uso numa pesquisa historiográfica. *Cadernos de Pesquisa*, p. 179–195, 2001.

PORTO, P. A. História e filosofia da ciência no ensino de química: em busca dos objetivos educacionais da atualidade. In: SANTOS, W. L. P. dos; MALDANER, O. A. (Org.). *Ensino de Química em Foco*. Ijuí: Unijuí, 2010. .

RHEINBOLDT, H. *História da balança e a vida de J.J. Berzelius*. São Paulo:

Nova Stella/Edusp, 1988.

ROCKE, A. J. Berzelius's Animal Chemistry: from physiology to organic chemistry (1805-1814). In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 107–131.

RUSSEL, C. A.; ROBERTS, G. K. (Org.). *Chemical history: reviews of the recent literature*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005.

RUSSELL, C. A. The electrochemical theory of Berzelius. *Annals of Science*, v. 19, p. 127–145, 1963.

SAITO, F. História da Ciência e Ensino: em busca de diálogo entre historiadores e educadores. *História da Ciência e Ensino Construindo Interfaces*, v. 3, p. 1–6, 2010.

SALTZMAN, M. J. J. Thomson and the modern revival of dualism. *Journal of Chemical Education*, v. 50, n. 1, p. 59–61, 1973.

SANTOS, L. dos. A história da historiografia como locus da epistemologia histórica. *Anais da II Semana da Licenciatura em História*, p. 1–15, 2012.

SANTOS, W. L. P. dos; MÓL, G. de S. *Química cidadã*. 2. ed. São Paulo: AJS, 2013.

SCHÜTT, H.-W. Berzelius as godfather of isomorphism. In: MELHADO, E. M.; FRÄNGSMYR, T. (Org.). *Enlightenment Science in the Romantic Era*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. p. 171–179.

SCOTT, F. D. *Sweden: the nation's history*. Minneapolis: University of Minnesota Press/American Scandinavian Foundation, 1983.

VIANA, H. E. B.; PORTO, P. A. O processo de elaboração da teoria atômica de John Dalton. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, v. 7, p. 4–12, 2007.

VIDAL, P. H. O.; PORTO, P. A. A história da ciência nos livros didáticos de química do PNLEM 2007. *Ciência & Educação (Bauru)*, v. 18, n. 2, p. 291–308, 2012.

VIDAL, P. H. O.; PORTO, P. A. Algumas contribuições do episódio histórico

da síntese artificial da ureia para o ensino de química. *História da Ciência e Ensino Construindo interfaces*, v. 4, p. 13–23, 2011. Disponível em: <<http://revistas.pucsp.br/index.php/hcensino/article/view/6013>>.

ZANON, L. B. Tendências curriculares no ensino de ciências/química: um olhar para a contextualização e a interdisciplinaridade como princípios da formação escolar. In: ROSA, M. I. P.; ROSSI, A. V. (Org.). *Educação química no Brasil: memórias, políticas e tendências*. Campinas: Átomo, 2008. p. 235–262.

APÊNDICE I. Fichamento

Tela do *software* Microsoft® Word™ mostrando o fichamento das fontes. Pode ser vista, à direita, parte do fichamento do documento representado pelo código 45, que constitui uma unidade de análise. A referência é inserida automaticamente pelo *software* Mendeley, que se integra ao Word™ por meio de um *plug-in* (A). O código 45.01 identifica uma unidade de significado, cujo título expressa as ideias centrais da unidade, destacadas no texto durante sua leitura.

Os títulos são identificados com estilos, de forma hierarquizada, por meio do recurso *Styles* (B). Esses títulos aparecem sumarizados no painel à esquerda, acionado pelo recurso *Document Map* (C).

APÊNDICE II. Categorização

Tela da planilha eletrônica Microsoft® Excel™ mostrando parte da organização das unidades de significado (representadas por seus códigos e títulos, a partir da linha 4 da planilha). A reunião das unidades de significado de acordo com seus temas centrais (nas colunas) levou ao estabelecimento do nível mais particular de categorias (na linha 3, em tom mais claro), que foram acomodadas em níveis mais gerais (nas linhas 1 e 3, em tom mais escuro). A linha 2 foi reservada para as descrições das categorias. Durante as releituras das unidades de significado, estas eram frequentemente reposicionadas nas categorias.

1	Referencial Teórico-metodológico	Discute relações entre história da ciência e epistemologia da ciência.	Sobre o papel da epistemologia na caracterização, escolha e delimitação do objeto de estudo.	Discute os critérios, científicos ou não, pelos quais uma teoria científica é validada e a ciência é construída.	Sobre o modelo da escola ou modelo do tribunal de Canguilhem.	Referências que fundamentam a teoria e a metodologia quanto aos aspectos historiográficos	Define e dá exemplo de conceito de pesquisa em "Princípios historiográficos"
2	Epistemologia da ciência	Relação entre epistemologia e história da ciência	Delimitação do objeto de estudo	Críticos de validação de uma teoria e construção da ciência	Modelo do tribunal	Historiografia da ciência	Presentismo
3	02.02.b - Epistemologia - Delimitação do objeto de estudo		02.02.b - Epistemologia - Delimitação do objeto de estudo			26.01 - Historiografia - biografia de Berzelius	
4	05.10 - Epistemologia - definição do contexto histórico		05.10 - Epistemologia - definição do contexto histórico			05.09 - Historiografia - busca de documentos; interpretação	
5	02.01.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia	02.01.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia			02.01.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia	21.13 - Historiografia - interpretação	
6	02.02.c - Epistemologia - Conciliação entre história e epistemologia; anacronismo e	02.02.c - Epistemologia - Conciliação entre história e epistemologia; anacronismo e				02.02.c - Epistemologia - Conciliação entre história e epistemologia; anacronismo e	
7	02.03.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia	02.03.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia				02.03.a - Epistemologia - relação entre história e epistemologia	
8	02.04.a - Epistemologia - modelo do laboratório	02.04.a - Epistemologia - modelo do laboratório					

APÊNDICE III. Classificação das referências

Discriminação das referências utilizadas na fundamentação teórico-metodológica e na produção do estudo de caso, de acordo com o uso principal.

Uso	Fontes		
Fundamentação teórico-metodológica	(ALFONSO-GOLDFARB <i>et al.</i> , 2004)	(ECHEVERRIA <i>et al.</i> , 2008)	(MORTIMER <i>et al.</i> , 2000)
		(KRAGH, 2001)	(VIDAL; PORTO, 2012)
	(BOGDAN; BIKLEN, 2010)	(MACHEREY, 2009)	(VIDAL; PORTO, 2011)
		(MARTINS, 2006)	(ZANON, 2008)
	(CANGUILHEM, 2009 [1966])	(MARTINS, 2004)	(MORTIMER; SANTOS, 2008)
	(CANGUILHEM, 1977)	(MEGID NETO; FRACALANZA, 2003)	(PIMENTEL, 2001)
	(CANGUILHEM, 1994)	(MINAYO, 2004)	(PORTO, 2010)
	(CUELLAR FERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 2010)	(MÓL <i>et al.</i> , 2005)	(SAITO, 2010)
	(DEBUS, 1991)	(MORAES; GALIAZZI, 2011)	(SANTOS, 2012)
		(MORTIMER, 1988)	(VIANA; PORTO, 2007)
O dualismo eletroquímico de Berzelius	Fontes primárias	Fontes secundárias	
	(ARRHENIUS, 1907)	(ARRHENIUS, 1907)	(LINDROTH, 1992)
	(BERZELIUS, 1814)	(BERNHARD, 1992)	(LOPES, 1992)
	(BERZELIUS, 1934 [1842])	(BROOKE, 1992)	(LOPES, 1995)
		(ERIKSSON, 1992)	(LUNDGREN, 1992)
	(BERZELIUS, 1845)	(GAY, 1976)	(MELHADO, 1992)
	(HIGGINS, 1818)	(GILLISPIE, 2007)	(MORTIMER <i>et al.</i> , 2000)
	(LAURENT, 1855)	(GREENAWAY, 1979)	(RHEINBOLDT, 1988 [1950-1951])
		(HEILBRON, 1976)	(ROCKE, 1992)
		(HELMHOLTZ, 1881)	(RUSSELL, 1963)
		(JORPES, 1966)	(SALTZMAN, 1973)
		(KLEIN, 2003)	(SCHÜTT, 1992)
		(LEVERE, 1970)	(SCOTT, 1983)
		(LIEDMAN, 1992)	