



10

O POTENCIAL QUÍMICO E SEU ENSINO

The chemical potential and its teaching

RESUMO

Joel Augusto Moura Porto

joelaugustomp@gmail.com

Universidade Federal da Bahia (UFBA),
Salvador, BA, Brasil

José Luis P. B. Silva

joseluis@ufba.br

Universidade Federal da Bahia (UFBA),
Salvador, BA, Brasil

O conceito de potencial químico tem sido considerado como difícil por estudantes e professores. Este trabalho tem como objetivo esclarecer tal conceito a partir de aspectos importantes da sua construção histórica — origem, desenvolvimento e relações com outros conceitos — de modo a contribuir para a sua compreensão e o seu ensino. Fundamentados na Teoria Histórico-Cultural, desenvolvemos uma análise de conteúdo de documentos de importância histórica na elaboração do potencial químico: o artigo seminal de George Green, o Tratado de Maxwell e o artigo de Gibbs no qual tal conceito foi formulado pela primeira vez. Os resultados mostram que conceito de potencial químico é muito claro: uma grandeza termodinâmica que funciona como critério de equilíbrio e desequilíbrio em processos químicos de transferência de substância entre as diferentes regiões de um sistema, a exemplo de dissolução, difusão etc. Em vista de tais resultados, propomos uma abordagem didática do potencial químico que enfatize sua elaboração histórica e a discussão das relações entre seus aspectos abstrato e o concreto, em analogia com conceitos termodinâmicos similares.

Palavras-Chave: potencial químico, ensino de termodinâmica, ensino de química.

ABSTRACT

Students and professors have considered the chemical potential concept as difficult. The aim of this work is to enlighten such concept from important aspects of its historical elaboration — origin, development and relations with other concepts — in such a way that contribute to its comprehension and its teaching. Grounded on Historical-Cultural Theory, we developed a content analysis of documents of historical importance in chemical potential elaboration: the seminal article of George Green, Maxwell's Treatise and Gibbs' article in which such concept was formulated for the first time. Results show that the chemical potential concept is very clear: a thermodynamic property that acts as equilibrium and disequilibrium criterion in chemical processes of substance transfer between different regions of a system, for example, in dissolution, diffusion etc. In view of such results, we suggest a didactic approach to chemical potential that emphasizes its historical elaboration and the discussion of relations between its abstract and concrete aspects, in analogy with similar thermodynamic concepts.

Keywords: chemical potential, thermodynamics teaching, chemistry teaching.



INTRODUÇÃO

A Físico-Química é usualmente considerada uma disciplina difícil (TSAPARLIS, 2014) tanto por estudantes quanto por professores, os quais atribuem as dificuldades à natureza abstrata dos conceitos físico-químicos, à grande quantidade de conteúdo das disciplinas, à insuficiência das fontes de consulta ou estudo, ao ensino centrado no professor e fortemente expositivo e, por fim, à falta de motivação dos estudantes (SÖZBILIR, 2004), a qual pode ser compreendida à luz das demais dificuldades apontadas.

Entre os diversos ramos da Físico-Química, a Termodinâmica é um dos que apresenta conteúdos mais abstratos (TSAPARLIS; FINLAYSON, 2014), uma vez que independe de sistemas materiais específicos para sua elaboração e desenvolvimento lógico.

Nossa experiência com o estudo e o ensino da Termodinâmica tem revelado que o conceito de potencial químico — extremamente importante no desenvolvimento da Termodinâmica do equilíbrio químico — apresenta uma dificuldade ímpar para os estudantes dos cursos de Química.

Uma revisão da literatura nacional e internacional acerca do conceito de potencial químico revelou que vários autores de diversos países reconhecem dificuldades referentes a uma clara compreensão do conceito. Desse modo, notamos que não se trata de um problema local ou nacional, mas internacional. Contudo, foram encontrados poucos artigos nos quais o conceito em si é discutido: a grande maioria utiliza o conceito de potencial químico. Não localizamos nenhum artigo recente de discussão desse conteúdo.

Dirzo (1991) aborda o tema em um artigo de título muito sugestivo: Un concepto “mágico” en termodinámica: el potencial químico. Logo no início do texto, esclarece:

O vasto uso do potencial químico faz com que seus numerosos usuários percam de vista suas origens teóricas e experimentais, que tampouco são expostos na hora do seu ensino, reduzindo-se a uma simples definição.

O potencial químico aparece então como um conceito “mágico” pela sua imprescindível presença na prática, mas cuja gênese e significado, porém, se perdem na obscuridade.

Este artigo pretende dar um pouco de luz à natureza desse osso, em verdade, difícil de roer. (DIRZO, 1991, p. 94, tradução nossa).

Em seu artigo, Dirzo (1991) introduz a primeira e a segunda leis da Termodinâmica em separado e, em seguida, realiza sua combinação para gerar as expressões das funções termodinâmicas de sistemas abertos, em termos da quantidade de matéria. Então, apresenta o potencial químico como uma propriedade que constitui uma “norma de equilíbrio nos sistemas abertos” (DIRZO, 1991, p. 99, tradução nossa), de tal modo que o potencial químico de cada componente de um sistema em equilíbrio químico deve ter o mesmo valor em todas as suas partes.

Curioso é que Dirzo (1991) não apresenta as mencionadas origens teóricas e experimentais do potencial químico. O esclarecimento do conceito parece-nos insuficiente, já que não é elucidado seu modo “mágico” de aparecer.

Cook e Dickerson (1995) abordam o ensino do potencial químico no âmbito da Termodinâmica Estatística e manifestam sua percepção de que

[...] ainda existe muita confusão sobre o significado de “potencial químico”, μ . Tipicamente, estudantes aprendem a definição de μ , suas propriedades e consequências e

problemas de trabalho usando-o, mas frequentemente se perguntam: “O que é isso?” (COOK; DICKERSON, 1995, p. 737, tradução nossa).

A partir da definição do potencial químico como $\mu = (\partial U/\partial n)_{S,V}$, a resposta dos autores à questão “o que é o potencial químico?”, é: “De acordo com a equação [definição formal acima], ele é calculado como a variação da energia interna do sistema quando uma partícula a mais é adicionada, enquanto se mantêm o volume e a entropia constantes” (COOK; DICKERSON, 1995, p. 738, tradução nossa). Em nosso entender, se tal resposta evita confusões, por ser a tradução em palavras da definição em símbolos matemáticos, não esclarece “o que é o potencial químico”, mas apenas como se pode calculá-lo.

Ao longo do artigo, são desenvolvidas expressões mais detalhadas do potencial químico para vários modelos físico-estatísticos, sem que uma resposta acerca do ser potencial químico seja exposta. Esse procedimento faz-nos recordar Álvaro de Campos (2008), que, em Notas para a Recordação do meu Mestre Caeiro (Algumas Delas), propõe “definir (...) da maneira em que se definem as coisas indefiníveis – pela cobardia (sic) do exemplo”, apesar de o potencial químico não ser indefinível em termos gerais, conforme apresentado no artigo.

Ralph Baierlein (2001, p. 423, tradução nossa) busca oferecer “entendimentos qualitativos do potencial químico”, um conceito considerado “elusivo”, conforme consta do título do seu artigo, ou seja: um conceito evasivo, vago, fugidio, impreciso. O autor conta que passou “vários anos estudando respostas para a questão [...] qual o significado do potencial químico?” Então, propõe “três caracterizações do potencial químico [...] que capturam diversos aspectos da sua natureza múltipla”, a saber: “tendência à difusão”, “taxa de mudança” e “energia característica”. Ao final do artigo, apresenta notas históricas nas quais esclarece como e por quem o adjetivo químico foi adicionado ao termo potencial.

A abordagem de Baierlein (2001) peca pela pouca generalidade. Assim como Cook e Dickerson (1995), ele trata de casos nos quais o potencial químico tem aplicação, mas não estabelece um conceito geral para o termo.

Job e Herrmann (2006) identificam dificuldades de reconhecimento do potencial químico como uma grandeza importante por estudantes de Física, o que é atribuído à falta de uma concepção intuitiva do potencial químico, análoga à que se tem acerca da temperatura ou da pressão. Divergindo da abordagem de Cook e Dickerson (1995) e concordando parcialmente com Baierlein (2001), Job e Herrmann propõem que o potencial químico pode ser intuitivamente concebido como uma tendência de toda substância à mudança:

Toda substância tem uma tendência à mudança, isto é, a reagir com outras substâncias; a transformar-se em outro estado de agregação e a migrar para outro lugar. [...] Essa tendência pode ser descrita por uma única grandeza física, o potencial químico (JOB; HERRMANN, 2005, p. 356, tradução nossa).

A relação entre potencial químico e tendência à mudança está fortemente associada aos trabalhos de Gilbert Lewis (1923), que fogem aos limites desta comunicação. Contudo, vale chamar a atenção para o caráter animista dessa concepção, o qual pode criar dificuldades ao seu aprendizado (LOPES, 1991).

Concordamos com Tsaparlis e Finlayson (2014) que a História da Ciência desempenha um importante papel na educação científica, especialmente no esclarecimento dos conceitos, posto que o conceito nasce das tentativas de solucionar um (ou mais de um) problema (VIGOTSKI, 2009). O conhecimento do problema que deu origem à formação de um conceito, assim como seu processo de desenvolvimento e os nexos com outros conceitos, contribuem para a sua compreensão e subsequente explicação.

Em vista do exposto, o objetivo deste trabalho é esclarecer o conceito de potencial químico a partir de aspectos importantes da sua construção histórica, de modo a contribuir para a sua compreensão e o seu ensino.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No âmbito da Teoria Histórico-Cultural, um conceito constitui-se em uma generalização, posto que se refere a uma classe de casos — objetos, eventos, situações etc. —, porém sem se referir a nenhum caso específico ou exemplar do conceito. Sendo assim, todo conceito é abstrato (VIGOTSKI, 2009).

Um conceito se forma quando são estabelecidos os critérios que fazem com que os casos possam ser inseridos na classe (HARDY-VALLÉE, 2013). Tais critérios são características comuns a todos os casos exemplares do conceito. Novos casos são incluídos no conceito, na medida em que são reconhecidos como atendendo aos critérios conceituais estabelecidos. O estabelecimento dos critérios conceituais e seu reconhecimento em novos casos constitui-se em um processo psicológico complexo, do qual participam a percepção, a atenção, a memorização, o pensamento e a linguagem (LURIA, 1991).

Por outro lado, um conceito também pode apresentar concretude quando tratamos dos casos particulares que abrange, situação muito comum na vivência diária: o conceito se concretiza no exemplar (VIGOTSKI, 2009). O grau de concretude de um conceito pode apresentar-se alto quando o exemplar é de natureza sensível, como um termômetro. Pode ser intermediário, quando o conceito está associado a um fenômeno, o qual não é um exemplar do conceito, a exemplo de temperatura. E um conceito pode exibir concretude menor quando não inclui exemplares sensíveis, como no caso de átomo.

Um conceito resulta de atos do pensamento e, para tornar-se público, precisa ser relacionado a uma expressão, linguística ou não, por meio da qual é veiculado. Quando se estabelece uma relação entre um conceito e uma expressão, forma-se um signo: a expressão (ou termo conceitual) é sua parte material, e o conceito (ou significado) é o conteúdo do signo, aquilo que se pretende que seja entendido por alguém quando a expressão lhe é apresentada (ECO, 2000). Portanto, consideramos os termos conceito e significado como sinônimos.

Ao enunciarmos um conceito, empregamos outros termos conceituais para fazê-lo, estabelecendo as ligações entre os conceitos e construindo um sistema conceitual. Cada conceito faz parte de um sistema de conceitos, com os quais se encontra claramente interligado (VIGOTSKI, 2009).

Conceitos nascem das tentativas de solucionar problemas (VIGOTSKI, 2009) e, por isso, as histórias dos conceitos encontram-se imbricadas com as histórias de tais problemas. O conhecimento do problema que deu origem a dado conceito e do desenvolvimento das soluções do problema pode contribuir para esclarecer os conceitos, informando os nexos conceituais que foram se formando ao longo do tempo, bem como as razões e argumentos que sustentam tais nexos.

3 METODOLOGIA

O trabalho constitui-se em uma pesquisa documental (PIMENTEL, 2001) na qual empregamos a análise de conteúdo (BARDIN, 2002) na busca de termos e conceitos relacionados ao potencial químico, assim como dos problemas que lhes deram origem.

A busca dos documentos obedeceu ao critério de estabelecer pontos do percurso de formulação e desenvolvimento do conceito de potencial químico. Tínhamos como ponto de partida as informações de que o termo potencial também é empregado na Física e que o conceito de potencial químico havia sido formulado por Gibbs em seus trabalhos sobre Termodinâmica, na segunda metade do século XIX.

Ora, sabíamos da existência de uma edição de *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs* em uma das bibliotecas da Universidade Federal da Bahia, pois já os havíamos consultado em outra ocasião. Portanto, a cópia do trabalho original de Gibbs, *On the Equilibrium of Heterogeneous Substances*, de 1976 e 1978, estava disponível. Também utilizamos uma edição digitalizada a partir do original publicado em 1906, obtida no sítio virtual do Internet Archive.

Então, buscamos identificar na bibliografia de História da Física quando e como se deu a introdução do conceito de potencial na Física e descobrimos que isso foi realizado por Green, em 1928. O artigo original intitulado *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism* foi localizado em sítio virtual da Cornell University Library.

Uma vez que o trabalho de Green (1928) se referia à Eletricidade e ao Magnetismo, pareceu-nos importante verificar sua repercussão em *A Treatise of Electricity and Magnetism*, de James Clerk Maxwell, dada a sua importância nessa área. Obtivemos uma cópia virtual da 1ª edição, datada de 1973, no sítio virtual da Associação dos Professores de Geometria e de Desenho de Portugal.

Completamos os documentos básicos com dois artigos de Bancroft (1895-1896; 1903), nos quais cunhou o termo potencial químico. Os documentos foram obtidos por meio do sítio da biblioteca virtual JSTOR.

Essas obras constituíram o núcleo do trabalho de pesquisa e identificaram o problema que deu origem ao conceito de potencial químico e seu percurso até nossos dias. As demais referências, localizadas por meio de pesquisa nas bases Scielo e ERIC, visaram complementar os documentos históricos.

Em cada obra analisada, procuramos identificar os conceitos vinculados ao termo potencial. Para tal, lemos os textos buscando pelo vocábulo potencial e/ou congêneres. Nos textos muito longos e disponíveis em Formato Portátil de Documento (PDF), a exemplo do artigo de Gibbs (1961), utilizamos da ferramenta de busca “Localizar” no arquivo sob análise. Uma vez localizado o termo, selecionamos trechos anteriores e posteriores ao ponto localizado, de modo a formar uma unidade de sentido, a fim de analisá-lo e dele extrairmos as características explícitas do conceito, assim como compreender seu emprego.

Os resultados desta comunicação não incluem os trabalhos de Lewis (1923), já que este não emprega o termo potencial químico em suas obras, mas sim tendência ao escape.

Desse modo, estabeleceu-se um percurso do desenvolvimento do conceito de potencial químico, desde a introdução da ideia de potencial na Física até seu emprego na explicação de fenômenos químicos.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Origem do potencial na física

De acordo com historiadores da Física (WHITTAKER, 1910; PURRINGTON, 1997), George Green (1928) introduziu o potencial na Física-Matemática em um artigo intitulado *An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism*. Green tinha como problema a análise matemática de várias situações físicas relacionadas às leis de ação concernentes ao, então denominados, fluido elétrico e também ao fluido magnético. Em suas palavras: “O objeto deste Ensaio é submeter à Análise Matemática os fenômenos de equilíbrio dos fluidos elétrico e magnético e estabelecer alguns princípios gerais igualmente aplicáveis a condutores perfeitos e imperfeitos” (GREEN, 1928, p. 5).

O trecho do seu artigo seminal, no qual no qual define a função potencial é o seguinte:

É bem conhecido que aproximadamente todas as forças atrativas e repulsivas existentes na natureza são tais que, se nós consideramos qualquer ponto material p , o efeito de todas as forças provenientes de um sistema de corpos S agindo sobre esse ponto, em dada direção, será expresso por uma diferencial parcial de certa função das coordenadas que servem para definir a posição do ponto no espaço. A consideração desta função é de grande importância em várias investigações [...]. Na sequência, nós frequentemente teremos ocasião de nos referirmos a esta função e, portanto, iremos denominá-la, resumidamente, a função potencial proveniente do sistema S . (GREEN, 1828, p.5-6, tradução nossa, grifos do autor.)

Green não explicou as razões para a escolha da denominação função potencial, exceto pelo fato de que seu emprego simplifica a menção à muito maior expressão “função das coordenadas que servem para definir a posição do ponto no espaço”.

Considerando que o termo potencial é muito antigo e de uso corrente em várias línguas, inclusive, na língua inglesa, uma suposição razoável é que Green tenha se baseado no sentido comum do termo, qual seja: “o que pode vir a ser; possível, latente” (GURALNIK, 1975, p. 467), “respeitante à potência; virtual, possível” (FERREIRA, 1999, p. 1618), “que existe em estado latente; inativo, virtual”, “relativo a potência; existente apenas como possibilidade ou faculdade, não como realidade” (HOUAISS, 2001, p. 2273).

Esses atuais significados dicionarizados de potencial remetem a Aristóteles, para quem potência era “o princípio originador da mudança”, de modo que as coisas podem possuir um potencial de vir a ser e se modificarem sem deixar de ser. Portanto, o ser “não é apenas o que já existe em ato, mas também o que pode vir a ser em ato, ou seja, o que existe em potência” (SANTOS, 2013, p. 113). Por exemplo: cada ser humano muda ao longo do tempo — realizando ou atualizando seu potencial —, sem que deixe de ser a mesma pessoa.

Sendo assim, uma interpretação que nos parece plausível é que a função potencial contém em potência a força ou o efeito da força (o ser em ato), obtida por meio da operação matemática de derivação da função. Esse é um primeiro significado qualitativo para o termo potencial na Física: a força em potência.

Por volta de 1840, Gauss desenvolveu a ideia de modo independente e abreviou ainda mais o termo para, simplesmente, potencial (PURRINGTON, 1997).

4.2 Maxwell e a ampliação do conceito de potencial

O conceito de potencial foi ampliado por James Clerk Maxwell (1873) na sua obra fundamental *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Para elaborar seu tratado, Maxwell baseou-se em estudos experimentais dos fenômenos elétricos e magnéticos por Faraday e na sua formulação matemática por outros pesquisadores, entre os quais cita explicitamente Green e Gauss. Maxwell correlacionou as abordagens teórica e experimental e verificou que os resultados gerais coincidiam. Desse modo, pode explicar os mesmos fenômenos e/ou conceitos por procedimentos distintos, a exemplo do conceito de potencial, que tanto podia ser entendido como “uma grandeza que satisfaz a certa equação parcial diferencial” — a qual Green havia denominado função potencial — quanto como “o resultado da soma das partículas eletrificadas divididas pela sua distância de um dado ponto”. (MAXWELL, 1873, p. xi).

Maxwell também estabeleceu que o trabalho realizado sobre uma partícula que passa de um ponto a outro do espaço corresponde a uma diferença de potencial entre esses dois pontos. O potencial é definido de tal modo que, se o movimento da partícula é realizado no sentido da força que lhe é aplicada, passa-se de um ponto de maior valor do potencial para outros de menor valor.

Desse modo, torna-se clara a analogia estabelecida por Maxwell:

O Potencial, na ciência elétrica, tem a mesma relação com a Eletricidade que a Pressão tem com o Fluido, na Hidrostática, ou que a Temperatura tem com o Calor, na Termodinâmica. Eletricidade, Fluidos e Calor tendem todos a passar de um local a outro se o Potencial, a Pressão ou a Temperatura é maior no primeiro local que no segundo (MAXWELL, 1873, p. 74).

Essa analogia estabelece a igualdade dos valores de potencial elétrico como uma condição de equilíbrio elétrico, assim como a igualdade de pressões (hidrostáticas) ou de temperatura são condições para equilíbrios hidrostático ou térmico. De outro modo, a desigualdade dos valores de potencial elétrico ou pressões ou temperaturas implicará a possibilidade de uma transferência de carga elétrica ou fluido ou energia, respectivamente, entre os pontos em que há diferença de potencial.

Tal concepção do potencial será a base para o conceito de potencial químico, como veremos a seguir.

4.3 O potencial na química

Três anos depois da publicação do Treatise por Maxwell, Josiah Willard Gibbs (1876) publicou a primeira parte de um extenso trabalho que se tornou célebre, intitulado On the Equilibrium of Heterogeneous Substances, no qual é apresentada a ideia de potencial associada a processos de transferência de massa entre dois pontos.

Nos trechos iniciais do artigo, Gibbs trata de critérios gerais de equilíbrio em termos de energia e entropia de sistemas. Em seguida, passa a examinar critérios particulares de equilíbrio vinculados a processos de transferências de substâncias entre pontos de um sistema, tratados quantitativamente como transferência de massa.

O primeiro caso analisado consiste nas condições de equilíbrio entre partes homogêneas de um sistema, abertas entre si, mas sem interação com o exterior. Por simplicidade, consideraremos que o sistema possui apenas um componente. Logo, a variação de energia interna para cada parte desse sistema é dada por:

$$dU = \left(\frac{dU}{dS}\right)_{V,m} dS + \left(\frac{dU}{dV}\right)_{S,m} dV + \left(\frac{dU}{dm}\right)_{S,V} dm$$

ou, de forma abreviada:

$$dU = T dS + p dV + \mu dm.$$

Sejam duas regiões do sistema, A e B, em contato e em equilíbrio. Logo,

$$dU = dU_A + dU_B = 0$$

$$dS = dS_A + dS_B = 0$$

$$dV = dV_A + dV_B = 0,$$

donde

$$T_A dS_A + p_A dV_A + \mu_A dm_A + T_B dS_B + p_B dV_B + \mu_B dm_B = 0$$

ou

$$(T_B - T_A) dS_B + (p_B - p_A) dV_B + (\mu_B - \mu_A) dm_B = 0$$

O POTENCIAL QUÍMICO E SEU ENSINO

Considerando que os valores de S , V e m admitem variações infinitesimais em torno do valor de equilíbrio, então dX ($X = S$, V ou m) não são nulos, de modo que a expressão acima só se anula quando

$$T_B = T_A,$$

$$p_B = p_A$$

$$\mu_B = \mu_A$$

Essas igualdades expressam as condições de equilíbrio térmico, equilíbrio mecânico e equilíbrio relativo à transferência de substância no interior do sistema. A grandeza μ , definida pela razão

$$\mu = \left(\frac{dU}{dm} \right)_{S,V},$$

foi denominada por Gibbs como o potencial da substância componente do sistema considerado e expressa a condição de equilíbrio relativo à transferência de substância pelo fato de que “o potencial para cada substância componente do sistema deve ser constante ao longo de toda a massa” (GIBBS, 1876, p. 119). Ou seja: o potencial da substância surge como uma propriedade intensiva do sistema.

Caso o sistema unicomponente seja descrito como um conjunto de regiões em contato e em equilíbrio, então

$$\mu_A = \mu_B = \mu_C = \dots$$

Caso o sistema possua vários componentes distribuídos por várias regiões em equilíbrio, haverá um conjunto de igualdades similares à anterior, cada um correspondendo a um componente. Para o componente k , temos:

$$\mu_{k,A} = \mu_{k,B} = \mu_{k,C} = \dots$$

A análise e os resultados apresentados acima não se alteram no caso das regiões de o sistema considerado estar em fases diferentes, ou seja, se o sistema for heterogêneo.

Em suma, a igualdade do potencial de cada substância em cada região do sistema é o critério de equilíbrio relativo à transferência de substância de uma região a outra do sistema. Analogamente, a igualdade da temperatura e da pressão nas diversas regiões do sistema são os critérios de equilíbrio térmico e mecânico, respectivamente, que se referem às transferências de energia (calor) e de volume entre as regiões. Nesse ponto, reencontramos a conceituação analógica do potencial elaborada por Maxwell.

Portanto, caso os valores de potenciais de dada substância se apresentem diferentes em duas (ou mais) regiões do sistema, teremos uma situação de desequilíbrio e a possibilidade de migração dessa substância entre as regiões em desequilíbrio até que a igualdade dos potenciais se estabeleça.

No seguimento do artigo, Gibbs (1876, p. 144) expande a definição do potencial, a qual pode ser realizada em termos de várias grandezas termodinâmicas, de acordo com os vínculos estabelecidos:

$$\mu_k = \left(\frac{dU}{dm_k} \right)_{S,V,m_{i \neq k}} = \left(\frac{dH}{dm_k} \right)_{S,p,m_{i \neq k}} = \left(\frac{dA}{dm_k} \right)_{T,V,m_{i \neq k}} = \left(\frac{dG}{dm_k} \right)_{T,p,m_{i \neq k}}.$$

Atualmente define-se o potencial (químico) em termos da quantidade de substância em lugar da massa. Como há proporcionalidade entre essas grandezas, tal fato não alterou o conceito, mas apenas, o valor do potencial e suas unidades, que passaram a ser Joule por mol.

Notemos que, ao longo do artigo, não se encontra a expressão atual, potencial químico, mas apenas, potencial. No intuito de evitar confusão com outros tipos de potencial, Gibbs (1976, p. 206) propõe o emprego da expressão “potencial intrínseco”, quando necessário.

Wilder Dwight Bancroft (1896) parece ter sido quem primeiro anexou o adjetivo químico ao termo potencial (BAIERLEIN, 2000), fato que se deu no título do artigo *The Chemical Potential of the Metals*, publicado nos *Proceedings of American Academy of Arts and Science*, embora tenha sido apresentado àquela instituição em 1894.

O potencial químico aparece apenas no título, ao passo que a expressão diferença de potencial é frequente no texto. Portanto, Bancroft não justifica claramente a adjetivação do potencial. Ao comentar a correspondência trocada entre Bancroft e Gibbs, Baierlein (2000) revela que, em nenhum momento, houve tal justificativa: Bancroft empregava a expressão de modo casual, como se fosse algo familiar ao seu interlocutor.

Em outro artigo, Bancroft (1903) emprega a expressão potencial químico várias vezes no texto, embora também utilize potencial intrínseco e potencial com o mesmo significado.

Parece-nos razoável supor que Bancroft tenha seguido a tradição de nomear os potenciais de acordo com o tipo de processo a que se refere: potencial gravitacional para processos gravitacionais, potencial elétrico para processos elétricos e potencial químico para processos químicos. A expressão potencial intrínseco, proposta de Gibbs, sugere uma propriedade da substância, e não do espaço, como nos demais casos citados.

O fato é que Gibbs criou uma nova categoria de potencial, e Bancroft contribuiu para formular a expressão pela qual se tornou conhecido.

5 SOBRE O ENSINO DO CONCEITO DO POTENCIAL QUÍMICO

Nossas experiências enquanto estudante e professor de Termodinâmica Química confirmam as afirmativas dos estudantes de que o conceito de potencial químico é de entendimento difícil. Porém, discordamos que tais dificuldades sejam devidas à imprecisão ou vagueza do conceito, conforme proposto por Baierlein (2000). Nossa hipótese, conforme enunciado acima, é que a falta de informações durante o ensino acerca de: (a) o problema que deu origem ao conceito; (b) o seu desenvolvimento e (c) o sistema conceitual de que faz parte não facilitam sua compreensão pelos estudantes.

No nosso entendimento, em vista da discussão precedente, o potencial químico possui um conceito muito claro: é uma grandeza termodinâmica — já que é expressa em termos de outras grandezas termodinâmicas — que funciona como critério de equilíbrio e desequilíbrio em processos químicos de transferência de substância entre as diferentes regiões de um sistema, a exemplo de dissolução, difusão etc.

Há que se considerar a necessidade de os estudantes terem conhecimentos prévios ao ensino de potencial químico, quais sejam: as leis da Termodinâmica, incluindo o formalismo das funções termodinâmicas relacionadas. É, principalmente, preciso reconhecer os casos de equilíbrio térmico e mecânico como casos de uma lei mais geral: todo equilíbrio pode ser definido por uma igualdade de propriedades intensivas do sistema, pois é essa lei que fundamenta a analogia de Maxwell e possibilita compreender o potencial químico como uma “norma de equilíbrio nos sistemas abertos”, como diria Dirzo (1991, p. 99).

Cumpridas as condições apresentadas, o ensino do potencial químico pode ser iniciado pela apresentação do problema: dado um sistema composto de várias substâncias e diversas fases, como caracterizar seu estado de equilíbrio relativo à distribuição das substâncias por toda a sua extensão? Então, realiza-se a análise apresentada acima, estabelecendo-se o critério de equilíbrio químico em sistema homogêneo unicomponente, depois estendendo-o para sistemas multicomponentes e heterogêneos e sob diversas

restrições: entropia e volume constantes, temperatura e pressão constantes etc. Desse modo, as diversas definições formais do potencial químico serão introduzidas e será possível demonstrar a igualdade:

$$\mu_1 = \left(\frac{dU}{dn_k} \right)_{S,V,n_{i \neq k}} = \left(\frac{dH}{dn_k} \right)_{S,p,n_{i \neq k}} = \left(\frac{dA}{dn_k} \right)_{T,V,n_{i \neq k}} = \left(\frac{dG}{dn_k} \right)_{T,p,n_{i \neq k}}$$

A explicação para a denominação da grandeza cujos valores servem como critério de equilíbrio ou desequilíbrio de um sistema pode ser realizada como uma versão da história contada a partir de Green (1828) e passando por Maxwell (1873), Gibbs (1961) e Bancroft (1896; 1903):

Em resumo, o potencial surgiu com Green como a denominação de uma função matemática a partir da qual se podem obter as forças que agem sobre um ponto material localizado no espaço, provocadas pelos corpos vizinhos ao ponto considerado.

Maxwell identificou a função potencial (elétrico) com uma grandeza física, cujo valor em dado ponto no espaço resulta do efeito de partículas eletrificadas agindo sobre esse ponto.

Maxwell demonstrou que o potencial elétrico pode ser empregado como critério de equilíbrio ou desequilíbrio elétrico, ou seja, a igualdade dos valores de potencial elétrico em dois pontos do espaço indica o equilíbrio elétrico entre esses dois pontos; a diferença de potencial indica um desequilíbrio elétrico e é condição para a transferência de eletricidade entre os dois pontos.

Gibbs reconheceu a existência de uma grandeza que pode ser empregada como critério de equilíbrio ou desequilíbrio em processos de transferência de substância entre dois pontos do espaço e/ou entre fases e a denominou potencial. Em outras palavras, a igualdade dos valores potencial para um dado componente no interior de um sistema indica o equilíbrio relativo ao processo de transferência de substância de um ponto a outro do espaço; a diferença de potencial para um dado componente no interior de um sistema indica um desequilíbrio e é condição para a transferência de substância entre os dois pontos.

Bancroft criou a expressão potencial químico em substituição ao termo potencial intrínseco, empregado por Gibbs.

A comparação entre os critérios de equilíbrio resultantes da análise — temperatura, pressão e potencial químico — serve de base para a compreensão da analogia elaborada por Maxwell (1873): que o potencial químico, relacionado ao processo de transferência de substâncias entre pontos do espaço, funciona analogamente à temperatura, relacionada ao processo de transferência de entropia (e energia) entre pontos do espaço; à pressão hidrostática, relacionada ao processo de transferência de volumes de fluido entre pontos do espaço; e ao potencial elétrico, associado ao processo de transferência de eletricidade entre pontos do espaço. Em todos os casos, as grandezas consideradas como critérios de equilíbrio e desequilíbrio — potencial químico, temperatura, pressão hidrostática, potencial elétrico — são propriedades intensivas, e as grandezas transferidas são propriedades extensivas.

Portanto, não nos parece que o conceito de potencial químico possua natureza múltipla, como: “tendência à difusão” — ou “tendência à mudança” (JOB; HERMANN, p.

353) — “taxa de mudança” e “energia característica” (BAIERLEIN, 2000, p. 423). Consideramos inadequado atribuir “tendência” a uma propriedade de um sistema não vivo, posto que o termo sugere um animismo inexistente e pode ser fonte de entendimentos equivocados.

Por outro lado, a expressão “taxa de mudança” possui significado muito vago e pode ser empregado em relação a qualquer grandeza que possa ser expressa por uma razão. Por isso, é um termo cujo conceito inclui o potencial químico, mas não serve para discriminá-lo de outras grandezas termodinâmicas.

Quanto a “energia característica”, também é um termo de amplo significado, pois se refere a qualquer grandeza cujas unidades sejam energia por massa ou por quantidade de substância. É, ainda, um termo cujo conceito inclui o potencial químico, mas não o discrimina entre outras grandezas.

Tanto a taxa de mudança quanto a energia característica derivam diretamente das expressões formais do potencial químico, ou seja, estão incluídos na sua definição formal.

Dirzo (1991) argumenta que parte do problema do ensino está na sua demasiada simplificação. Robilota (1991) sugere que o ensino científico não explicita as complexidades dos conteúdos. Ora, como os processos para os quais o potencial químico serve como critério de equilíbrio são familiares dos estudantes — misturas de substâncias, dissolução, mudanças de fase etc. — a complexidade parece-nos estar associada à formulação do conceito, que pode ser discutida sob, ao menos, dois aspectos: técnico e psicológico.

Os conceitos e as técnicas relativas à formulação matemática da Termodinâmica, em geral, e do potencial químico, em particular, devem ser abordados, preferencialmente, antes do ensino do conceito de potencial químico e serem considerados como requisito. A falta de domínio técnico do formalismo termodinâmico pelos estudantes é uma queixa recorrente entre docentes.

Entre as dificuldades de ordem psicológica, discutiremos um aspecto que costuma ser citado: a alta abstração do conceito de potencial químico. Para tanto, basear-nos-emos na seguinte afirmação de Gould e Tobochnik (2009, p. 356, tradução nossa): “Embora o potencial químico exerça um papel análogo à temperatura e à pressão, entender a natureza do potencial químico é mais difícil”.

Começemos apreciando a natureza da temperatura ao longo da dimensão concreto/abstrato. A temperatura se refere às sensações de quentura e frieza. De fato, é um conceito criado para estabelecer a continuidade entre essas duas sensações de modo gradativo (não é à toa que se utiliza o grau como sua unidade anterior ao SI): na passagem das temperaturas baixas para as temperaturas altas, passa-se da sensação de frieza para a de quentura ou, simplesmente, do frio para o quente e vice-versa.

A relação estabelecida entre a grandeza abstrata inventada e as sensações concretas faz com que se perceba o abstrato como se fosse concreto. Ou seja, tomam-se as sensações como exemplares do conceito, o que é falso, pois nem quente nem frio são sinônimos de temperatura. Porém, uma vez que tal ato não cria dificuldades de comunicação nem desconforto psicológico, isso costuma passar despercebido.

Também contribui para a percepção da natureza concreta da temperatura a existência de medidores empíricos dos seus valores estabelecidos por convenção. Os instrumentos materiais e as medidas que realizam são percebidas como concretos, pois estão relacionadas a experiências dos sentidos, de modo similar às sensações de quente e frio. Entretanto, cumpre notar que nenhum aparelho mede diretamente a temperatura, mas sim volume de líquido ou diferença de potencial elétrico ou outra propriedade que possa ser teoricamente correlacionada com a temperatura.

Consideremos agora a natureza do potencial químico ao longo da mesma dimensão concreto/abstrato. Os estados de distribuição de substâncias em um sistema, aos quais o potencial químico se refere, não são sensíveis. Os processos de transferência de

substância também não são sensíveis, em geral, exceto nos poucos casos em que podem ser visualizados ou percebidos por mudanças em aspectos sensíveis do sistema (cor, temperatura, volume etc.). Por isso, torna-se difícil para o estudante atribuir concretude ao conceito de potencial químico de modo análogo ao que se faz com a temperatura: confundindo o conceito com os estados sensíveis aos quais se refere.

Ademais, não há instrumento que possibilite medir os valores do potencial químico direta ou indiretamente, ao contrário da temperatura e de outras propriedades — pH, corrente elétrica etc. Em nosso entender, a dificuldade básica que impede a invenção de um potenciômetro químico é que o potencial químico é definido por meio de grandezas termodinâmicas que não são diretamente mensuráveis. Desse modo, ficamos sem o medidor e a medida empírica do potencial químico e, portanto, sem meios para lhe atribuir alguma concretude.

Em resumo: sem uma associação com aspectos empírico-sensoriais, o potencial químico parece-nos mais abstrato que a temperatura.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo pretendeu esclarecer o conceito de potencial químico e, desse modo, responder às críticas mais frequentes que se faz ao seu ensino. Para tanto, analisamos como o conceito se originou, tanto na Física quanto na Química e correlacionamos, em termos gerais, o conceito de potencial químico aos demais conceitos de potencial e seus análogos empregados na Física.

Nossa análise mostrou um conceito claro, preciso e de alta abstração, cuja aprendizagem exige estudantes que se disponham a ampliar sua compreensão acerca de como são formulados os conceitos, em termos gerais, e os conceitos termodinâmicos, em particular.

Entendemos que o potencial químico pode ser ensinado de modo claro, com base na história do desenvolvimento do conceito de potencial, sem esconder os problemas de compreensão que podem ocorrer. Para tanto, o Ensino de Química não pode deixar de lado a discussão acerca da natureza abstrata dos conceitos, além da distinção entre conceito e fenômeno.

REFERÊNCIAS

- BAIERLEIN, R. The elusive chemical potential. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 4, p. 423-434, abril 2001.
- BANCROFT, W. D. Chemical Potential and Electromotive Force. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 7, n. 6, p. 416–427, 1903.
- BANCROFT, W. D. The Chemical Potential of Metals. **Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences**, v. 31, p. 96-122, May, 1895 - May, 1896.
- BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 2002.
- CAMPOS, A. **Notas para a Recordação do Meu Mestre Caeiro (algumas delas)**. In: ARQUIVO PESSOA. Lisboa: Obra Aberta, 2008. Disponível em: <<http://arquivopessoa.net/textos/683>>. Acesso em: 23 ago. 2017.
- COOK, G; DICKERSON, R. H. Understanding the Chemical Potential. **American Journal of Physics**, v. 63, n. 8, p. 737-742, ago. 1995.
- DIRZO, R. S. Um conceito “mágico” em termodinâmica: el potencial químico. **Educación Química**, v. 2, n. 2, p. 94-99, abr. 1991.
- ECO, U. **Tratado Geral de Semiótica**. 3. Ed. São Paulo: Perspectiva, 2000.

- FERREIRA, A. B. H. **Novo Aurélio Século XXI**: o dicionário da língua portuguesa. 3. ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1999.
- GIBBS, J. W. On the Equilibrium of Heterogeneous Substances. Transactions of the Connecticut Academy, III. p. 108-248, Oct. 1875 -May 1876; p. 343-524, may, 1877 - July, 1876. In: GIBBS, J. W. **The Scientific Papers of J. Willard Gibbs**. Vol I. Thermodynamics New York: Dover. 1961.
- GOULD, H.; TOBOCHNIK, J. **Statistical and Thermal Physics**: with Computer Applications. Princeton University Press, 2009.
- GREEN, G. **An Essay on the Application of Mathematical Analysis to the Theories of Electricity and Magnetism**. Nottingham: [Printed for the author, by T. Wheelhouse], 1828. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/0807.0088.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2017.
- GURALNIK, D. B. (Ed.) **Webster's New World Dictionary of the American Language**. New York: Willian Collins, 1975. (Pocketsize edition).
- HARDY-VALLÉE, B. **O Que É Um Conceito?** São Paulo: Parábola, 2013.
- HOUAISS, A; VILLAR, M. S. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2001.
- JOB, G.; HERRMANN, F. Chemical potential – a quantity in search of recognition. **European Journal of Physics**, v. 27, p. 353-371, 2006.
- LEWIS, G. N.; RANDALL, M. **Thermodynamics and the free energy of chemical substances**. New York: McGraw-Hill, 1923.
- LOPES, A. R. C. Livros didáticos: obstáculos ao aprendizado da ciência química. I - Obstáculos animistas e realistas. **Química Nova**, v. 15, n. 3, p. 254-261, 1991.
- LURIA, A. R. **Curso de Psicologia Geral**. 2. ed. Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1991.
- MAXWELL, J. C. **A Treatise of Electricity and Magnetism**. London: MacMillan, 1873. v. I. Disponível em: <<http://www.aproged.pt/biblioteca/MaxwellI.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- PIMENTEL, A. O método da análise documental: seu uso numa pesquisa historiográfica. **Cadernos de Pesquisa**, n. 114, p. 179-195, nov. 2001.
- PURRINGTON, R. D. **Physics in the Nineteenth Century**. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997.
- ROBILOTTA, M. R. O Cinza, o Branco e o Preto – da relevância da História da Ciência no ensino da Física. **Caderno Catarinense do Ensino de Física**, v. 5 (número especial), p. 7-22, jun. 1988.
- SANTOS, M. E. B. C. A relação entre ato e potência na Metafísica de Aristóteles. **Revista Húmus**, v. 3, n. 7, p. 111-121, 2013.
- SÖZBILIR, M. What makes Physical Chemistry difficult? Perceptions of Turkish Chemistry Undergraduates and Lecturers. **Journal of Chemical Education**, v. 81, n. 4, p. 573-578, 2004.
- TSAPARLIS, G. The logical and psychological structure of physical chemistry and its relevance to the organization/sequencing of the major areas covered in physical chemistry textbooks. **Chemical Education Research and Practice**, v. 15, n. 3, p. 391-401, 2014.
- TSAPARLIS, G.; FINLAYSON, O. Physical Chemistry Education: its multiple facets and aspects. **Chemical Education Research and Practice**, v. 15, n. 3, p. 257-265, 2014.
- VIGOTSKI, L. S. **A Construção do Pensamento e da Linguagem**. 2. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2009.

WHITTAKER, E. T. **A History of the Theories of Aether and Electricity** – from the Age of Descartes to the Close of the Nineteenth Century. Dublin: Dublin University Press, 1910.