

ANDRÉ LUIS MARTINS

Estudo e Aplicação do Referencial Bachelardiano de Obstáculos
Epistemológicos no Ensino de Sistemas Químicos Oscilantes

Dissertação apresentada ao Instituto de
Química de São Carlos da Universidade de
São Paulo como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Físico-Química

Orientador: Prof. Dr. Antônio Aprígio da
Silva Curvelo

São Carlos, 2013

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. Autorizo também a reprodução total ou parcial, via impressão ou fotocópia.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo, seus funcionários e professores, pela infra-estrutura sempre disponível para a realização desta pesquisa e deste mestrado. Em especial ao Instituto de Química de São Carlos, seus funcionários e professores, pela infraestrutura e pelo pessoal, que tiveram sempre atuação decisiva na minha formação acadêmica tanto da graduação quanto do mestrado.

Ao CNPq, seus funcionários e corpo técnico, pelo financiamento desta pesquisa e consequentemente da minha subsistência no período.

Aos professores Osvaldo pessoa Jr., da FFLCH – USP, e Josep Bonil, da Universidade Autônoma de Barcelona, pelo apoio e pelas valiosas críticas e sugestões em diversos momentos.

Agradecimentos mais do que especiais também ao meu orientador, Aprígio, pela amizade, pelo ambiente saudável em grupo, pela paciência comigo, pelas risadas e pelas broncas, mas principalmente pelo exemplo pessoal e profissional que sempre levarei comigo enquanto ideal.

Ao pessoal do grupo de pesquisa em ensino de ciências do grupo de físico-química orgânica, incluso aqueles que já não fazem mais parte do grupo, Jonathan, Sato e Renata pelo companheirismo e ajuda em todo o processo. Agradecimentos especiais também para Rafael Cava Mori, meu mestre Myage, pelas sugestões, pela sua disciplina que sempre idealizei ter para mim, e pelo seu solidário compartilhamento de sabedorias na área de ensino de química;

À minha família, pelos incontáveis momentos de apoio.

Aos amigos, pela paciência com meu mau humor e ausências durante o mestrado.

*“A natureza, querendo na verdade fazer a química,
acabou por criar o químico”*
Gastón Bachelard

RESUMO

MARTINS, A. L. Estudo e Aplicação do Referencial Bachelardiano de Obstáculos Epistemológicos no Ensino de Sistemas Químicos Oscilantes. 2013. 66 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O estudo e observação de Sistemas Químicos Oscilantes vêm se destacando como importante campo de pesquisa da ciência química contemporânea. Tais sistemas têm como comportamento notório principal a variação periódica da concentração de um intermediário de reação química. Sua compreensão vem estimulando debates que transcendem o escopo químico e estabelecem relações com outras disciplinas científicas, e mais marcadamente, o estudo de sistemas complexos em geral. O ensino de sistemas químicos oscilantes, em específico, e de sistemas complexos, em geral, se apresenta na atualidade como desafio necessário e estimulante. Neste trabalho optou-se por tentar contribuir neste esforço, utilizando-se da noção de obstáculos epistemológicos inicialmente estabelecida pelo filósofo francês Gastón Bachelard. O conceito de obstáculos epistemológicos apresentou-se nas últimas décadas como importante ferramenta na abordagem das relações de ensino-aprendizagem de conceitos das ciências contemporâneas. Existem diferentes tipos de obstáculos epistemológicos, entre eles: experiência primeira, conhecimento geral, obstáculo verbal, conhecimento unitário e pragmático e obstáculo animista. Neste trabalho surge a proposta de utilizar a noção de obstáculo epistemológico voltada ao ensino de conceitos da complexidade pertinentes aos Sistemas Químicos Oscilantes. Foram analisadas as presenças de obstáculos epistemológicos em textos didáticos de ensino de sistemas químicos oscilantes. Os textos didáticos escolhidos foram artigos científicos da área de ensino de química voltados ao ensino de sistemas químicos oscilantes, livros didáticos usados em cursos de graduação e livros de divulgação científica. Foram analisados os conteúdos integrais de sete artigos científicos da área de ensino de química voltados ao tema reações químicas oscilantes. Foram também analisadas as seções referentes a reações químicas oscilantes de quatro livros didáticos utilizados em cursos de graduação da USP devotadas ao ensino de sistemas caóticos. Foram também analisadas as seções referentes a reações químicas oscilantes de quatro livros de divulgação científica que abordaram o tema sistemas químicos oscilantes. Foram encontrados grande número de obstáculos da experiência primeira e obstáculos animistas em livros didáticos e um grande número de obstáculos verbais em livros de divulgação científica. Todos os tipos de obstáculos epistemológicos listados foram identificados ao menos uma vez em algum dos textos. Demonstrou-se a viabilidade de aplicação do conceito de obstáculos epistemológicos em textos didáticos de ensino de sistemas químicos oscilantes.

ABSTRACT

MARTINS, A. L. Study and Application of Referential Bachelardean of Epistemological Obstacles to Teaching Oscillating Chemical Systems. 2013. 66 p. Dissertation (Master's degree in Science)-Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

The study and observation of Oscillating Chemical Systems have been highlighted as an important research field of chemical science contemporary. Such systems are notorious behavior as the main periodic variation of the concentration of an intermediate chemical reaction. Your understanding is stimulating debates that transcend the scope of chemical and establish relationships with other scientific disciplines, and most notably, the study of complex systems in general. The teaching of chemical oscillating systems, in particular, and complex systems in general, is presented nowadays as necessary and stimulating challenge. In this work it was decided to try to contribute in this effort, using the notion of epistemological obstacles initially established by the philosopher Gaston Bachelard. The concept of epistemological obstacle presented itself in recent decades as an important tool in addressing the relationships of teaching and learning of contemporary science concepts. There are different kinds of epistemological obstacles, among them: first experience, geral knowledge, verbal obstacle, pragmatic and unitary knowledge and animist obstacle . This work comes propose to use the notion of epistemological obstacle to teach the complexity of concepts relevant to oscillating chemical system .We analyzed the presence of epistemological obstacles in textbooks that have teaching oscillating chemical systems. The selected texts were scientific articles in the area of chemical education aimed at teaching oscillating chemical systems, books used in undergraduate and some popular science books. We analyzed the entire contents of seven papers in the area of chemical education geared to the theme oscillating chemical reactions. We also analyzed the sections pertaining to oscillating chemical reactions of four textbooks used in undergraduate courses devoted to teaching the chaotic systems at USP . We also analyzed the sections pertaining to oscillating chemical reactions of four popular science books that addressed the issue of oscillating chemical systems. We found many first experiences and animists obstacles in textbooks and a large number of verbal obstacles in popular science books. All kinds of epistemological obstacles identified were listed at least once at some of the texts. The results confirm the feasibility of applying the concept of epistemological obstacles in textbooks teaching oscillating chemical systems.

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	9
CAPÍTULO 1 – SISTEMAS QUÍMICOS OSCILANTES (S.Q.O)	11
1.1 HISTÓRICO	11
1.2 TIPOS DE OSCILADORES	12
1.3 OSCILADORES QUÍMICOS E COMPLEXIDADE	13
1.4 AS ESTRUTURAS DISSIPATIVAS.....	14
CAPITULO 2 – ALGUNS ASPECTOS SOBRE A COMPLEXIDADE	17
2.1 CAOS, ORDEM, ORGANIZAÇÃO E COMPLEXIDADE	17
2.2 SISTEMAS COMPLEXOS E AS RELAÇÕES DE ENSINO-APRENDIZAGEM	20
CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL EPISTEMOLÓGICO	
BACHELARDIANO	30
3.1 VIDA E OBRA.....	30
3.2 ASPECTOS DA EPISTEMOLOGIA BACHELARDIANA.....	31
3.3 OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS.....	36
CAPÍTULO 4 - OS OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS NO ENSINO	
DE REAÇÕES QUÍMICAS OSCILANTES.....	42
4.1 APONTAMENTOS HISTÓRICOS	42
4.2 ANÁLISE DE TEXTOS DIDÁTICOS	44
4.2.1 METODOLOGIA EMPREGADA	45
4.2.2 ARTIGOS CIENTÍFICOS DA ÁREA DE ENSINO	46
4.2.3 LIVROS DIDÁTICOS	56
4.2.4 LIVROS DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA	57
CAPITULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	61

CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Este trabalho é fruto de cerca de dois anos de investigação acerca da questão da complexidade e suas implicações para a educação. Cabe aqui, portanto, detalhar um pouco da história envolvida na construção deste projeto de pesquisa.

A questão dos sistemas complexos me foi apresentada logo no segundo ano do bacharelado em química, quando comecei minha iniciação científica no laboratório de eletroquímica, pesquisando as instabilidades temporais na eletrooxidação de metanol sobre platina. Naturalmente, fui tomando conhecimento dos inúmeros fenômenos e conceitos pertinentes à chamada teoria do caos, dos sistemas dissipativos e dos sistemas químicos oscilantes. Durante dois anos trabalhei dentro dessa linha de pesquisa, e foi nesse período que provavelmente passei a ler o mundo como a emergência de fenômenos interdependentes.

Por mais rica e interessante que fosse essa temática, resolvi não seguir meus estudos de pós-graduação nessa linha. Como trabalho de conclusão de curso, minha monografia foi um trabalho misto – para não dizer esquizofrênico – de pesquisa na qual busquei entender melhor a questão da complexidade e de suas conseqüências para o saber científico. Foi então que tive contato com o campo da epistemologia, e foi aí que percebi o imenso potencial investigativo da questão da complexidade. Afastei-me da pesquisa laboratorial dos sistemas químicos oscilantes e mergulhei cada vez mais nesse caminho sem volta das reflexões de natureza epistemológica. Neste período, a questão da complexidade dos fenômenos deu lugar à questão da possibilidade da compreensão da complexidade, e minha antiga visão realista ingênua dos fenômenos deu lugar ao questionamento da possibilidade de compreendê-los. Neste ponto me aproximei bastante das visões filosóficas que defendem uma reformulação do fazer pedagógico de modo a levar em conta a complexidade da natureza em todos os seus níveis e dimensões, inclusos aí os atos de aprender e ensinar o mundo.

Surge então a decisão de desenvolver um trabalho no qual a complexidade dos fenômenos recebesse a aplicação de uma epistemologia voltada ao ensino de química. Em outras palavras, me pareceu que a maioria das grandes questões e problemáticas do mundo atual se apresenta como uma teia complexa de fatores inter-relacionados, e que a possibilidade da sua resolução - da qual eu acredito, dependerá o futuro da nossa espécie – se dará na medida em que se desenvolva a capacidade que os indivíduos têm em compreender e agir perante essa complexidade. Em termo práticos, minha motivação foi contribuir para o discussão de como poderíamos ensinar a Complexidade para os futuros químicos.

Passei a me debruçar na seguinte problemática: como poderei, eu, recém bacharel em química, contribuir para a emergência deste pensar complexo. Passado certo período de crises e reflexões sucessivas, cheguei a conclusão de que o mais acertado seria agir localmente, mas dentro de uma perspectiva global. Traduzindo este imperativo para a minha realidade material, defini que seria útil ao ensino de química construir reflexões pedagógicas acerca da complexidade dos fenômenos da química contemporânea e de suas implicações e relações com outras disciplinas e áreas do conhecimento. Este é, portanto, o norte deste trabalho. Grosso modo, nosso desejo é ensinar a complexidade por meio do ensino de sistemas químicos oscilantes, para além da riqueza de conhecimentos já intrínseca ao próprio estudo desses sistemas.

Partindo da suposição de que o comportamento complexo manifesta-se em todos os diferentes níveis e dimensões da realidade, acredita-se que estejamos não só contribuindo para o ensino dos conceitos científicos contemporâneos dos sistemas químicos oscilantes, mas também indiretamente fazendo corpo a um movimento pedagógico de imersão da percepção da complexidade na formação educacional. Posto isso, nos dedicamos a estabelecer uma ferramenta de base epistemológica que fosse útil ao correto ensino dos sistemas químicos oscilantes. E este é finalmente o cerne do trabalho.

CAPÍTULO 1 – SISTEMAS QUÍMICOS OSCILANTES (S.Q.O)

Neste capítulo ênfase será dada a uma definição do conteúdo a que se deseja analisar no presente trabalho, quer seja, os Sistemas Químicos Oscilantes (S.Q.O.). Buscaremos primeiramente um apanhado histórico das primeiras observações deste fenômeno, para em seguida buscar definir os tipos de fenômenos que atualmente assim são nomeados.

1.1 HISTÓRICO

De acordo com Epstein (2006) os primeiros relatos sobre oscilações em sistemas químicos foram feitos por Fechner em 1828 - para reações em fase gasosa – e por Ostwald em 1899 – para reações em fase líquida. Entretanto, durante todo o século XIX e boa parte do século seguinte era impensável afirmar a possibilidade de ocorrência de qualquer tipo de oscilações durante reações homogêneas, e sendo assim o próprio conceito de sistemas químicos oscilantes não pode ser aplicado a este contexto.

Foi só em trabalho teórico de A. J. Lotka (1910) que primeiramente fenômenos periódicos observados durante certas reações químicas passaram a ser interpretados como processos oscilatórios. Neste caso, oscilações das concentrações das espécies intermediárias foram observadas e foi atestado que o processo oscilatório se dava apenas como resultado da cinética química em sistemas reconhecidamente homogêneos.

Posteriormente, trabalho experimental de Bray (1921) investigou a relação entre a decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio e seu papel dual como agente redutor e oxidante na reação com o iodo. É aí então que surge talvez o primeiro exemplo de reações oscilatórias em sistemas homogêneos. Bray reconheceu a relação entre o seu trabalho e o de A. J. Lotka, mas reconheceu também que seu sistema experimental possuísse como complicador o desprendimento de oxigênio. Estas descobertas não receberam muita atenção da comunidade científica por quase 40 anos.

Para Epstein (2006) pode-se apontar algumas razões para essa baixa divulgação, como por exemplo, o baixo nível de desenvolvimento na época de métodos teóricos e experimentais que pudessem desvendar os mecanismos de reações químicas complexas. Um outro ponto segundo Epstein é que havia na época uma concepção amplamente aceita de que oscilações deste tipo estariam violando a segunda lei da termodinâmica. Sobre este ponto nos deteremos mais profundamente adiante.

De volta à linha do tempo dos S.Q.O, vemos que de acordo com Zhabotinsky (1985) o início do estudo moderno das reações químicas oscilatórias em fase líquida se deu na Rússia em 1951 quando Boris Pavlovich Belousov, interessado no ciclo de Krebs, estudava uma reação de bromato e ácido cítrico em meio ácido com íons cério. Belousov esperava observar uma mudança na coloração da solução do amarelo (CeIV) para o incolor (CeIII). Mas inesperadamente a solução mudou do amarelo para o incolor por repetidas vezes. De acordo com Winfree (1984) Belousov só conseguiu publicar sua descoberta em 1958, e ainda assim, sua publicação foi vista por um número reduzido de pesquisadores na área. Passados alguns anos, Anatol M. Zhabotinsky deu continuidade ao trabalho do Belousov. A importância da contribuição destes dois pesquisadores é tamanha que este tipo de reações oscilantes são modernamente denominadas reações do tipo Belousov-Zhabotinsky, ou reações oscilantes do tipo BZ.

Em estudo teórico, Zhabotinsky estabeleceu o que já havia sido previsto por Lotka: todo e qualquer mecanismo que se proponha a explicar os fenômenos oscilatórios, deve conter equações que descrevam a existência de autocatálise. Posteriormente, Noyes e colaboradores (1972) mostraram que apenas autocatálise não é suficiente para explicar oscilações, sendo necessário portanto a existência de pelo menos dois ciclos de retroalimentação, onde em um dos ciclos ocorre autocatálise e em outro ciclo uma reação de inibição.

1.2 TIPOS DE OSCILADORES

Segundo Faria (1995), entre os vários sistemas químicos oscilatórios do tipo BZ, citam-se os que utilizam como catalisador, além do Ce (III)/Ce (IV), os pares de manganês Mn(II)/Mn(III); ferro Fe(II)/Fe(III); rutênio Ru(II)/Ru(III); cromo Cr(II)/Cr(III) e cobalto Co(II)/Co(III), sendo os quatro últimos geralmente complexados. Adicionalmente, oscilações foram também observadas em sistemas sem quaisquer íons metálicos, sistemas esses chamados genericamente de não catalisados, sendo que o primeiro a ser descoberto utiliza o ácido gálico (ácido 3,4,5-triidroxibenzóico) como substrato orgânico.

A grande energia livre de Gibbs associada à oxidação de ácido malônico por bromato acidificado é a força motriz da reação. Em termos cinéticos, entretanto, essa reação é bastante lenta e precisa ser catalisada pelo íon metálico. O mecanismo proposto originalmente por Field, Korös e Noyes (FKN) em 1972 tem sido bastante utilizado como modelo básico da reação de BZ. Nesse mecanismo, bromato e ácido malônico são consumidos e ácido bromomalônico e CO₂ são produzidos. Oscilações resultam das variações periódicas nas

concentrações do ativador, HBrO_2 , que catalisa sua própria produção (gerando, portanto, um ciclo de retro-alimentação positiva), e do inibidor, Br^- , que regula o processo autocatalítico (retro-alimentação negativa). A geração de CO_2 em geral ocorre como um subproduto das reações do ácido bromomalônico.

Além dos experimentos em solução, auto-organização espaço-temporal também pode ser observada nas interfaces sólido/líquido e sólido/gás. Um dos exemplos mais notórios é o da oxidação de monóxido de carbono sobre platina, na interface sólido/gás. Sabe-se que a reação entre CO e O adsorvidos pode apresentar uma rica dinâmica em domínios temporal e espaço-temporal, sob algumas condições experimentais. Referida recentemente como “reação de Ertl”, em homenagem ao Prof. G. Ertl, laureado com o prêmio Nobel de Química em 2007, a oxidação de monóxido de carbono representa um importante exemplo de sistemas químicos oscilatórios que ao contrário das reações da família do bromo são de grande importância prática, uma vez que o monóxido de carbono atua frequentemente como um veneno em reações catalíticas de interesse tecnológico.

Por fim, um outro tipo ainda de sistemas químicos oscilatórios são os osciladores eletroquímicos. Também a título de exemplo, temos a reação de eletrooxidação de moléculas orgânicas pequenas. De acordo com Krischer Varela (2003) admite-se para este caso que mecanisticamente os ciclos de retroalimentação envolvidos na dinâmica oscilatória estão relacionados à interação entre as isotermas de adsorção dependentes do potencial das espécies bloqueantes que envenenam a reação de fundo.

1.3 OSCILADORES QUÍMICOS E COMPLEXIDADE

Do ponto de vista químico complexidade se manifesta, por exemplo, na forma de cinética reacional multi-estável e oscilatória, e de auto-organização dinâmica em condições afastadas do estado de equilíbrio termodinâmico. Whitesides e Ismagilov (1999) buscam formalizar o que seria um sistema complexo em química afirmando que:

“...um sistema complexo caracteriza-se como um sistema: a) cuja evolução é muito sensível às condições iniciais ou a pequenas perturbações; b) no qual o número de componentes interagindo é alto e c) compreende múltiplos caminhos pelo qual o sistema pode evoluir. Além disso, uma característica típica de tais sistemas é a necessidade de equações diferenciais não-lineares para sua descrição”.

O interesse no estudo de complexidade em sistemas químicos aumenta na medida em que sua complexidade está intimamente ligada a outros campos do conhecimento, como a biologia e a física. Além disso, sua compreensão pode mostrar-se ferramenta útil na elucidação e modelagem de outros fenômenos, tanto naturais quanto sociais. Whitesides e

Ismagilov apontam duas questões fundamentais, relativas à vida, que devem ser encaradas como centrais no desenvolvimento do estudo da complexidade pela química. Estas seriam: a) como um conjunto de moléculas pôde dar origem às variedades de comportamentos que caracterizam células e organismos e b) como moléculas individuais puderam ter a princípio se organizado em conjuntos que apresentam as características da vida (dissipação de energia, auto-replicação e adaptação). Concernentes a essa proposta, o estudo de sistemas químicos oscilatórios tem crescido.

No contexto especificamente da história da química, trabalho epistemológico de Isabelle Stengers estabelece o estudo de Fourier (1811) sobre a propagação de calor nos sólidos como marco do nascimento da complexidade enquanto um novo campo de possibilidades. Sua nova teoria era totalmente estranha ao mundo newtoniano, e sua aceitação provocou uma primeira cisão entre a física matemática e a ciência newtoniana. Seus resultados, apesar de rigorosos, sofreram severas críticas de Lagrange e Laplace, pois representavam uma ruptura matematicamente válida na hegemonia do mecanicismo newtoniano. Essa pequena brecha possibilitou o desenvolvimento no interior da ciência moderna de conceitos embrionários da complexidade.

O problema do rendimento dos motores térmicos introduz na física a noção de processo irreversível, e com Joule (1847), surge a formulação da conversão de energia. Na análise de Stengers, tais avanços implicam numa “nova convicção de natureza não como sistema ordenado, mas como eterna expansão de uma força produtora de efeitos antagônicos”. Seguem os estudos de Boltzmann interpretando crescimento irreversível da entropia como expressão do aumento da desordem molecular. Por fim, tais desdobramentos culminariam no desenvolvimento da termodinâmica das estruturas dissipativas, resultando num conceito de entropia como “... um indicador da evolução do sistema; algo que traduz a existência na física de uma flecha do tempo. Para todo sistema isolado, o futuro é a direção na qual a entropia aumenta.”, segundo Stengers. Com isso, fica abalado até mesmo o caráter absoluto da dimensão temporal na ciência clássica.

1.4 AS ESTRUTURAS DISSIPATIVAS

A termodinâmica clássica se aplica para sistemas “em equilíbrio”, nos quais as variáveis macroscópicas não se modificam com o tempo, e nos quais não há fluxos de matéria, calor, etc. Sistemas para os quais as variáveis macroscópicas são constantes em cada ponto, mas nos quais há um fluxo, são chamados de estacionários. Um cano no qual a água

flui com velocidade constante em cada ponto (escoamento laminar) está em um regime estacionário; se o escoamento se torna turbulento (a velocidade em cada ponto muda com o tempo), não é mais estacionário.

Na década de 1920, alguns cientistas passaram a se preocupar com a descrição termodinâmica de sistemas biológicos, e a constatação básica era de que tais sistemas são abertos. Sistemas vivos estão fora do equilíbrio, podendo, no máximo de simplificação, ser considerados estacionários.

Diversos físico-químicos trabalhavam na termodinâmica de estados estacionários irreversíveis, mas um resultado particularmente importante foi obtido por Prigogine, válido claramente para sistemas perto do equilíbrio (regime linear) e às vezes para sistemas longe do equilíbrio (regime não-linear). Sua abordagem partiu da definição de produção de entropia por unidade de tempo dS/dt . Enfocando o diferencial dS , Prigogine considerou que a variação de entropia em sistemas abertos é devida a dois fatores. Há uma produção interna de entropia dSi (ou seja, um aumento de entropia) devido a processos irreversíveis ocorrendo dentro do sistema, como a difusão, a condução térmica, reações químicas, etc. Haveria também um fluxo de entropia dSe devido a trocas de energia e matéria com o ambiente. A variação total de entropia é a soma dos dois termos: $dS = dSi + dSe$. Para um sistema isolado, $dSe = 0$, de forma que vale a segunda lei da termodinâmica: $dSi \geq 0$.

No estado de equilíbrio, $dSi = 0$. Para um sistema aberto no regime estacionário, não há variação de entropia, $dS = 0$. Ou seja, é possível contrabalançar o aumento interno de entropia de um sistema, mantendo-o em um estado ordenado, a partir de um fluxo suficientemente grande de “entropia negativa” $dSe \leq 0$. Provou então seu teorema de produção mínima de entropia: para sistemas lineares (próximos do equilíbrio), no estado de não-equilíbrio estacionário, a produção de entropia se torna mínima, compatível com as restrições impostas no sistema. Este resultado foi muito útil, ao aproximar a termodinâmica de sistemas próximos-do-equilíbrio da teoria clássica, tanto que Prigogine acabou recebendo o Prêmio Nobel de Química em 1977.

Com relação às perturbações de origem externa (variações nas condições ambientais) e às flutuações internas (devidas a interações moleculares e movimento térmico aleatório das partículas), Prigogine salientou que no regime linear o sistema tem estabilidade, ou seja, as perturbações e flutuações regridem. Em um sistema longe do equilíbrio, porém, isto nem sempre é verdade. Em um sistema instável, uma perturbação pode ser amplificada e levar o sistema para um novo estado ordenado. A isto Prigogine (1982) chamou de estruturas dissipativas. As principais características de um sistema dissipativo, de acordo com Prigogine

(1982) é que são sistemas termodinâmicos longe do equilíbrio, que contêm um grande número de elementos interagindo diretamente ou através de uma restrição do meio-ambiente e cujas interações entre os elementos são de natureza não-linear.

CAPITULO 2 – ALGUNS ASPECTOS SOBRE A COMPLEXIDADE

2.1 CAOS, ORDEM, ORGANIZAÇÃO E COMPLEXIDADE

Uma discussão sobre sistemas complexos passa por uma especulação sobre a organização de um sistema, que tem como questão de fundo a ordem geral da matéria.

O que é ordem? Arecchi (1986) afirma que os físicos em geral chamam um fenômeno de ordenado quando há regularidades no espaço, há regularidades temporais, e quando há padrões que permitem a descrição de um sistema complicado em termos de poucas variáveis. Uma visão histórica do desenvolvimento da visão do pensamento humano sobre a ordem do cosmos portanto é de interesse ao escopo deste trabalho.

Admite-se que os primeiros pensadores a desvincular a formação do Universo de visões mítico-religiosas sejam os filósofos gregos, em especial alguns dos que costumeiramente são classificados como pré-socráticos.

Os filósofos da escola de Mileto (séc. VI a.C.) foram os primeiros a talvez buscar um princípio material de todas as coisas. Ensinavam que todas as coisas se originavam da mesma matéria primordial, que seria o “princípio”, ou *arqué* em grego. Esse princípio seria também o fim de tudo, não havendo portanto surgimento ou desaparecimento absoluto do universo, mas apenas uma mudança dos aspectos qualitativos desse princípio. Tales, o primeiro a especular sobre esse princípio, afirmava, segundo alguns de maneira metafórica, ser a água a substância primordial. Já Anaxímenes, posterior a Tales, declarava o ar como princípio de tudo.

Talvez o mais interessante deles seja Anaximandro, anterior a Anaxímenes e que pode ter sido discípulo de Tales. Anaximandro usa o termo *ápeiron*, que pode ser traduzido como infinito, indefinido ou mesmo ilimitado. Com isso, ele introduz a idéia de uma substância não conhecida, provavelmente nem mesmo observável, sem qualidades, mas que pode assumir a aparência de todos os tipos de substâncias. Se este ilimitado for identificado como uma desordem primordial, teríamos ordem emergindo da desordem por um tempo limitado, ao final do qual a ordem se dissolveria novamente na desordem.

Já Parmênides de Eléia (480 a.C.) defendeu que qualquer mudança é impossível: “o que é não pode deixar de ser”. Essas idéias foram muito influentes, e estimularam diversas tentativas de explicação para as “aparentes” mudanças observadas na natureza. A maioria das soluções salientou que as substâncias não mudam, o que mudaria seriam seus graus de

ordenamento.

Um exemplo é Empédocles (445 a.C.), que será o primeiro dos filósofos gregos a apresentar a concepção dos quatro elementos materiais (terra, água, ar e fogo). Esses elementos são descritos como as “raízes” de tudo. A partir da união desses elementos em diferentes proporções é possível a formação de todas as coisas. Outra contribuição importante desse filósofo é o esboço de um conceito importante na complexidade, a Seleção. Empédocles imaginou a origem dos animais utilizando uma noção bem pitoresca de seleção natural. Inicialmente, diferentes partes de corpos de animais teriam se unido ao acaso. As combinações que funcionassem acabariam sobrevivendo, ao contrário das más combinações. Essa idéia de diferentes elementos se relacionando ao invés de um único princípio material será aproveitada pelo próximo movimento filosófico, a dos atomistas.

O atomismo grego se inicia com Leucipo de Mileto (435 a.C.) e Demócrito de Abdera (410 a.C.). Estes foram os primeiros a admitir a existência de um espaço vazio, ou vácuo, no qual se moveriam as partículas imutáveis – os átomos. Os infinitos átomos, movendo-se no espaço vazio e infinito, existiriam sempre, e pelas suas uniões ou separações formariam os incontáveis mundos possíveis. Assim eles resolvem o problema das transformações aparentes do universo, postulando que qualquer diferença que observamos no mundo seria devido a modificações na forma, arranjo e posição dos átomos. Os átomos rumariam aleatoriamente em todas as direções, formando agregados ao acaso.

O atomismo foi posteriormente desenvolvido por Epicuro de Samos (300 a. C.) e defendido por Lucrecio de Roma (90 a. C.). Epicuro postulou que os átomos teriam tamanho, partes e também massa. Imaginava que inicialmente os átomos desciam com a mesma velocidade no vácuo, todos paralelamente. Os objetos do mundo teriam se formado devido a um pequeno movimento aleatório lateral (“*clinamen*”), um movimento sem causa que explicaria a progressiva agregação da matéria.

Uma outra corrente, a dos geômetras, concebiam a existência de formas puras, como fazia Platão de Atenas (380 a.C.). De acordo com Martins (1994), para Platão as formas teriam uma existência autônoma, em um “mundo das idéias”. Platão via o mundo de maneira teleológica (finalista), pois haveria um “demiurgo”, uma espécie de artesão divino, que imporia ordem à matéria. Para Aristóteles de Estagira (340 a.C.), que de certa forma herdou a ênfase no finalismo, a causa final não estaria na esfera divina, mas sim na terrena. A forma de um objeto era criada por algo externo. Uma causalidade externa ao objeto. Com Platão e Aristóteles não há mais uma abordagem mecanicista para a origem da ordem, como se vê em Empédocles e nos atomistas, mas uma abordagem teleológica.

Em uma concepção mais contemporânea, Ashby (1962) defende que a organização de um sistema não é algo real, objetivo, mas depende da maneira pela qual o sujeito observa o sistema. Ele apresenta diferentes argumentos em favor desta tese. Seu primeiro argumento é que a organização de um sistema é dada pelas relações de causalidade ou de restrição entre os elementos. Ao estipular tais relações, imaginamos todos os estados possíveis das partes e determinamos qual é o efeito disso em um elemento em questão. Como na realidade, em um certo instante, o sistema está apenas em um desses estados, não todos, a realidade atual é diferente de uma lista de todas as possibilidades; a realidade é diferente da “organização”.

Além deste argumento, um segundo é o seguinte. Se a organização envolve um conjunto de possibilidades, então ela exprimiria também as incertezas do observador com relação a qual é o estado atual do sistema. Se as probabilidades subjetivas do observador mudarem, afirma Ashby, mudaria também a organização do sistema.

Um terceiro:- uma caixa preta é um sistema cujas partes (e seus estados) são desconhecidas. O observador tem acesso apenas aos estados do sistema como um todo. Naturalmente, é possível estudar uma caixa preta através de uma observação de seus estados e de como ele responde a estímulos. Ashby argumenta que dois observadores diferentes podem atribuir organizações diferentes a uma mesma caixa preta, o que provaria que a organização depende do estado do observador.

O quarto argumento de Ashby:- considere um sistema consistindo de dois pêndulos que oscilam de maneira independente. Tomaríamos cada elemento do sistema como sendo um dos pêndulos, e eles não imporiam restrições mútuas, de forma que a organização entre eles é nula. Se agora introduzirmos uma mola entre os pêndulos, teremos uma relação de condicionamento mútuo (um acoplamento) entre os elementos, ou seja, uma organização. Ora, para sistemas regidos por forças lineares como pêndulos simples e molas é possível encontrar movimentos que, uma vez iniciados, perdurariam para sempre se não fosse a dissipação de energia pelo atrito. No caso dos dois pêndulos acoplados simetricamente, um destes modos normais consiste dos dois pêndulos oscilando de forma idêntica, “em fase” ao passo que o outro modo normal consiste dos pêndulos oscilando “fora de fase”, sempre em sentidos opostos (neste caso a mola se estenderia e se contrairia de maneira periódica, mas os movimentos dos pêndulos individuais não se alteraria). Além disso qualquer movimento do pêndulo acoplado pode ser descrito como uma soma linear, constante no tempo, dos dois modos normais. Como o peso relativo de cada modo normal não se altera com o passar do tempo, podemos dizer que não há uma restrição entre os modos normais, não há uma relação de condicionalidade. Assim Ashby conclui que no caso em que os elementos são os pêndulos

há restrição, e no caso em os elementos são os modos normais não há; logo, a organização depende de como o sujeito divide o sistema em partes.

2.2 SISTEMAS COMPLEXOS E AS RELAÇÕES DE ENSINO-APRENDIZAGEM

O termo complexidade tem designado nas últimas décadas grande faixa de procedimentos e abordagens no tratamento de problemas científicos das mais diversas áreas. O estudo de sistemas complexos configura-se na atualidade como campo promissor na elucidação de propriedades emergentes e em geral não redutíveis dos fenômenos observados na natureza, como emergência de estruturas auto-organizadas, a origem da vida, a evolução das espécies, o funcionamento do sistema imunológico, o sistema neuronal ou a dinâmica atmosférica.

Disciplinas do saber humano a princípio não relacionadas, entre elas cibernética, teoria dos sistemas, teoria da informação, dinâmica não-linear e termodinâmica de processos irreversíveis passam na atualidade a construir metodologias e enfoques que pouco a pouco compõem a chamada teoria dos sistemas complexos. Tais metodologias balizam uma mudança de paradigma lenta, porém de grande vulto na história das ciências. Comum a todas é a exigência que fazem ao trabalho científico no sentido de substituir os antigos preceitos da ciência pós-renascimento baseados na simplicidade, ordem e previsibilidade, por uma nova racionalidade, um pensar complexo.

Tendo em vista todo o desenvolvimento teórico e experimental nas ciências contemporâneas, faz-se necessário considerarmos quais seriam as implicações do desenvolvimento da teoria dos sistemas complexos para o ensino de ciências. Num primeiro momento, fica claro que todos esses avanços da ciência atual já se colocam como conteúdo didático que deve ser incorporado ao ensino de ciências. Entretanto, parece coerente que para além da simples transposição didática desse material, leve-se em conta também as consequências da emergência das teorias da complexidade. Isso equivale a dizer que, tendo em vista o novo ferramental teórico disponível, seria reducionista ignorar as aplicações e implicações para o ensino, da nova compreensão do cérebro humano, e da própria pedagogia, enquanto um sistemas complexos.

Necessitamos para tanto primeiramente levantar aspectos gerais que permitam analisar quais são as características geralmente apresentadas por um sistema complexo e avaliar os usos e pertinências dessas definições no contexto da relação ensino-aprendizagem. Mas essa

não é uma perspectiva isolada. Diferentes autores da atualidade indicam a necessidade de pensar a complexidade para a área de educação. Nessa parte do trabalho, enfoque será dado aos trabalhos que toquem as questões relativas à educação e epistemologia, por sua relação direta com a área de aplicação do estudo.

Num contexto mais amplo, Edgar Morin (1999) admite que o pensar complexo, base da emergência do novo paradigma da complexidade, fundamenta-se na superação do seu predecessor, o paradigma da simplicidade. Esse processo é caracterizado como um abandono dos princípios de inteligibilidade pela simplificação, – que resumidamente podem ser apresentados como Princípio da Ordem; Princípio de Separação/Redução e Princípio da Lógica indutivo-dedutivo-identitária – sustentáculos da produção do conhecimento científico vigente.

O princípio da ordem postulava um universo regido por leis imperativas que possuem caráter absoluto, originário provavelmente de culturas monárquicas absolutistas, humanas e/ou divinas. De Descartes a Newton, é a causalidade divina que mantém um universo perfeito. Com o desemprego tecnológico de Deus, a ordem do cosmos passa a ser auto-emaneante, sendo o mundo máquina perfeita. Deriva-se dessa ordem a concepção determinista e mecanicista do universo simples e ordenado, sendo toda a desordem mera aparência. O cosmos seria então suscetível a um enunciado científico unificador, ainda não alcançado devido à falta de informação do nosso conhecimento.

É a partir das descobertas da termodinâmica iniciadas por Boltzmann (1887) que essa visão fica debilitada. Hubble(1930) evidencia então a expansão do nosso universo observável, e a isso seguem mostras de um espaço habitado por explosões de estrelas, buracos negros e a especulação de um provável futuro de morte térmica do universo. Afinal surgem as noções de *quantum* de energia de Plank (1900), totalizando comportamentos desordenados na termodinâmica, na microfísica e na cosmologia.

O Princípio de Separação é originário principalmente do pensamento de Descartes na passagem “... repartir cada uma das dificuldades que eu analisasse em tantas parcelas quantas fossem possíveis e necessárias a fim de melhor solucioná-las...” do seu livro O Discurso do Método. Na medida em que esse princípio possibilitou tantos avanços científicos, derrocou numa compartimentalização do saber, uma especialização das tarefas científicas, essas por sua vez cada vez menos comunicantes. Atribui-se ainda a esse pilar a separação entre a cultura humanista e a nova cultura científica efetivada no século XIX; a separação entre ciência e filosofia, a separação entre as grandes ciências, e no interior das ciências a separação de suas disciplinas.

O princípio de Redução fundamenta-se na priorização do conhecimento dos elementos mínimos constitutivos de um fenômeno em prejuízo dos fenômenos oriundos do conjunto desses elementos e de suas interações. É responsável ainda por restringir os objetos do conhecimento àqueles mensuráveis, quantificáveis e formalizáveis. Pode ter se derivado das práticas e do axioma de Galileu que pregava que os fenômenos só devem ser descritos com a ajuda de quantidades mensuráveis

Sobre a conjugação entre os princípios de separação e redução admite-se que levaram a ideia de molécula, do átomo, da partícula subatômica, e por fim do quark, que não pode ser isolado materialmente. Na biologia, da célula aos seus constituintes, chegando ao gene, que por sua vez não pode ser isolado, pois a própria ideia de genoma não comportaria essa fragmentação. Sua derrocada inicia-se com as ideias de Von Bertalanffy e seus princípios de sistêmica, cujas formulações indicavam que o todo é mais que a simples soma das partes. Na cibernética, estabelecem-se os princípios de organização das máquinas, conhecimento que não podia ser reduzido ao das partes constitutivas. Começa a surgir a ideia de emergência, na qual a organização de um sistema produz propriedades e qualidades desconhecidas inicialmente das partes isoladas. Isso sem falar nas novas ciências como a ecologia, nascidas já sobre um paradigma sistêmico. No que diz respeito a separação objeto – observador, com a física quântica e o princípio da incerteza de Heisenberg, ficam provadas as ideias de Niels Bohr e a escola de Copenhague, que sustentavam não ser possível a disjunção entre o sujeito e o objeto do conhecimento.

O princípio restante é aquele que estabelece um caráter Absoluto da lógica indutivo-dedutivo-identitária. A ele competia assegurar a validade formal das teorias e raciocínios. Essa lógica é composta pela indução, pela dedução e por três axiomas identitários fundamentados no *Organon* de Aristóteles, que segundo Morin podem ser expresso como:

“: 1- princípio de identidade (A é A); é impossível que A exista e não exista ao mesmo tempo e numa mesma relação. 2- princípio da não contradição (A não pode ser ao mesmo tempo B e não-B); um atributo não pode ao mesmo tempo e numa mesma relação pertencer e não pertencer a um mesmo sujeito. 3 – princípio do terceiro excluído (A é ou B ou não B); se toda proposição dotada de significado é verdadeira ou falsa, entre duas contraditórias somente uma é verdadeira. Os três princípios são solidários”.

O sucesso desse conjunto de normas da racionalidade cientificista permitiu ao matemático Hilbert propor e anunciar a completa axiomatização das teorias científicas, e ao círculo de Viena anunciar que pretendia fixar todo o conhecimento sobre o positivismo lógico. Entretanto o caráter absoluto dessa lógica sofreu na atualidade diversos ataques. No campo epistemológico, Karl Popper refuta a ideia de que a indução e a verificação sejam

suficientes para o caráter universal da ciência, afirmando ainda que quando não é trivial, a indução comporta sempre um risco. Wittgenstein assinala como as ideias de leis da natureza se assentam sobre a indução, ao passo que essa também está baseada na ideia das leis da natureza, num círculo conceitual sem suporte lógico. Por sua vez, Gödel aparentemente encerra a discussão, apresentando seu teorema da irresolubilidade, mais tarde comprovado por Turing, demonstrando que todo sistema formalizado que comporta a aritmética, comporta necessariamente os enunciados irresolúveis (não refutáveis e não demonstráveis), e que a não contradição de um sistema não é demonstrável apenas pelos próprios recursos desse sistema.

No campo filosófico admite-se que o pensamento complexo tenha se articulado ao longo do tempo em torno de alguns pensadores. Na antiguidade Heráclito já indicava a presença de um conjunto de termos contraditórios para afirmar uma verdade. Pascal afirmou a impossibilidade de conhecer o todo sem conhecer as partes. Espinosa considerou a ideia de auto-produção do mundo por ele mesmo. Kant evidenciou os limites da razão. Hegel, através da dialética evidencia a relação complementar entre antagônicos. Nietzsche estabelece uma crise nos fundamentos da certeza, com a inexorabilidade do niilismo, e escola de Frankfurt faz finalmente a crítica da razão clássica. Bachelard introduz a complexidade na ciência ao afirmar que “na natureza não existe o simples, só o que há é o simplificado”. Por fim, ainda de acordo com Edgar Morin é possível um enunciado simplificado dessa mudança de paradigma. Na medida em que o paradigma da simplicidade ordenava separar e reduzir, o paradigma da complexidade ordena reunir e distinguir.

Ainda no caso da epistemologia de referencial complexista, os trabalhos do biólogo chileno Humberto Maturana sobre linguagem, aprendizagem e cognição mostram-se emblemáticos por apresentar o conceito de autopoiese (auto-produção), o que tem servido em abordagens educacionais da auto-formação.

Alguns autores creditam a Piaget o pioneirismo na introdução da complexidade no campo da educação. Na atualidade, Davis e Sumara (2006) apontam as possibilidades no tratamento da educação enquanto um típico fenômeno de sistemas complexos. De maneira geral, encontra-se em seus trabalhos apontamentos no sentido de uma compreensão de:

- Educação como auto-organização;
- O produto da educação sendo maior do que a soma e suas partes (emergência);
- Inteligência definida como exploração de várias possibilidades de ação e seleção de ações mais adequadas à situação imediata;
- Indivíduo deixa de ser visto como a única instância de

aprendizagem/pensamento/ inteligência/criatividade para se pensar em sistemas mais amplos que se expandem a partir do aprendiz e que são incorporados no aprendiz. (movimentos para fora e para dentro ao mesmo tempo);

- Aprendizagem não é um processo linear e ações inteligentes podem ocorrer, simultaneamente, em vários níveis da organização do sistema complexo.

Enquanto isso, Caine e Caine (1991) já apontavam que:

- A mente é um sistema adaptativo complexo. (a mente é social);
- Aprendizagem envolve toda a fisiologia (aprender é como respirar);
- A busca por significado é inata;
- A busca por significado acontece através de padrões (esquemas, categorias);
- As emoções influenciam e organizam o que aprendemos;
- O cérebro percebe e cria, simultaneamente, partes e todos;
- Aprender envolve tanto a atenção focada como também a percepção periférica;
- Aprender envolve sempre processos conscientes e inconscientes;
- A mente organiza a memória em pelo menos duas formas diferentes: taxionomias e memórias locais;
- Novas conexões acontecem ao longo da vida;
- A aprendizagem é estimulada pelos desafios e inibida pelas ameaças;
- As auto-organizações são únicas: consequência da genética, das experiências e do ambiente²⁰.

Num outro contexto, Queiroz e Barbosa (2007) reforçam a pertinência de se tratar as situações de ensino-aprendizagem enquanto sistemas complexos. Ainda, estabelecem as bases de um pensamento educacional construtivista que leve em conta o pensar complexo. Em seu trabalho, apresentam a defesa de um construtivismo dinâmico, em oposição ao construtivismo estático. Os autores definem que:

“Em suma, uma posição epistemológica aceitável para nossos propósitos pedagógicos pode ser resumida como: o conhecimento se constrói por interações entre sujeitos e objetos (realidade externa ao sujeito). Tal concepção se afasta do empirismo – concepção segundo a qual a origem do conhecimento está na experiência sensorial – assim como do racionalismo que reúne diferentes concepções que possuem em comum a crença de que a construção do conhecimento se inicia na mente/razão do sujeito. ”

É muito pertinente a declaração de Fiedler-Ferrara, para quem “...a educação é uma área privilegiada para a construção do pensar complexo, porque complexa é a dinâmica dos processos pedagógicos e complexa é a realidade do mundo onde

professores e alunos estão imersos...”. Na atualidade, encontram-se já diversos trabalhos com posicionamento complexista. Segundo apresentação novamente de Fiedler-Ferrara:

“... alguns autores têm se preocupado em construir metodologias e currícula que possibilitem a transição de um pensamento simples para um complexo. Busca-se, dessa forma, uma perspectiva sistêmica do mundo, que permita superar visões baseadas em causalidade estrita e linear, muitas vezes presentes na práxis escolar e nos livros didáticos, e que responda à necessidade de superação do processo de fragmentação do conhecimento. Interdisciplinaridade, nesse contexto, passa a ter, no processo de aprendizagem, um significado mais preciso. Em particular, a seleção e a organização de conteúdos escolares a partir de uma perspectiva sistêmica-complexista toma-se essencial e têm sido tratada por alguns autores”.

É nesse quadro que este projeto de pesquisa pretende se inserir. Entretanto, como ressalta ainda Fiedler-Ferrara:

“...Apesar de haver uma forte intuição nessa direção por parte daqueles que trabalham com educação, é também verdade que na ação pedagógica em sala de aula e na seleção e organização de conteúdos escolares, manifestas nos currícula e na maioria dos livros didáticos, ainda se está muito longe das mudanças necessárias que permitam superar a fragmentação disciplinar do conhecimento e a apresentação desses conteúdos numa lógica de causalidade estrita, que limita, e na maior parte das vezes impede, retro-alimentações entre conteúdos, procedimentos, abordagens e entre educadores e educandos. Entretanto, começa-se a construir arcabouços teóricos com o objetivo de dar suporte a ações pedagógicas que levem em conta a complexidade do real e da sala de aula... Afinal, onde, senão na Escola, as bases desse novo pensar começarão a frutificar?”³

De fato, começam a surgir diversos trabalhos que indicam uma aproximação mais ambiciosa entre ensino e sistemas complexos. Fiedler-Ferrara e Mattos(2002) propõem um referencial complexista como base de uma moldura epistemológica para a construção de metodologias na seleção e organização de conteúdos escolares. Nesse caso, referencial complexista é definido no plano teórico pelos autores em torno de quatro pontos:

“...o sistemismo (Bertalanffy, 1968), que evita as fraquezas das abordagens mecanicistas da causalidade estrita; a consideração de uma historicidade irreversível e não-linear, feita de rupturas e de continuidades, afastando-se, assim, da visão estruturalista; a pragmática, como evidenciadora dos atores, da ação e de sua intencionalidade, permitindo evitar-se o impasse intelectual que reduz os homens ao estado de agentes inertes de seus próprios futuros; a hermenêutica, no sentido preciso do exame das atividades humanas como conjunto de discursos e significações, abrindo novas perspectivas num domínio antes bloqueado pelo primado das forças materiais”.

Outro aspecto relevante do trabalho é o uso de metaconceitos, apresentado pelos autores numa relação com a seleção dos conteúdos escolares que poderá ser de grande valia pra o presente projeto. Destaca-se ainda neste trabalho a geometrização de um espaço do conhecimento - o espaço pandisciplinar – onde os termos trans/inter/pluri/multidisciplinar são

reconhecidos como recortes, ou subgrupos desse espaço. Tal contribuição abre espaço para a construção de conteúdos realmente transdisciplinares.

Para além disso, trabalho de Santos (2008) traz apontamentos muito pertinentes. Primeiramente, lembra que estudo independente de Karl Pribram - neurofisiologista da Universidade de Stanford - estudando o cérebro, chegou às mesmas conclusões de David Bohm, físico quântico. Ambos definiram o cérebro como um “holograma envolto por um universo holográfico”. Posto isso, o autor defende que:

“Assim como a imagem do cérebro como um holograma ... no processo de aprendizagem a compreensão do significado de uma frase evoca, instantaneamente, imagens, sons, vivências, conhecimentos adquiridos em diversas disciplinas, instâncias e momentos da vida, intuições, sensações, humores, sentimentos de simpatia ou antipatia, sentimentos de cooperação ou de rejeição. As realidades objetiva e subjetiva são complexas e interativas. No entanto, ignorando a dinâmica de interação, o professor prioriza determinado conteúdo na expectativa de que os alunos o absorvam recorrendo à memorização.”

Com isso, Santos defende a incorporação do princípio holográfico como complementar ao princípio da transdisciplinaridade no ensino:

“O princípio holográfico coloca aos professores o dilema posto pelas estruturas disciplinares e fragmentárias do ensino. Dilema que os obriga a se exercitarem na transdisciplinaridade, termo cunhado por Jean Piaget, que chegou inclusive a afirmar que, um dia, a interdisciplinaridade seria superada por transdisciplinaridade (Nicolescu, 2003). Aplicados ao processo ensino-aprendizagem, os princípios holográfico e transdisciplinar tornam o aprender uma atividade prazerosa na medida em que resgatam o sentido do conhecimento (perdido em razão de sua fragmentação e descontextualização). Esse é o desafio que se coloca na reconstrução da prática pedagógica.”

Apesar do quase consenso em produzir currículos mais interdisciplinares, dinâmicos, transdisciplinares, e que concebam a complexidade do conhecimento, a prática curricular não tem indicado grandes mudanças nesse sentido. Essa espécie de atraso dos currículos brasileiros se deve, entre outras coisas, a forte carga histórico-cultural que permeia as construções dos currículos. Como ressalta Lopes(1998), o desenvolvimento científico e tecnológico no país foi praticamente nulo até o início do século passado, o que condicionou e foi condicionado pelo esparso desenvolvimento do ensino de ciências - além da forte influência portuguesa, alheia ao surto de desenvolvimento europeu.

A autora cita ainda, como importante motivação do baixo status da ciência no Brasil, a dicotomia entre fazer e saber, onde o primeiro relacionou-se ao campo das humanidades, relegando-se à ciência a técnica. Com isso, Lopes destaca que até meados dos anos sessenta o ensino de ciências esteve vinculado ao ensino de fatos e princípios possuidores de utilidade prática, fruto de uma concepção epistemológica empírico-descritivista. A partir do período marcado pelo lançamento do satélite soviético *Sputinik*(1957) e a conseqüente valorização do

ensino de ciências enquanto propulsor do progresso e desenvolvimento econômico, predomina a visualização de uma cultura científica focada na sua utilidade social, cabendo somente às humanidades o caráter de formação. Lopes explica que esse movimento é caracterizado por uma mentalidade pragmática e tecnológica associada a concepções empírico-positivistas de ciência, que visavam combater o antigo enfoque descritivista. Por fim, Lopes (1993) caracteriza o atual momento dizendo que:

“concepções empírico-positivistas, de certa forma ainda presentes nos livros didáticos de química, não mais assumem o papel inovador no ensino de ciências que exerceram nos anos 1950, tanto do ponto de vista epistemológico, por desprezarem os avanços da ciência contemporânea, que não mais se restringem aos princípios metodológicos hipotético-dedutivistas, como do ponto de vista sociológico, por se limitarem a uma visão de ciência asséptica e a-histórica”.

Portanto, o momento histórico do currículo parece reivindicar uma abordagem, a nosso ver, que vai de encontro a um currículo de referencial complexista.

As Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Química indicam algumas mudanças dignas de nota nesse aspecto, ao ressaltar a “necessidade de uma flexibilização curricular”. No trecho “diante da velocidade com que as inovações científicas e tecnológicas vêm sendo produzidas ... o atual paradigma de ensino – em todos os níveis, mas sobretudo no ensino superior – é inviável e ineficaz” evidencia-se a necessidade de se pensar mudanças que estejam de acordo com o instrumental científico e filosófico do momento histórico. Sobre as mudanças curriculares já realizadas, os autores notam que “eram superficiais, limitando-se a inclusão de novas disciplinas, extinção de outras...”. Acerca da estrutura curricular, afirma-se que “deve ser evitado o simples fornecimento de um número elevado de informações e com pouca ênfase no raciocínio”. O mais importante no currículo, então,

“não é a quantidade de conteúdo, mas sua articulação em torno de uma proposta de ensino que: a) defina claramente os objetivos do curso; b) estabeleça os conteúdos que delimitem o raio de ação do curso; c) evidencie equilíbrio entre atividades teóricas e práticas e d) contribua para o desenvolvimento crítico-reflexivo do aluno”.

Por fim, no tocante deste projeto, é estimulante a afirmação de que “mais do que o domínio cognitivo do conteúdo de química, os currículos devem contemplar atividades que visem estabelecer correlações entre a Química e áreas conexas, ampliando o caráter interdisciplinar (grifo nosso)”.

Todavia, esses discursos ainda enfrentam grave dificuldade no campo da ação/intervenção com os objetos pedagógicos reais. Buscaremos inserir nossas atividades nesse desafio.

Morin (2000) apresenta sete princípios-guia, complementares e interdependentes, que permitiriam pensar a complexidade. Por sua relevância, transcrevemos a seguir sua descrição:

“...1. O princípio sistêmico, ou organizacional, que une o conhecimento das partes com o conhecimento do todo, conforme a fórmula indicada por Pascal: “eu acredito ser impossível conhecer o todo sem conhecer suas partes e de conhecer as partes sem conhecer o todo”. A ideia sistêmica, que se opõe à ideia reducionista, é a de que “o todo é mais do que a soma das partes”. Do átomo à estrela, da bactéria ao homem e à sociedade, a organização do todo produz qualidades ou propriedades novas em relação às partes isoladamente: as emergências. Assim, a organização do ser vivo produz qualidades desconhecidas no nível dos seus componentes psico-químicos. Acrescentamos que o todo é igualmente menos que a soma das partes, cujas qualidades são inibidas pela organização do conjunto.

2. O princípio “hologramático” põe em evidência esse aparente paradoxo dos sistemas complexos nos quais a parte não somente está no todo, como o todo está inscrito na parte. Assim, cada célula é uma parte de um todo — o organismo global — mas o próprio todo está na parte: a totalidade do patrimônio genético está presente em cada célula individual; a sociedade está presente em cada indivíduo no que diz respeito ao todo através da sua linguagem, da sua cultura e de suas normas.

3. O princípio do ciclo retroativo, introduzido por Norbert Wiener, permite o conhecimento dos processos auto-reguladores. Ele rompe com o princípio da causalidade linear: a causa age sobre o efeito, e o efeito sobre a causa, como em um sistema de aquecimento no qual o termostato regula o funcionamento da caldeira. Esse mecanismo de regulação permite a autonomia de um sistema, nesse caso a autonomia térmica de um apartamento em relação ao frio exterior. De modo mais complexo, a “homeostasia” de um organismo vivo é um conjunto de processos reguladores fundamentados em múltiplas retroações. O ciclo de retroação (ou feedback) permite, sob sua forma negativa, reduzir o erro e, assim, estabilizar um sistema. Sob sua forma positiva, o feedback é um mecanismo amplificador como, por exemplo, a situação de chegada aos extremos em um conflito: a violência de um protagonista conduz a uma reação ainda mais violenta. Inflacionadoras ou estabilizadoras, as retroações são verificadas em grande quantidade nos fenômenos econômicos, sociais, políticos ou psicológicos.

4. O princípio do ciclo recorrente supera a noção de regulação pela de autoprodução e pela de auto-organização. Trata-se de um ciclo gerador no qual os produtos e as consequências são, eles próprios, produtores e originadores daquilo que produzem. Assim, nós, indivíduos, somos os produtos de um sistema de reprodução nascido em priscas eras, contudo, esse sistema somente pode se reproduzir se nós próprios nos tornarmos os produtores, nos acasalando. Os indivíduos humanos produzem a humanidade de dentro e por meio de suas interações, mas a sociedade emergindo, produz a humanidade desses indivíduos, fornecendo-lhes a linguagem e a cultura.

5. O princípio de auto-eco-organização (autonomia/dependência): os seres vivos são seres auto-organizadores que se autoproduzem sem cessar e por isso gastam a energia para salvaguardar sua autonomia. Como eles têm necessidade de retirar a energia, a informação e a organização do seu ambiente, sua autonomia é inseparável dessa dependência e, portanto, é necessário concebê-los como sendo auto-eco-organizadores. O princípio da auto-eco-organização vale, evidentemente, de maneira específica para os humanos, que desenvolvem sua autonomia dependentes da sua cultura, e para as sociedades que dependem de um ambiente geocológico. Um aspecto-chave da auto-eco-organização ativa é que esta se renova permanentemente a partir da morte das suas células, conforme a fórmula de Heráclito, “viver de morte, morrer de vida”, e que as duas ideias antagonistas, da morte e da vida, são complementares ao mesmo tempo que permanecem antagônicas.

6. O princípio dialógico acaba, justamente, de ser ilustrado pela fórmula heraclitiana. Ela une dois princípios ou noções em face de se excluírem um ao outro, mas que são indissociáveis em uma mesmerealidade. Portanto, devemos conceber uma dialógica ordem/desordem/organização desde o surgimento do universo: a partir de uma agitação calorífica (de ordem) na qual certas condições (encontros ao acaso) dos princípios de ordem vão permitir a constituição de núcleos, de tomos, de galáxias e

de estrelas. Reencontramos, ainda, essa dialógica desde o surgimento da vida, nos encontros entre macromoléculas no seio de uma espécie de ciclo auto produtor que termina tornando-se uma auto-organização ativa. Sob as mais diversas formas, a dialógica entre a ordem, a desordem e a organização, por via de inúmeras inter-retroações, está constantemente em ação nos mundos físico, biológico e humano. A dialógica permite-nos aceitar racionalmente a associação de noções contraditórias para conceber um mesmo fenômeno complexo. Niels Böhr, por exemplo, constatou a necessidade de se reconhecer as partículas físicas ao mesmo tempo como corpúsculos e como ondas. Nós mesmos somos seres separados e autônomos, ao mesmo tempo em que fazemos parte de duas continuidades separadas, a espécie e a sociedade. Quando consideramos a espécie ou a sociedade, o indivíduo desaparece, quando consideramos o indivíduo, a espécie e a sociedade desaparecem. O pensamento complexo aceita dialogicamente os dois termos, que tendem a se excluir um do outro.

7. O princípio da reintrodução do conhecido em todo o conhecimento. Esse princípio realiza a restauração do tema e revela o problema cognitivo central: da percepção à teoria científica, todo o conhecimento é uma reconstrução/tradução por um espírito/inteligência em uma cultura e em um tempo determinados.”

A construção de conhecimento, segundo Morin, apoia-se nos movimentos retroativos e recursivos. O filósofo atenta para o fato de que não há uma única maneira de aprender. O processo cognitivo é um processo complexo, uma vez que o sujeito vê o objeto em suas relações com outros objetos ou acontecimentos. As relações cerebrais estabelecem-se entretecendo-se em teias, em redes.

Estes sete princípios-guia permitiriam uma compreensão mais avançada da complexidade. Apresentam-se como guias dos processos cognitivos do pensamento complexo, e a nosso ver serão importantes ferramentas na construção tanto de conteúdo didático para ensino de sistemas complexos quanto de currículos menos reducionistas.

Outra ferramenta importante apresentado no volume 3 de *O Método* é o termo que Morin chama de *Blitzkrieg*. No caso, ele utiliza-se desse conceito como estratégia de trabalho. Dada a imensidão de conexões possíveis entre diversas áreas do saber, seus conteúdos, definições e conceitos, torna-se difícil falar em uma estratégia única e definida de abordagem da questão da complexidade nessas áreas. Com esse método, Morin estabelece um “ataque cognitivo” capaz de produzir conhecimento. No seu ataque, envolvem-se problemas essenciais e saberes decisivos, capazes de efetivar uma mudança.

CAPÍTULO 3 - REFERENCIAL EPISTEMOLÓGICO BACHELARDIANO

Neste capítulo apresentamos nosso referencial epistemológico, baseado em aspectos da obra filosófica de Gastón Bachelard. Primeiramente é feita rápida revisão de sua vida e obra, seguida de análise breve de suas principais contribuições para o campo da epistemologia e da educação, para finalmente nos determos de maneira mais profunda no traço de maior interesse para o presente trabalho, as reflexões de Bachelard sobre a questão dos obstáculos epistemológicos.

3.1 VIDA E OBRA

Gastón Bachelard nasceu em 27 de junho de 1884 em Bar-sur-Aube, um vilarejo no nordeste da França, e morreu em Paris, em 1962. Devido à primeira guerra, não pôde seguir seus estudos como pretendia. Dedicou-se ao magistério durante 16 anos na sua cidade natal. Aos 35 anos, ainda professor secundário, escreveu duas teses no campo da epistemologia. Suas primeiras teses foram publicadas em 1928 (Ensaio sobre o conhecimento aproximado e Estudo sobre a evolução de um problema de Física: a propagação térmica dos sólidos). Seu nome passa então a se projetar e é convidado, em 1930, a lecionar na Faculdade de Letras de Dijon, onde permanece por dez anos, quando então foi convidado a ministrar suas aulas na Sorbonne de Paris. Cumpre também destacar que Bachelard dedicou-se grande parte da sua vida à educação básica, e que em seus escritos ela sempre está valorizada.

Suas obras são freqüentemente classificadas em dois grupos com intencionalidades bastante distintas. Japiassu (1976) aponta que o total das obras de Bachelard pode ser dividido entre as obras poéticas e as científicas. As poéticas, voltadas ao devaneio da criação artística, foram nomeadas como noturnas. Tal denominação, usada pelo próprio Bachelard, remete ao mundo dos sonhos noturnos, onde a racionalidade do mundo objetivo fica suspensa, permitindo a emanção da criação e da inspiração artística. Neste grupo estão presentes trabalhos como *A psicanálise do fogo*; *A Terra e os devaneios da vontade* e *A poética do espaço*. As científicas, voltadas ao processo de desenvolvimento do saber científico e marcadas pela razão, são classificadas como diurnas. Diurna para remeter à clareza e objetividade do conhecimento objetivo, científico. É neste grupo que se encontram trabalhos bastante celebrados na epistemologia e no ensino de ciências, como *O Novo Espírito Científico*, *A formação do Espírito Científico* e *A filosofia do não*.

Interessante salientar que apesar da aparente dicotomia entre trabalhos científicos e poéticos, Bachelard defende o uso de ambas as leituras para estabelecer formas de diálogo com o mundo. Ainda segundo Japiassu (1976), essa relação entre noturno e diurno representa o jogo necessário entre opostos que permitiria em última estância uma percepção mais abrangente das potencialidades intelectuais do homem. Para o nosso caso, somente seus trabalhos dedicados à epistemologia e ao ensino, classificados como “diurnos”, serão considerados.

3.2 ASPECTOS DA EPISTEMOLOGIA BACHELARDIANA

Bachelard viveu em um período marcado por tremendas mudanças na história da ciência, entre as quais podemos citar o surgimento da Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica. Consequentemente, seus escritos foram marcados também pela percepção epistemológica destas mudanças. Neste sentido, a epistemologia bachelardiana é frequentemente classificada como histórica. Histórica não só porque faz uso da história da ciência, mas porque é a partir do material histórico que fundamenta suas análises e alicerça suas teses.

Porém, não é suficiente apenas adjetivá-la como histórica. É necessário especificar qual é o tipo de história da ciência empregado pela sua epistemologia. Trata-se de um olhar histórico que busca nos erros do passado a constatação de seu progresso. Uma história recorrente, na medida em que parte das certezas do presente para encontrar as formações progressivas da verdade no passado, e porque concebe a verdade de hoje enquanto uma retificação histórica de um antigo erro. É a partir desta noção de recorrência histórica defendida por Bachelard que o epistemólogo poderá mergulhar na história das ciências e, então, julgar os fatos do passado sob uma perspectiva da razão atual e só então compreender os processos de evolução do conhecimento científico. Desta forma, o papel do epistemólogo fica como o de “julgar os documentos históricos na perspectiva da razão, e até da perspectiva da razão evoluída, ou atual, porque só com as luzes atuais podemos julgar com plenitude os erros do passado espiritual” (BACHELARD, 1996, p. 22).

Ainda sobre isto, Bachelard (1996) destaca o que ele acredita que deva ser a diferença entre o papel do historiador e do epistemólogo: “O historiador da ciência deve tomar as idéias como se fossem fatos. O epistemólogo deve tomar os fatos como se fossem idéias, inserindo-as num sistema de pensamento. Um fato mal interpretado por uma época.” (BACHELARD, 1996, p. 22).

Entretanto, essa evolução histórica da ciência não é elaborada por Bachelard enquanto um processo linear, gradual, muito menos contínuo. Na verdade, sua epistemologia é marcada pela noção de ruptura epistemológica, na qual nos detemos a seguir.

Dentro de uma perspectiva continuísta da cultura científica é comum, como afirma Lopes (1992), vermos a interpretação de um fato do passado como precursor do que hoje fazemos. Mas segundo Bachelard não há essa continuidade para o estabelecimento do conhecimento científico, este não se estabelece seguindo uma seqüência linear de progressos. Tampouco parte do conhecimento comum passando por lentas transformações até se estabelecer como conhecimento científico. É preciso levar em conta as diferentes concepções de mundo que norteiam os diferentes momentos históricos. Como exemplo cita-se a ideia equivocada de que a química se desenvolve a partir da alquimia, ou mesmo, a concepção de que os atomistas gregos foram precursores das formulações dos atomistas modernos. Conforme o exposto por Lopes (1992, p. 255-256):

[...] “ O alquimista não investiga as propriedades das substâncias e suas transformações, com o intuito de conhecer melhor a Natureza e construir teorias sobre a matéria. O alquimista tem por objetivo alcançar a revelação de segredos divinos, a busca do Bem, o autoconhecimento, a transformação de sua alma. [...] As proposições de Demócrito, bem com as de Leucipo e Epicuro, não compõem uma teoria atômica, nem tampouco visam explicações para as transformações químicas. Suas concepções de mundo são bem diversas das concepções dos físicos modernos. Seus pensamentos constituem uma filosofia que procura explicar a natureza, a partir da inserção do homem...”

Bachelard afirma que o historiador deve conhecer o presente para julgar o passado, mas não no sentido de ver no passado a preparação para o presente, mas sim de, “a partir do presente, questionar os valores do passado e suas interpretações” (LOPES, 1992, p. 257).

Segundo o filósofo francês, não é possível haver continuidade entre o conhecimento comum e o conhecimento científico, sendo necessário, para adquirir o saber científico, o rompimento com este conhecimento comum, ao que explicita isto: “Em seu desenvolvimento contemporâneo, as ciências físicas e químicas podem ser caracterizadas epistemologicamente como domínios de pensamentos que rompem nitidamente com o conhecimento vulgar” (BACHELARD, 1977, p. 16).

Vale ressaltar também que esta ruptura pode não se dar somente entre conhecimento comum e o conhecimento científico, mas também, entre diferentes concepções de conhecimento científico estabelecidas em épocas distintas:

Do ponto de vista astronômico, a refundição do sistema einsteiniano é total. A astronomia relativista não sai de modo algum da astronomia newtoniana. O sistema

de Newton era um sistema acabado. Corrigindo parcialmente a lei de atração, aperfeiçoando a teoria das perturbações, havia numerosos meios para dar conta do ligeiro avanço do periélio de Mercúrio assim como das outras anomalias. Deste lado não havia necessidade de subverter de cima para baixo o pensamento teórico para adaptá-lo aos dados da observação. Vivíamos, aliás, no mundo newtoniano como uma residência espaçosa e clara. O pensamento newtoniano era de saída um tipo maravilhosamente transparente de pensamento fechado; dele não se podia sair a não ser por arrombamento. Quando não há um “arrombamento” ou uma ruptura entre conhecimentos, sejam comuns (vulgares) ou científicos, torna-se necessário entender a origem das dificuldades inerentes a estas rupturas (BACHELARD 1985, p. 12-13).

Em relação a estas dificuldades em romper com os erros e criar rupturas, nos deteremos mais profundamente ao discutir o conceito dos obstáculos epistemológicos.

Voltando à classificação histórica de Bachelard, este afirma que grosseiramente o desenvolvimento histórico do pensamento científico pode ser classificado em três etapas, ou grandes períodos. O primeiro que representa o estado pré-científico, compreendendo a antiguidade clássica, o renascimento, com os séculos XVI, XVII e o início do século XVIII. O segundo período representa o estado científico, em preparação no final do século XVIII, se estenderia por todo o século XIX e início do XX. Enfim, o terceiro período, a era do novo espírito científico, iniciando em 1905 com a ruptura de antigos paradigmas (Bachelard 1996, p. 9-10). Para cada novo período o saber científico é reconstruído e repensado.

Em um outro ponto de vista, a epistemologia de Bachelard é classificada como racionalista. Mas não um racionalismo no sentido idealista. Racionalista porque se opõe ao empirismo, para o qual a origem de todo o conhecimento é o objeto sensível ou a experiência primeira. Racionalista também na medida em que se situa contrário ao que chama de ideologia do dado, contra a ideia de que a simples observação dos fatos leva ao conhecimento, conhecimento este que estaria fundado, portanto, puramente na experiência do sujeito cognoscente. Entretanto, apesar de classificado como racionalista, isto não significa que defenda uma visão na qual o conhecimento emanaria da razão, postura filosófica classificada como próxima do idealismo. Segundo Martins (2007) o posicionamento da epistemologia de Bachelard estaria na verdade em um ponto intermediário entre o empirismo e o racionalismo, porém mais próximo do racionalismo.

Para ele, não é possível mais falar em termos de um realismo ou de um racionalismo absolutos. A prova científica é efetivamente construída durante a própria relação entre a experiência e o raciocínio, e se dá no contato com a realidade, mediada pela razão. O real científico está dialeticamente relacionado com a razão científica, mas é do racional para o real que Bachelard orienta o seu vetor epistemológico. Isso fica claro quando Bachelard (1985) afirma que a nova ciência opera através de uma realização do racional.

Segundo Bachelard o conhecimento do real é luz que sempre projeta algumas sombras, nunca é imediato e pleno, ou melhor dizendo, a presença da palavra real “é sempre o sinal de perigo e de confusão do pensamento” (BACHELARD, 1977, p. 34). Sendo o real um dado para a construção da realidade, quais seriam os critérios para demarcação desse real? Bachelard argumenta que um “realista” recorre com muita facilidade às experiências geométricas para confirmar a presença de um dado real, onde o lugar sempre aparece como a primeira das qualidades existenciais. “O realista concordará; mas logo responderá: Pouco importa que não saibamos o que vem a ser o objeto; pois sabemos que o objeto existe, porque está ali; tanto o senhor como eu podemos sempre encontrá-lo numa região determinada do espaço” (BACHELARD, 1977, p. 36).

Com isso, associa-se o real à experiência primeira. Em outras palavras, um resultado, quando passível de verificação macroscópica (aos olhos do observador), torna-se um argumento para o estabelecimento de uma verdade. Por exemplo, um fio de alumínio existe (é real). Este pedaço de metal de cor metálica ao ser mergulhado numa solução de ácido clorídrico sofre uma transformação. Esta transformação é verificada pelos sentidos humanos, que reconhecem uma alteração visual – na medida em que ocorre o desaparecimento do alumínio em paralelo à liberação de borbulhas de um gás incolor – e alteração tátil, representada pela sensação de calor durante tal transformação. Podemos então - generalizando em uma “verdade” - dizer que determinados materiais (ou corpos) podem ser dissolvidos em soluções ácidas, transformando-se em calor e borbulhas de um gás, tendo seus aspectos alterados, em sua maioria, com nítida perda de massa. São conclusões obtidas a partir de dados reais verificados em função daquilo que podemos observar macroscopicamente.

Mas poderá a ciência sempre se apoderar desta concepção de real macroscópico para o estabelecimento de verdades científicas? Qual seria a concepção de real para o mundo microscópico? Para Bachelard um corpúsculo não é um corpo minúsculo, não é um fragmento de substância e não pode ser compreendido a partir da geometria clássica, e “correlativamente, se o corpúsculo não tem dimensões determináveis, não há forma determinável... Dado que não se pode atribuir forma determinada ao corpúsculo, segue-se que não se lhe pode atribuir lugar muito preciso” (BACHELARD, 1977, p. 54).

Posto isso, dentro do quadro teórico formulado, a noção de real deve ser reconstruída para uma realidade microscópica. Neste ponto, Bachelard demonstra a necessidade dos equipamentos na validação do real científico contemporâneo. É o que ele chama de real instruído.

Porque seria demasiado cômodo entregar-se uma vez mais a um realismo totalitário e unitário, e responder-nos: tudo é real, o elétron, o núcleo, o átomo, a molécula, o mineral, o planeta, o astro, a nebulosa. De acordo com o nosso ponto de vista, nem tudo é real da mesma maneira; a substância não tem a todos os níveis, a mesma coerência; a existência não é uma função monótona; não pode afirmar-se por toda a parte e sempre no mesmo tom (BACHELARD, 1991, p. 51).

Uma partícula subatômica que para o senso comum representa a menor porção da matéria, não possui existência, forma ou lugar definida. Torna-se necessária a incorporação de técnicas (carregadas de teoria) e concepções teóricas (racionalização da estrutura da matéria) para compreender e detectar esta existência. Se não existe um real absoluto e verdadeiro, não podemos considerar a ciência (ou conhecimento científico) como uma extensão das primeiras experiências (do senso comum). E pode-se ir mais além, afirmando mesmo que uma postura científica e pedagógica neste sentido seria prejudicial a uma verdadeira formação científica.

Como argumenta Lopes (1992, p. 255):

Na medida em que se crê na continuidade entre conhecimento comum e conhecimento científico, procura-se reforçá-la: busca-se considerar a ciência como uma atividade fácil, simples, extremamente acessível, nada mais que um refinamento das atividades do senso comum. Tal perspectiva, por sua vez, tende a ser a divulgação de uma falsa imagem da ciência, capaz de estimular processos de vulgarização... Não é esta ciência fácil de conclusões precipitadas que Bachelard está defendendo, mas pelo contrário uma ciência que seja percebida como um processo de racionalização, fascinante quando no domínio de suas bases, seus princípios, ou seja, na razão do saber científico. A ciência ensinada na escola não deveria abster o estudante de descobrir este fascínio.

Bachelard coloca em conflito a relação entre a ciência e a opinião e vincula esta última ao real presente no olhar, na primeira impressão, no conhecimento comum (vulgar) ou nas experiências primeiras. A ciência opõe-se absolutamente à opinião, pois “a opinião pensa mal sendo necessário destruí-la” (BACHELARD, 1996, p.19).

Desta forma, a ciência química, por ser em suas raízes uma ciência experimental, carregada pelas impressões visuais e pelos fenômenos observados, ou seja, por aquilo que é considerado real, acaba por fortalecer o pensamento realista orientado pelo conhecimento comum (vulgar). Segundo Bachelard, o realista supervaloriza suas impressões tácteis e visuais simplificando a interpretação da realidade. Bachelard associa o obstáculo realista àquilo que ele chama de realismo ingênuo, ou seja, diretamente associado ao conhecimento comum ou a noção de real descrita anteriormente no início desta seção. Porém, tal concepção toma outro corpo dentro de uma química racionalista, tornando-se um real instruído fundamentado em técnicas, características de um fenômeno construído:

Qualquer que seja o problema particular, o sentido da evolução epistemológica é claro e constante: a evolução de um conhecimento particular caminha no sentido de uma coerência racional. O conhecimento científico vai então se construindo através de saltos, evoluindo a partir das rupturas atreladas a noções arraigadas sob o teto de determinados obstáculos epistemológicos (BACHELARD 1991, p. 21).

Gaston Bachelard teve também inúmeras contribuições ao ensino de ciências. Nestas obras sempre se preocupou com a questão pedagógica dos problemas científicos. Em “A Formação do Espírito Científico”, Bachelard (1996) busca uma psicanálise do conhecimento. Com o conceito de *obstáculos epistemológicos*, busca uma psicanálise¹ dos erros científicos, que por vezes se repetem como obstáculos pedagógicos. Afirma que para conhecer, é necessária uma catarse intelectual. Por isto se colocava contrário à aproximação entre saber científico e senso comum, como foi explicitado anteriormente. Defendia portanto o ensino racionalista, que exigisse a discussão em cima dos problemas que suscitaram o surgimento de novas teorias. Segundo ele, se assim não o for, o aluno combinará os resultados da aula com suas imagens mais familiares, numa posição confortável, porém equivocada sobre o conteúdo.

Bachelard, em suas investigações filosóficas, traz elementos que nos permitem construir uma ciência química “racional”, ao mesmo tempo mais “humanizada” e “cultural”, como podemos verificar em argumentação de Parente (1990) ao apresentar um dos fatores que considerou importante para justificar a construção de um livro sobre Bachelard e a Química:

O fato de ele ter nos proporcionado uma visão da ciência química como uma realidade aberta, em crescimento incessante, capaz de, pelo seu exercício, fecundar o espírito humano para outras manifestações igualmente necessárias de racionalidade – demonstrando então seu caráter formativo e cultural. (PARENTE, 1990, p. 18)

Acreditamos que o pensamento de Gastón Bachelard pode ser um útil aliado na formulação de um conteúdo didático capaz de ensinar os conceitos da complexidade, na medida em que estes rompem com o senso comum e fazem parte de uma estrutura racional emergente e coerente, o pensar complexo.

3.3 OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS

De acordo com Lopes (1993a), o conceito de obstáculos epistemológicos apresentou-se nas últimas décadas como importante ferramenta na abordagem das relações de ensino-

¹ De acordo com Lopes (1996) o termo psicanálise para Bachelard se distancia completamente do significado consagrado por Freud. A primeira utilização do termo é feita por Bachelard em *La formation de l'esprit scientifique*, publicado em 1938, época em que a psicanálise não possuía prestígio no meio universitário francês, de modo que sua utilização tem certo tom de ironia. Para Bachelard, psicanalisar o conhecimento objetivo significa purificá-lo de todo caráter subjetivo, eliminado a influência dos valores inconscientes arraigados à base do conhecimento empírico e científico.

aprendizagem de conceitos das ciências contemporâneas como a Física Relativística, as Geometrias Não-Euclidianas e a Mecânica Quântica. Um obstáculo epistemológico, na concepção do termo exposta pelo epistemólogo francês Gastón Bachelard, representa um motivo de atraso no desenvolvimento científico.

Epistemológico, por que se dá no domínio epistêmico, ou no campo da cognição humana. Mas não se trata de uma defasagem do aparelho cognitivo. Tampouco sua origem reside na complexidade ontológica dos fenômenos da natureza. Já o termo obstáculo se explica por ser exatamente o que defende Bachelard. Seriam mecanismos presentes no fazer científico responsáveis pela lentidão ou atraso no progresso do conhecimento. Trata-se neste caso de entender os desenvolvimentos do fazer científico enquanto um descontínuo marcado por rupturas e entrecortado por erros, retificações:

[...] não se trata de considerar obstáculos externos, como a complexidade e a fugacidade dos fenômenos, nem tão-pouco de incriminar a fraqueza dos sentidos, e do espírito humano: é no próprio ato de conhecer, intimamente, que aparecem, por uma espécie de necessidade funcional, lentidões e perturbações. É aqui que residem causas de estagnação e mesmo de regressão, é aqui que iremos descobrir causas de inércia a que chamamos obstáculos epistemológicos. (BACHELARD, 1977, p. 165).

Assume-se assim que entender e analisar processos científicos dentro do conceito de obstáculos epistemológicos permite compreender não só o desenvolvimento histórico do conhecimento, mas construir ferramentas que permitam a superação individual e coletiva desses entraves. Nas palavras do epistemólogo francês, “...de modo mais preciso, discernir os obstáculos epistemológicos é contribuir para inaugurar os rudimentos de uma psicanálise da razão...” (BACHELARD, 1974, p. 151). Assim é em termos destes obstáculos que poderemos entender o progresso do conhecimento científico, pois um obstáculo epistemológico funciona como uma espécie de anti-ruptura, originada de certo conservadorismo intelectual inerente ao próprio fazer científico. Nas palavras de Bachelard:

Em um determinado momento o espírito prefere o que confirma seu saber àquilo que o contradiz, em que gosta mais de respostas do que de perguntas. Quando não há perguntas, então não há questionamentos e um obstáculo epistemológico se incrusta no conhecimento não questionado (BACHELARD, 1996, p. 19).

Segundo Zanetic (2008) os obstáculos epistemológicos apresentados por Bachelard referem-se aos conceitos ou pré-conceitos adquiridos dentro de uma relação demasiado ingênua com os fenômenos, tantos os relativos à dimensão física quanto à dimensão psíquica. Como exemplo, temos a já mencionada crença de que em uma queda livre os objetos mais pesados atingem primeiro o solo, a concepção de movimento alheia à inércia, a visão de

espaço e tempo absolutos ou a visão de uma partícula quântica como uma partícula muito pequena.

De acordo com Lopes (1996), em última análise a noção de obstáculo epistemológico se apresenta dentro do universo teórico bachelardiano como uma das forças que compõem a estrutura do próprio movimento histórico dialético do progresso científico. Nesse caso, em oposição aos obstáculos epistemológicos, Bachelard define a noção de atos epistemológicos. Sendo assim, ao passo que os obstáculos são a causa dos atrasos, os atos epistemológicos correspondem aos ímpetus do gênio científico responsáveis por impulsos e avanços imprevistos, completando assim o necessário par dialético de forças que compõe o movimento histórico da ciência. Entretanto, cumpre destacar que de acordo com Canguilhem² (1994 apud LOPES, 1996, p. 266), dialética em Bachelard “possui o sentido de diálogo, um movimento de complementaridade e de coordenação de conceitos sem contradição lógica” e que “não deve ser confundido com o sentido mais usual de dialética,... cujo motor é a contradição”.

Conclui-se enfim que o aparecimento de um obstáculo epistemológico no conhecimento científico trata-se de fenômeno intrinsecamente determinado durante o próprio ato de conhecer, na relação entre o sujeito e o objeto do conhecimento. Sendo assim, seu estudo pode dar-se tanto no desenvolvimento histórico do pensamento científico, quanto na prática da educação.

E é nesse sentido que se definem conseqüentemente os obstáculos *pedagógicos*. Ao passo que são observados obstáculos no transcorrer da história da ciência, pode-se grosso modo afirmar que os mesmos obstáculos surgirão durante o processo de aprendizagem de um dado conceito científico. Estes obstáculos pedagógicos correspondem ao “... complexo impuro das intuições primeiras...”. Para “superá-lo, é necessária uma catarse intelectual e afetiva...” (BACHELARD, 1977, p.152). Por fim, assumir a presença de tais obstáculos na aprendizagem científica permite a sua superação, através da retificação gradual destes erros.

Posto isso, Bachelard faz duras críticas aos professores de sua época:

Os professores de ciências imaginam que o espírito começa como uma aula, que é sempre possível reconstruir uma cultura falha pela repetição da lição, que se pode fazer entender uma demonstração repetindo-a ponto por ponto. Não levam em conta que o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já constituídos: não se trata, portanto, de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana (BACHELARD, 1996, p. 19).

² CANGUILHEM, George. Études d'histoire et de philosophie des sci. p196. Paris: J. Vrin, 1994.

Dentre os obstáculos epistemológicos destacados por Bachelard (1977; 1996), pode-se citar: experiência primeira, conhecimento geral, obstáculo verbal, conhecimento unitário e pragmático e obstáculo animista.

Experiência Primeira:

O obstáculo da experiência primeira é a experiência colocada antes e acima da crítica, e representa o início dos obstáculos na formação do espírito científico. Constitui-se nas inferências imediatas, ligadas ao natural, concreto, mediadas pelos sentidos. Por resultar de uma atividade pouco pensada, ilustra o pensamento pouco inventivo, pouco ordenado. Quando o real sensível torna-se um terreno definitivo, ao invés de ser concebido como provisório, incrusta-se o obstáculo. De acordo com Bachelard (1996, p.25), “a observação primeira é sempre um obstáculo inicial para a cultura científica. De fato [...] se apresenta repleta de imagens; é pitoresca, concreta, natural, fácil. Basta descrevê-la para se ficar encantado”. A intuição primeira que se deseja verdadeira e absoluta manifesta os mais impuros entraves à pesquisa, por satisfazer-se com os resultados rápidos, calcados puramente em registros empíricos, afastando-se do racional e abstrato.

Nesse sentido, como sublinha Bachelard, o fascínio da observação particular deve ser substituído pela idéia de que “há ruptura, e não continuidade, entre a observação e a experimentação”. Dessa maneira, a observação neutra não é a gênese do conhecimento e de forma alguma única base na qual ele se firma. A observação não pode, de modo algum, esgotar as possibilidades de lidar com os fenômenos, mas sim se constituir em um estágio do avanço científico.

Segundo Bachelard, algumas descobertas não cumpriram uma função de avanço para a ciência, mas desempenharam o papel de espetáculo à curiosidade. Eram apresentadas como uma espécie de exibição teatral, representação mágica para os reis e a corte, a fim de prender a atenção e atrair olhares. No ambiente escolar vale o mesmo:

Basta que uma experiência seja feita com um aparelho esquisito... para que os alunos prestem atenção: deixam de olhar os fenômenos essenciais ... as experiências muito marcantes, cheias de imagens, são falsos centros de interesse... (BACHELARD, 1996, p. 48-50).

É digno de nota o quanto atividades de divulgação científica – tais como shows de química em feiras de ciência e museus, com muitas cores, fumaça, explosões, etc- muitas vezes se valem desta tendência pela espetacularização, reforçando uma visão de ciência muito fantástica, mas pouco racional.

Para minimizar os danos deste obstáculo, Bachelard sugere que o professor passe continuamente da experiência para a lousa a fim de extrair o mais rapidamente possível o abstrato do concreto, e assim impedir que apenas satisfações e admirações venham à tona, focando os conceitos por trás do observado.

Conhecimento Geral:

Este obstáculo refere-se ao momento em que a generalização é capaz de imobilizar o pensamento. Neste momento já não se remonta às observações, se quer recorrer a leis gerais que atingem a compreensão de um amplo espectro de fenômenos, e suas especificidades tornam-se sem valor. O raciocínio indutivo representa a ânsia de concluir uma lei científica geral a partir de uma série de fatos particulares, simbolizando por fim, mais um obstáculo ao percurso do cientista. É neste ponto que, segundo Martins (2007) “por trás de uma lei ou conceito geral, o espírito pré-científico pretende, muitas vezes, explicar tudo, acabando por não explicar nada”. No contexto da química, um exemplo é dado:

De fato, Baumé pensou em classificar os corpos de acordo com seu poder de combustão... Acreditou poder tomar a combustão como um aspecto próprio para distinguir, de um lado os minerais (incombustíveis) e, por outro, os corpos de origem vegetal e animal (combustíveis). É sempre a mesma tendência a explicar o fenômeno químico por um fenômeno de algum modo mais imediato, mais geral (grifo nosso), mais natural... A experimentação química será fecunda quando procurar a diferenciação das substâncias, em vez de vã generalização dos aspectos imediatos (BACHELARD 2007, p. 72).

Obstáculo Verbal:

Refere-se ao caso em que uma única imagem, uma única palavra desempenha o papel de expressar características e propriedades de fenômenos diversos. Bachelard defende que o uso abusivo de imagens familiares reflete o pensamento em seu estágio primitivo, por recorrer ao aparato metafórico para significar e comunicar o que se observa. Nesta perspectiva, Bachelard (1996, p. 92) diz que “o acúmulo de imagens prejudica evidentemente a razão, no qual o lado concreto, apresentado sem prudência, impede a visão abstrata e nítida dos problemas reais”.

É célebre o exemplo da esponja dado por Bachelard. Ele explicita que uma palavra, uma imagem, é capaz de explicar fenômenos de natureza diversa. As propriedades e características da esponja são abusivamente utilizadas para a compreensão de vários fenômenos. Alguns registros históricos mencionados por Bachelard (1996, p.95-97) ilustram a metáfora da esponja: “A terra é uma esponja e o receptáculo dos outros elementos”, “o sangue

é uma espécie de esponja impregnada de fogo”, “o ferro é uma esponja do fluido magnético”. Desta forma, uma única imagem ou palavra exprime os mais variados fenômenos na falsa convicção de estar explicando-os.

Conhecimento Unitário e Pragmático:

O obstáculo do conhecimento unitário é responsável por induzir generalizações ainda mais amplas, de caráter filosófico. A valorização recai sobre a unidade, que designa uma única natureza aos objetos científicos. Segundo Martins (2007, p. 36) “a formulação de princípios gerais da natureza pode pôr fim às experiências, levando a uma valorização abusiva que acaba por esconder as contradições dessa mesma experiência”.

O obstáculo do conhecimento pragmático representa um obstáculo quando leva à certeza de que “encontrar uma utilidade é encontrar uma razão” (BACHELARD, 1996, p. 115). Para Bachelard, a ligação entre o verdadeiro e o útil é característica de uma mentalidade pré-científica.

Obstáculo Animista:

Este obstáculo resulta da aplicação de características de seres vivos aos fenômenos naturais. Inclui-se também neste obstáculo situações em que atribuir-se vida a determinado fenômeno ou objeto implica em dar a ele maior relevância. Teorias que permeiam, por exemplo, as propriedades dos ímãs, incorporam a idéia de princípios ativos, como se uma alma, um princípio vital estivesse veiculado ao fluido elétrico e magnético, concepção esta também classificada como indesejada por ser relativa a um período pré-científico.

Acreditamos que o pensamento de Gaston Bachelard pode ser um útil aliado na formulação de um conteúdo didático capaz de ensinar os conceitos da complexidade, na medida em que estes rompem com o senso comum, e fazem parte de uma estrutura racional emergente e coerente, o pensar complexo.

CAPÍTULO 4 - OS OBSTÁCULOS EPISTEMOLÓGICOS NO ENSINO DE REAÇÕES QUÍMICAS OSCILANTES

O objetivo agora será determinar como os obstáculos epistemológicos se relacionam ao ensino dos sistemas químicos oscilantes. Análise será feita portanto em livros e artigos voltados ao tema dos osciladores químicos. Mas antes de proceder propriamente a análise dos livros e artigos de interesse, é preciso uma contextualização entre o referencial escolhido e o tema da pesquisa a partir da qual a análise foi feita. Consequentemente, a dimensão histórica da emergência dos sistemas complexos em química torna-se também necessária, haja vista a importância da história da ciência dentro do nosso referencial teórico. Nesse sentido, na primeira seção serão explorados episódios da evolução histórica e científica dos sistemas químicos oscilantes, discutindo os possíveis obstáculos epistemológicos durante seu desenvolvimento, indicando assim os pressupostos que estiveram presentes na análise dos textos didáticos realizada na seção posterior.

4.1 APONTAMENTOS HISTÓRICOS

A evolução dos conceitos pertinentes aos sistemas químicos oscilantes, a nosso ver, está de certa forma associada à evolução histórica dos conceitos relativos à termodinâmica, de sorte que a análise dos obstáculos epistemológicos no desenvolvimento histórico dos conceitos tanto da termodinâmica quanto dos sistemas químicos oscilantes foi pensada praticamente em paralelo. Apesar da importância que uma análise histórica aprofundada do desenvolvimento da termodinâmica e dos sistemas químicos oscilantes necessariamente deveria ganhar isto não parece possível dada a dimensão de tempo disponível para execução desta empreitada. O escopo do trabalho delimitado anteriormente não permitiu assim uma análise alongada acerca de cada desdobramento histórico e suas implicações epistemológicas. Entretanto, algumas considerações e asserções vêm à tona mesmo durante um olhar superficial. E são elas as apresentadas a seguir.

De acordo com Prigogine e Stengers (1997), pode-se classificar o desenvolvimento da termodinâmica em três estágios principais: a termodinâmica linear do equilíbrio no século XIX, que tratava dos motores térmicos; a termodinâmica linear do não-equilíbrio no século XX, que tratava da irreversibilidade; e por fim a termodinâmica não-linear, contemporânea, cujo surgimento foi marco no estudo das estruturas dissipativas. A primeira das relações gerais pertencentes à termodinâmica do não-equilíbrio é creditada a Onsager, que em 1931

estabeleceu suas célebres relações de reciprocidade. Estas comprovaram a possibilidade de, em um processo irreversível, ocorrerem processos de difusão da matéria frutos de gradientes térmicos, bem como que em processos de fluxos de calor resultassem gradientes de concentração; ambas com um mesmo coeficiente de proporcionalidade. Tal resultado foi importante marco histórico ao estabelecer os fenômenos irreversíveis como tema de estudo independente dos fenômenos do equilíbrio, e não mais como apêndices.

No contexto deste trabalho, digno de nota são as afirmações que Prigogine e Stengers fazem sobre esta mudança conceitual, e suas implicações para o futuro desenvolvimento da termodinâmica não-linear:

Na origem do desenvolvimento da termodinâmica não-linear situa-se uma constatação cuja fecundidade foi tanto mais notável quanto constituía um resultado negativo: fora preciso reconhecer a impossibilidade de encontrar um método geral (grifo nosso) de definição de uma função potencial para os sistemas em que os fluxos não são funções lineares de forças. Longe do equilíbrio, a produção de entropia continua a descrever os diferentes regimes termodinâmicos, mas ela não permite mais definir um estado atrativo, termo estável da evolução irreversível (STENGERS e PRIGOGINE, p. 111-112, 1997).

Parece-nos que esta análise se encontra muito próxima do descrito por Bachelard enquanto um obstáculo epistemológico do tipo *obstáculo do conhecimento geral*. Por certo período de tempo, a comunidade científica teve dificuldades em aceitar os fenômenos afastados do equilíbrio como sendo domínios específicos, com comportamentos e modelos descritivos próprios. Em grande medida, tal dificuldade residia no obstáculo do conhecimento geral. Para que se observasse o progresso científico da termodinâmica no século XX, era necessário permitir que certa classe de fenômenos deixasse de ser enquadrada no mesmo conhecimento generalizante - que abarcava a maioria dos fenômenos de interesse até então - das reações próximas do equilíbrio termodinâmico.

Num outro estágio da termodinâmica, parece-nos que foi o obstáculo do conhecimento unitário o responsável pela barreira ao desenvolvimento. Haja vista o aparente paradoxo entre a tendência termodinâmica ao máximo de entropia e desordem - relativa ao postulado pelas máquinas térmicas de Carnot - em contrariedade a tendência natural de aparição de formas vivas organizadas e cada vez mais complexas - da forma estabelecida como o descrito por Darwin. Nas palavras mais uma vez de Prigogine e Stengers (1997), “a termodinâmica linear não permite, pois, ultrapassar o paradoxo da oposição entre Darwin e Carnot, entre a aparição de formas naturais organizadas e a tendência física para a desorganização”. Este aparente paradoxo só viria a ser superado com as descrições de estruturas dissipativas, sistemas

termodinamicamente descritíveis que apresentam diminuição da entropia interna à custa de uma exportação contínua de entropia para o meio externo.

Neste caso, a necessidade de integrar duas áreas do conhecimento de forma a fazer valer um princípio científico e filosófico unitário para ambas configurou-se como um obstáculo epistemológico. Se os processos biológicos ocorrem em uma base química - sujeita às leis da termodinâmica - parecia inconcebível que os sistemas vivos estivessem alheios a inexorabilidade da segunda lei da termodinâmica. Foi preciso superar essa necessidade totalitarizante para que, por fim, a idéia de quebra da segunda lei fosse substituída pela idéia de ciclos autocatalíticos e fluxos locais de entropia. De uma noção que generalizava a descrição de todos os fenômenos, o conhecimento evoluiu para descrições específicas, passando a aceitar diferentes níveis de organização e trocas de energia.

A história das oscilações químicas parece estar em grande medida a reboque desses desenvolvimentos citados anteriormente. Não foi senão após a demonstração teórica da viabilidade das oscilações via uma nova abordagem da termodinâmica que os osciladores químicos passaram a ser aceitos pela comunidade científica. Mas, além disso, ela também encontrou seus obstáculos específicos. Quando as primeiras oscilações foram reportadas, não se enquadravam nos estudos cinéticos e termodinâmicos clássicos, e logo vieram tentativas de desacreditar a realidade do fenômeno. Afirmou-se que as oscilações observadas eram na verdade conseqüências de reações heterogêneas; que havia a formação de bolhas ou pequenas partículas sólidas, ou até mesmo poeira. Por fim, quando todas as dúvidas foram esclarecidas, argumentou-se que tais fenômenos eram impossíveis, por violar a segunda lei da termodinâmica. Mais uma vez, o argumento geral e unitário se colocou como barreira ao conhecimento novo.

Acreditamos portanto que o referencial bachelardiano de desenvolvimento dos conceitos científicos parece se estabelecer de acordo com a descrição histórica do desenvolvimento tanto da termodinâmica num nível mais geral quanto dos sistemas químicos oscilantes em específico. Obviamente, futuros estudos muito mais aprofundados serão necessários para verificar estes apontamentos.

4.2 ANÁLISE DE TEXTOS DIDÁTICOS

Finalmente, os conteúdos dos textos didáticos serão agora analisados. Foram analisados os conteúdos integrais de sete artigos científicos da área de educação voltados ao tema reações químicas oscilantes. Foram também analisadas as seções referentes a reações

químicas oscilantes de quatro livros didáticos utilizados em cursos de graduação da USP devotados ao ensino de sistemas caóticos e de seis livros de divulgação científica.

4.2.1 METODOLOGIA EMPREGADA

Há que se esclarecer os procedimentos técnicos utilizados nesta análise.

O material escolhido para análise – os textos didáticos – não correspondem a nenhuma coleção, catálogo ou objeto do gênero. A escolha do material não foi rigorosa a ponto de esgotar uma ampla amostragem de textos didáticos, que se enquadrassem dentro de algum conjunto específico ou que se considerou especial por algum motivo. Na verdade, este trabalho se propôs muito mais a esboçar algo como uma resenha crítica, à luz do referencial teórico, dos trabalhos selecionados, sem usar uma das técnicas específicas da metodologia da análise de conteúdo. A motivação foi muito maior no sentido de experimentar a intersecção entre o referencial teórico proposto e o conteúdo pertinente ao ensino de sistemas químicos oscilantes, e explorar seu potencial.

O tema da complexidade não parece configurar, até o presente momento, na agenda principal de inclusões sugeridas para a grade curricular dos ensino médio e fundamental. Os sistemas químicos oscilantes não estão em melhor condição. Sendo assim, o material analisado é via de regra composto por textos didáticos voltados para a graduação, a exceção do material de divulgação, que pode ser talvez considerado misto. Dessa forma, o material foi escolhido muito mais pela disponibilidade, que por um critério estabelecido previamente.

Os artigos foram selecionados por fazerem parte de uma mesma revista, possibilitando uma perspectiva da evolução no tempo da presença de obstáculos, caso houvesse.

Os livros foram selecionados por estarem presentes na bibliografia de três disciplinas de graduação da Universidade de São Paulo voltadas ao ensino de sistemas caóticos, a saber: 4300417 Fenômenos Não-lineares em Física: Introdução ao Caos Determinístico e Sistemas Dinâmicos; SQF0219 - Introdução à Ciência do Caos e 4300320 - Introdução ao Caos. A partir da bibliografia destes cursos, foram pré-selecionados as obras que versassem sobre osciladores químicos, sendo estes livros então os analisados.

Os livros de divulgação foram escolhidos baseados em sugestões diversas, principalmente coletadas no ano de 2005, durante o curso SQF0219 - Introdução à Ciência do Caos., ministrado pelo Prof. Ernesto Rafael Gonzalez, do IQSC – USP, e sugeridas pelo aluno de doutorado Rafael Cava Mori.

Em todos os textos didáticos foram selecionados trechos onde foi identificada a presença de algum elemento referente aos pressupostos teóricos definidos no capítulo do referencial epistemológico (2.3). Em seguida, foi realizada inferência de qual a classificação que cada trecho deveria receber, mais uma vez de acordo com os pressupostos estabelecidos anteriormente. Os resultados são os que seguem.

4.2.2 ARTIGOS CIENTÍFICOS DA ÁREA DE ENSINO

Os artigos científicos da área de ensino de química analisados foram os detalhados abaixo. Além de suas referências, são também apresentados os respectivos *abstracts* fornecidos pelo periódico:

- A. DEB, B. M. Chemical Oscillations as an Undergraduate Experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 54, n. 4, p. 236-237. 1977.
- B. AROCA, P.; AROCA, R. Jr. Chemical oscillations: A microcomputer-controlled experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 64, n. 12, p. 1017-1020. 1987;
- C. POJMAN, J. A.; CRAVEN, R.; LEARD, R.C. Chemical Oscillations and Waves in the Physical Chemistry Lab. **Journal of Chemical Education**, v. 71, n. 1, p. 84-90. 1994.
- D. BENINI, O.; CERVELLATI, R.; FETTO, P.; CIAMICIAN, C. G. The BZ Reaction: Experimental and Model Studies in the Physical Chemistry Laboratory. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 865-868. 1996.
- E. STRIZHAK, P.; MENZINGER, M. Nonlinear Dynamics of the BZ Reaction: A Simple Experiment that Illustrates Limit Cycles, Chaos, Bifurcations, and Noise. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 868-873. 1996.
- F. SCHMITZ, G.; ANIC, L. & S.; CUPIC, Z. The Illustration of Multistability W. **Journal of Chemical Education**, v. 77, n. 11, p. 1502-1505. 2000.
- G. PRYPSZTEJN, H.; MULFORD, D. R.; STRATTON, D. Tested Demonstrations Chemiluminescent Oscillating Demonstrations: The Chemical Buoy , the Lighting Wave and the Ghostly Cylinder. **Journal of Chemical Education**, v. 82, n. 1, p. 53-54. 2005.

DEB, B. M. Chemical Oscillations as an Undergraduate Experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 54, n. 4, p. 236-237. 1977

Abstract: Hitherto unreported observations regarding the Briggs-Rauscher oscillating system.

No primeiro artigo 230 alunos foram levados a observar durante 6 horas uma reação química oscilante, e tudo o que foi exigido deles é que fizesse um relato livre daquilo que por ventura observassem e julgassem interessante, para que a partir destes relatos o autor inferisse os conceitos que não foram lembrados pelos alunos. Neste caso, observa-se que a maior preocupação não foi a de propiciar aos alunos uma racionalização do fenômeno. A motivação principal foi chamar a atenção dos alunos para a emergência das cores e dos padrões espaço-temporais. Isto fica mais evidente no seguinte trecho:

When the reaction mixture is thoroughly shaken and poured into a Petri dish or a large beaker, and then left undisturbed the blue color occasionally develops in beautiful space patterns. If the mixture is poured into a long narrow tube then after a few oscillations the blue color develop first either at the top or the bottom and then advances like through the solution (DEB, p. 236, 1977).

Apesar de intitular-se uma proposta de experimentação, a atividade proposta e realizada pelos autores se dá muito mais como uma observação. Ênfase portanto foi dada a uma experiência sensorial, e não a uma experiência de fato científica, nos termos colocados por Bachelard. A pura e simples exaltação da beleza exótica da reação está presente, e foi caracterizada como um obstáculo epistemológico do tipo *obstáculo da experiência primeira*.

A prática toda apresentou supervalorização dos aspectos empíricos, o que reforça a nosso ver o obstáculo citado, já que em nenhum momento os alunos puderam entrar em contato com nenhum modelo. Apenas a dimensão experimental foi trabalhada, e vemos aí um problema, na medida em que os alunos ficaram livres para interpretar o fenômeno somente com base na sua aparência e nos resultados de suas observações. O autor conclui apontando fenômenos que foram pouca ou nenhuma vez relatados, como oscilações de pH e temperatura, mas se limitou a afirmar que tal fato é interessante. Caso os alunos tivessem entrado em contato com equações modelo, acreditamos que um maior número de alunos teria especulado sobre a possibilidade de outros tipos de fenômenos, e os mesmo poderiam ser verificados durante a prática, de maneira a aliar aspectos racionais e empíricos, o que teria por fim favorecido uma aprendizagem mais significativa dos conceitos., dentro do proposto por Bachelard.

AROCA, P.; AROCA, R. Jr. Chemical oscillations: A microcomputer-controlled experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 64, n. 12, p. 1017-1020. 1987

Abstract: A microcomputer-controlled experiment that interfaces an ion-selective sensor, an analogue-to-digital converter, and a microcomputer in order to display and study the periodicity of chemical oscillators.

No segundo artigo a prática é realizada em uma aula dentro da disciplina de laboratório em análise instrumental. Os alunos realizam medidas potenciométricas das oscilações, as quais são monitoradas via interface computacional. Acreditamos que neste artigo reúnem-se aspectos diferenciados - e um tanto mais adequados - de relação com o fenômeno na medida em que são monitorados pelos alunos aspectos da dinâmica oscilatória, via eletrodos seletivos. Apesar disto, aspectos dos modelos reacionais não foram discutidos.

Logo no início do artigo, busca-se realçar o aspecto atraente das reações químicas oscilantes. O texto inicia afirmando: *“Experimenting with oscillating chemical reactions has proven to be a very attractive and challenging experience for undergraduate students.* (AROCA, p. 1017, 1987). O termo *very attractive* já indica a tendência em evidenciar o fantástico presente no fenômeno. Não obstante, a conclusão do artigo recai sobre a mesma inadequação: *“In summary, oscillating chemical reactions are very attractive experiments”* (p. 1018).

Ainda que de maneira menos pronunciada que no artigo anterior, por todo o trabalho foi identificado uma tendência a supervalorizar aspectos exclusivamente empíricos do sistema, ora ressaltando a beleza da reação, ora evidenciando a atração da dinâmica oscilatória. Detectou-se neste trabalho portanto a presença mais uma vez de obstáculo epistemológico do tipo classificado como *obstáculo da experiência primeira*.

Outro tipo de obstáculo foi também verificado neste trabalho. Seguindo a descrição dos tipos de fenômenos oscilatórios observados, o autor compara as observações para dois tipos de catalisadores utilizados:

“The two catalysts selected for the experiments...provided distinct examples of oscillating reactions with different “incubation” periods. The Mn(II)-catalyzed reaction, ...demonstrated oscillatory behavior from the moment the catalyst was added. The Ce(III) reaction had a long incubation period...” (p. 1018).

Ao utilizar-se (duas vezes) do termo *tempo de incubação* para o período de tempo necessário para que uma reação comece a oscilar após a mistura dos reagentes - também chamado período pré-oscilatório - ocorre a utilização de um termo que faz referência a um

comportamento relativo a seres vivos. Por exemplo, tempo de incubação é usado na patologia como definição do “tempo decorrido entre a exposição ao organismo patogênico e a manifestação dos primeiros sintomas da doença” (PEREIRA, 1995). Tal uso abusivo de analogias e metáforas relativas a características de seres vivos para descrever um fenômeno é classificado por Bachelard como obstáculo epistemológico do tipo *obstáculo animista*.

Por fim, foi encontrado ainda outro tipo de obstáculo epistemológico neste artigo, presente no seguinte trecho:

“In contrast with close-to-equilibrium situation, the behavior of a far-from-equilibrium system becomes highly specific. There is no longer any universally valid law which the overall behavior of the system can be deduced, each system is a separate case, each set of chemical reactions must be investigated and may well produce a qualitatively different behavior. Nevertheless, one general result has been obtained, namely a necessary condition for the chemical instability: in a chain of chemical reactions in the system, the only reaction stages that under certain conditions and circumstances may jeopardize the stability of the stationary state are precisely the catalytic loops, stages in which the product of a chemical reaction is involved in its own synthesis.” (p. 1018).

Ao buscar compreender a inexistência de um princípio geral que enquadre de maneira mais universal os vários tipos de fenômenos complexos observados, indiretamente denota-se certa dose do obstáculo epistemológico classificado como *obstáculo do conhecimento geral*.

POJMAN, J. A.; CRAVEN, R.; LEARD, R.C. Chemical Oscillations and Waves in the Physical Chemistry Lab. (**Journal of Chemical Education**, v. 71, n. 1, p. 84-90. 1994.

Abstract: A three-experiment module based on the most widely studied oscillating system, the Belousov-Zhabotinskii (BZ) reaction.

O terceiro artigo propõe e realiza uma tripla atividade de laboratório didático. Nelas, os principais objetivos da prática enunciados pelos autores são:- estudar o comportamento de sistemas homogêneos; determinar a cinética de bromação dos ácidos malônico e metilmalônico; estudar o comportamento de sistemas em batelada, sem agitação; e determinar a constante de reação de uma autocatálise. Merece destaque o fato dos alunos serem levados a calcular parâmetros cinéticos de reações específicas. Outro ponto positivo do trabalho é a relevância dada aos aspectos históricos do surgimento e evolução do estudo das estruturas dissipativas.

Entretanto, já no título do trabalho chama a atenção o uso de uma analogia. O conceito de ondas, muito comum no estudo da mecânica ondulatória, foi neste caso apropriado indevidamente. Isso porque o fenômeno observado trata-se na verdade de frentes reacionais

resultantes de um acoplamento entre os mecanismos oscilatórios das reações químicas e os mecanismos difusionais em condições de ausência de agitação.

Talvez não fosse o caso de classificar esta analogia enquanto um obstáculo epistemológico. Mas os autores continuam a manifestar usos indevidos desta e de outras metáforas e analogias, como no trecho a seguir:

“In an excitable system the behavior is more interesting than the simple case of a traveling front because after the reaction passes through a point, the reactants are regenerated. (Some other material slowly reacts to replenish the needed species.) Consider a grass fire. After there passes, the grass can regrow, and then another fire can spread. How frequently fires pass through a specific region depends on how fast the grass grows. So if you looked from a satellite over a long period, you could observe fire “waves” spreading, for example, through a prairie. The slower the grass grows, the wider the distance between the rings of fire”. (p. 88).

Neste caso chama mais a atenção ainda que, após inicialmente usar uma analogia da mecânica ondulatória para nomear as frentes de reação, o autor se usa agora da metáfora do incêndio para descrever a observação do fenômeno. O próprio autor percebeu a imprecisão ao chamá-las de ondas, mas passa então a procurar outra analogia para descrevê-las. Não obstante, os autores vão além da troca de analogias, e passam a buscar observações que atestem a validade da nova metáfora, como observamos no seguinte trecho:

“Several qualitative observations of the unstirred BZ system were made. The chemical waves of the reaction mixture did not behave like water waves. When one of the blue waves ran into a wall, no reflection was observed. The wave simply terminated. This observation is in agreement with the grassfire analogy. If a fire encountered a barrier that it could not penetrate, it would eventually die out, not reflect back to where it had already burned. Also, when two waves collided, there was no interference. Again, the waves annihilated one another.” (p. 89)

É preciso admitir que a analogia do fogo - fenômeno de combustão essencialmente químico – se apresenta como algo mais próximo da realidade das oscilações químicas do que a analogia mecânica das ondas – fenômeno este essencialmente físico. Mas como afirma Bachelard, não se trata de escolher a melhor analogia, mas libertar o conhecimento científico deste obstáculo.

Sendo assim, pode-se atestar a presença de obstáculo epistemológico classificado como um *obstáculo verbal*.

BENINI, O.; CERVELLATI, R.; FETTO, P.; CIAMICIAN, C. G. The BZ Reaction: Experimental and Model Studies in the Physical Chemistry Laboratory. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 865-868. 1996.

Abstract: The paper illustrates integrated physical chemistry-computational lab experiments at the tertiary level on the "classic" Belousov-Zhabotinsky (BZ) oscillating reaction. The complete work was designed for studying the behavior of the Ce^{4+}/Ce^{3+} and $Fe(phen)_2^+/Fe(phen)_3^+$ catalyzed BZ systems and developing a kinetic model to interpret the experimental data. The students prepared the appropriate reactant mixtures and followed spectrophotometrically the absorbance of Ce^{4+} and $Fe(phen)_2^+$ ions. Then they plot the period of oscillation as a function of the initial concentration of any one of the mixture components observing in particular the difference in the dependence of the oscillation period on the $[Ce^{4+}]_0$ and $[Fe(phen)_2^+]$ respectively. These differences suggest that the two redox couples catalyze the BZ reaction by different mechanisms. A kinetic mathematical model based on the FKN mechanism for the cerium-catalyzed reaction is presented and discussed. The numerical integration solutions of the resulting rate equations show that the model accounts satisfactorily for the oscillations of the Ce^{4+}/Ce^{3+} catalyzed system but fails to reproduce the experimental behavior of the system catalyzed by the couple $Fe(phen)_2^+/Fe(phen)_3^+$. It has been proved that these integrated chemistry-computational lab experiments are a powerful tool in stimulating student interest in physical chemistry and in showing the importance of chemical kinetics in the elucidation of reaction mechanism.

O quarto artigo é um ótimo exemplo de superação dos obstáculos epistemológicos. Primeiramente, os autores fazem uma crítica contra o uso dos sistemas oscilantes apenas pela sua beleza e aspecto maravilhoso.

"... oscillating chemical dynamics has been the subject of numerous articles in chemical education journals, but most often these works have focused on the demonstration value of oscillating reactions rather than on actually using them as part of the teaching laboratory". (p. 865)

A proposta da atividade laboratorial foi avaliar as diferentes dinâmicas reacionais para diferentes tipos de catalisadores e fazer uso de interface computacional para avaliar o fenômeno, e em nenhum momento os autores fazem menção a utilizar da aparência do

fenômeno para explorá-lo com os alunos. Merece nota que os alunos foram levados a construir, com auxílio do professor, um modelo cinético para interpretar os dados obtidos experimentalmente.

Além disso, os autores superaram também o obstáculo animista. Ao invés do termo *tempo de incubação*, utilizaram a expressão *período de indução*, quando afirmam “*An induction period of approximately 2-10 min is necessary before the oscillations of the Ce⁴⁺/Ce³⁺ concentration will occur*”.

STRIZHAK, P.; MENZINGER, M. Nonlinear Dynamics of the BZ Reaction: A Simple Experiment that Illustrates Limit Cycles, Chaos, Bifurcations, and Noise. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 868-873. 1996.

Abstract: A simple batch experiment is described that involves the recording of time series of the oscillating Belousov-Zhabotinsky reaction. It displays a variety of dynamical phenomena that illustrate some of the key concepts of nonlinear dynamics. As the system evolves, it drifts slowly through parameter space and encounters on its path different dynamical domains and their associated, transient bifurcations. The qualitative study of these phenomena teaches, amongst others, the important concepts of separation of time scales and the notion of dynamics on a given, relevant time scale, of limit cycle and chaotic oscillations, super- and subcritical Hopf bifurcations and of the time-varying response of the system to external noise.

Para o quinto artigo não foi encontrado o obstáculo da experiência primeira. Houve uma maior preocupação em explorar conceitualmente o fenômeno e ilustrar as diferentes manifestações da complexidade em química, como ciclo limites, caos, bifurcações e ruído.

Já o obstáculo animista foi recorrente neste trabalho, como no trecho a seguir:

‘Periodic and aperiodic oscillations may be born through a variety of bifurcations. Periodic oscillations (limit cycles) may be born through a Hopf bifurcation where the stable fixed point loses its stability and the system is forced to a new attractor: the limit cycle.’(p. 869).

Além deste trecho, a palavra *born* aparece ainda mais três vezes nesta página para indicar o surgimento do ciclo limite. Além disso, na página 872 temos mais uma vez o mesmo obstáculo, quando os autores dizem “... *the sudden birth of the cycle through a subcritical Hopf bifurcation...*”. E ainda relativo a este obstáculo, temos o nome da seção da página 872: “*The death of limit cycles*”. Como já explicitado anteriormente, o uso de características de

seres vivos para descrever fenômenos científicos configura-se em obstáculo epistemológico do tipo classificado como obstáculo animista.

Por fim, no final deste trabalho foi encontrado ainda outro tipo de obstáculo epistemológico. Quando os autores concluem o trabalho, apresentam uma lista de sugestões a serem levadas em conta, entre elas: “ *Consider different substrates of the BZ system (different “fuels” and catalysts*” (873). Apesar de colocado entre aspas, o termo combustível para denominar diferentes possíveis substratos para a reação se configura como o uso de metáforas indevidas. Portanto, classifica-se o mesmo enquanto um obstáculo epistemológico do tipo *obstáculo verbal*.

SCHMITZ, G.; ANIC, L. & S.; CUPIC, Z. The Illustration of Multistability W. Journal of Chemical Education, v. 77, n. 11, p. 1502-1505. 2000

Abstract: Multistability, a phenomenon that can appear in certain nonlinear systems, is usually described by discussing the possible steady-state solutions of some nonlinear process as given by an abstract mathematical model having a single variable and one or more control or bifurcation parameters. In the present paper, the model of a real reaction is offered: the illustration of multistability is carried out on a model for the hydrogen peroxide decomposition into water and oxygen in the presence of iodate and hydrogen ions, the Bray-Liebafsky oscillatory reaction.

No sexto artigo foi encontrado apenas uma ocorrência de obstáculo epistemológico. Ao tentar explicar o fenômeno da multi-estabilidade - recorrente em sistemas químicos complexos - os autores fazem uso de uma analogia através de um exemplo mecânico, de uma bola em uma região que possui um pico local e dois vales, chamados de posição a e b. Para exemplificar a bi-estabilidade química, ele aponta como exemplo uma situação gravitacional: “*A mechanical illustration is given by the following sketch. The ball can come to rest either in position “a” or in position “b”* (p. 1502). Tal analogia também é classificada como obstáculo epistemológico do tipo *obstáculo verbal*.

PRYPSZTEJN, H.; MULFORD, D. R.; STRATTON, D. Tested Demonstrations Chemiluminescent Oscillating Demonstrations: The Chemical Buoy, the Lighting Wave and the Ghostly Cylinder. Journal of Chemical Education, v. 82, n. 1, p. 53-54. 2005

Abstract: Oscillating reactions have been extensively used in chemical demonstrations. They involve several chemical concepts about kinetics, catalysts, and thermodynamics. The spontaneous cyclic color change of a solution is an attraction in any educational-level course. Chemiluminescent reactions are also among the most fascinating demonstrations and have been successfully used as a pedagogical tool. In this article, a

chemiluminescent oscillating reaction is presented in which a chemiluminescent substance (luminol) interacts with a chemical oscillator producing an oscillating chemiluminescence. This demonstration has been successfully performed in basic chemistry courses to arouse interest and curiosity in students. This demonstration fascinates audiences and in courses for science majors it is an excellent way to introduce complex concepts such as far-from-equilibrium conditions, nonlinear dynamics and bifurcation, and chaos theories.

Finalmente, no sétimo artigo observamos que mesmo o artigo mais recente dos artigos analisados ainda está carregado dos mais primitivos obstáculos epistemológicos. Neste trabalho, isso começa a se evidenciar quando os autores afirmam que “*A chemical reaction involving a light-emitting oscillator is a valuable educational and pedagogical tool to improve students’ interest and attention about several chemistry concepts*” (p. 53). Em seguida, os autores apresentam sua proposta: utilizar uma modificação de uma reação química oscilante em que as espécies envolvidas interagem com uma substância conhecida por suas propriedades fotoluminescentes, o luminol.

“ this article, three different demonstrations of a chemiluminescent oscillating reaction in which a chemiluminescent substance (luminol) interacts with a known chemical oscillator producing oscillating chemiluminescence, are presented. These demonstrations have been successfully performed in basic chemistry courses to arouse interest and curiosity in students. Demonstrations fascinate audiences and in courses for science majors they are an excellent way to introduce complex concepts as far-from-equilibrium conditions, nonlinear dynamics and bifurcation, and chaos theories” (p. 53).

Fica evidente após a leitura do artigo que a motivação principal desta modificação nem de longe foi a de explorar aspectos fotoquímicos desta variante das reações químicas oscilantes, mas na verdade criar uma apresentação ainda mais calcada na valorização dos aspectos mágicos e fantástico da química. Já no título é esse o aspecto evidenciado, pois os autores inventam três nomes fantasiosos e chamativos para as variantes das reações químicas oscilantes que eles desenvolveram. Mais uma vez, foi identificado obstáculo epistemológico do tipo classificado como *obstáculo da experiência primeira*.

Na tabela a seguir, segue um quadro resumo dos tipos de obstáculos encontrados e seu respectivo número de ocorrências para cada um dos artigos analisados, os quais foram identificados pela letra de referência dada no início da seção.

Tabela 1: Tipo de obstáculos epistemológicos em cada artigo e respectivo número de ocorrências.

Tipo de Obstáculo	Nº de ocorrência dos obstáculos						
	A	B	C	D	E	F	G
experiência primeira	2	1	-	-	-	-	5
conhecimento geral	-	1	-	-	-	-	-
obstáculo verbal	-	-	4	-	1	1	-
conhecimento unitário e pragmático	-	-	-	-	-	-	-
obstáculo animista	-	2	-	-	6	-	-

O obstáculo da experiência primeira e o obstáculo verbal estavam presentes no maior número de artigos, pois foram encontrados em três artigos cada. Mas em termos absolutos, o obstáculo da experiência primeira foi encontrado oito vezes, enquanto o obstáculo verbal foi encontrado seis vezes no total. O obstáculo animista também foi encontrado oito vezes, mas esteve presente em menor número de artigos que o obstáculo da experiência primeira e o obstáculo animista, tendo sido identificado em dois artigos. O obstáculo do conhecimento geral foi encontrado apenas uma vez em apenas um artigo.

O obstáculo do conhecimento unitário e pragmático não foi encontrado. Acreditamos que no caso dos sistemas químicos oscilantes deve naturalmente ocorrer menor incidência deste tipo de obstáculo, quando comparada com a incidência deste mesmo obstáculo em textos didáticos de outras áreas do conhecimento. Isso por que parece ser intrínseco da área das ciências complexas a necessidade de superar um paradigma simplificador e utilitarista para uma compreensão dos fenômenos e aceitação dos conceitos em geral. Dessa forma, nossa hipótese é que pesquisadores da área de sistemas químicos oscilantes necessariamente precisam ter superado a barreira do conhecimento unitário e utilitarista para só então desenvolver seus trabalhos.

Não conseguimos estabelecer uma relação, caso esta exista, entre o tipo de atividade didática proposta nos artigos e os tipos de obstáculos epistemológicos encontrados. Ainda assim, não é possível afirmar simplesmente que a presença de determinados obstáculos estejam relacionados somente a um fator de qualidade dos autores.

Por fim, superou nossas expectativas a quantidade de obstáculos epistemológicos encontrados nos artigos científicos.

4.2.3 LIVROS DIDÁTICOS

Os livros didáticos analisados foram os seguintes:

- I. MOON, F. C. **Chaotic and Fractal dynamics**. New York: Ed. Wiley interscience, 1992. p. 212 – 214.
- II. FIEDLER-FERRARA, N. **Caos. Uma introdução**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1995. p 206 – 216.
- III. ALLIGOOD, K. T.; SAUER, T.D.; e YORKE, J. A. **Chaos. An introduction to dynamical systems**. New York: Ed. Springer-Verlag, 1996. p. 143 – 147.
- IV. PRIGOGINE, I., KONDEPUDI, D. **Termodinâmica. Dos motores térmicos às estruturas dissipativas**. Lisboa: Instituto Piaget, 1999. p. 341 – 343.

Analisamos todas as partes voltadas ao tema dos sistemas químicos oscilantes de todos os livros mencionados. Contrariando nossas expectativas, apenas um obstáculo epistemológico foi encontrado na análise de todos os quatro livros didáticos. No livro de FIEDLER-FERRARA (1995), no trecho:

“Interessantes e surpreendentes efeitos não-lineares são verificados quando os reagentes da reação de BZ são postos em contacto: aparecem estruturas dissipativas sob forma de anéis, espirais ou ondas circulares concêntricas (ondas químicas); observam-se também oscilações temporais com padrões mais ou menos complexas, e, em determinadas condições, padrões caóticos.” P. 206

Identificamos o termo ondas químicas novamente como obstáculo epistemológico do tipo classificado como obstáculo verbal.

Todos os livros analisados apresentaram uma descrição matemática rigorosa do fenômeno dos osciladores químico, o que explica em grande medida a ausência de obstáculos epistemológicos. Entretanto, as obras analisadas se arriscaram muito pouco e abordar aspectos mais paradigmáticos dos fenômenos. Uma leitura histórica também não foi encontrada. De qualquer forma, dentro da proposta de análise a que este trabalho se propôs, pode-se afirmar que os livros didáticos escolhidos nos cursos de graduação apresentaram um nível ótimo de racionalização.

As causas da superioridade dos livros em relação aos artigos deveriam ser estudadas.

4.2.4 LIVROS DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Os livros de divulgação científica analisados foram os seguintes:

- i. GLEICK, J. *Caos. A criação de uma nova ciência*. Rio de Janeiro: Ed. Elsevier, 1989. p. 275.
- ii. STEWART, I. *Será que Deus joga dados? A nova matemática do caos*. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar. 1991. p. 201 – 204.
- iii. SCOTT, S. *Clocks and chaos in chemistry*. In: HALL, N. (Ed). *The new scientist guide to chaos*. Penguin Books. 1992. p. 108 – 121.
- iv. STROGATZ, S. *Sync. The emerging science of spontaneous order*. New York: Ed. Hiperion, 2003. p. 212 – 228.

No trecho do primeiro livro (GLEICK, J. **Caos. A criação de uma nova ciência**. Rio de Janeiro: Ed. Elsevier, 1989. p. 275) foi encontrado apenas o obstáculo que segue:

“Ondas químicas que se propagam para fora em círculos concêntricos, e até mesmo ondas espiraladas... padrões semelhantes foram observados em pratos de milhões de amebas. Artur Winfree teorizou que tais ondas são análogas às ondas de atividade elétrica que atravessam os músculos do coração, regular ou irregularmente.” (P. 275).

A presença do termo onda química, que apareceu neste trecho duas vezes, mais uma vez foi classificada como um obstáculo epistemológico do tipo classificado como obstáculo verbal.

No trecho do segundo livro (STEWART, I. *Será que Deus joga dados? A nova matemática do caos*. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar. 1991. p. 201 – 204) foi também encontrado o mesmo obstáculo, quando o autor afirma, sobre os experimento de Zhabotinsky: “Ele mostrou que ondas circulares e espiraladas podiam se formar se a mistura química fosse espalhada numa fina camada.” (P.202). Este obstáculo epistemológico também foi classificado como obstáculo verbal.

No trecho do terceiro livro (SCOTT, S. *Clocks and chaos in chemistry*. In: HALL, N. (Ed). **The new scientist guide to chaos**. Penguin Books. 1992. p. 108 – 121) acreditamos que o nome do capítulo faz uso também de uma analogia, nos termos do já exposto anteriormente para obstáculos verbais. Portanto, o termo relógio em química que aparece no título do capítulo e ainda mais uma vez no corpo do texto foi classificado como obstáculo epistemológico do tipo classificado como obstáculo verbal.

Em seguida, quando o autor afirma: “most chemistry believe that the course of a chemical reaction is always predictable. But some catalytic reactions in both inorganic and organic chemistry can behave in bizarre and unruly ways” (p. 108). Acreditamos que o termo bizarro para designar uma reação química configure a presença de um obstáculo epistemológico, na medida em que representa a inclusão de julgamentos e valores pessoais relativos à esfera da experiência afetiva. Foi identificado portanto obstáculo epistemológico do tipo obstáculo da experiência primeira.

Além disso, ainda nesta sentença, o termo unruly indica que os fenômenos oscilatórios se aparentam a algo fora das leis da natureza. Isso nos leva a crer que tal comportamento pode ser classificado como obstáculo epistemológico do tipo obstáculo do conhecimento unitário. Por fim, cabe citar o trecho “Another kind of chemistry where the rate can increase or decrease dramatically and sometimes discontinuously in response to small smooth changes in experimental conditions are the intriguing “clock” reactions.” (p.109). Este obstáculo verbal já foi computado, mas o que nos chama a atenção é que o autor faz referência duas vezes a esta analogia sem em nenhum momento explicar o motivo de chamar tais reações assim.

No trecho do quarto e último livro (STROGATZ, S. **Sync. The emergin science of spontaneous order**. New York: Ed. Hiperion, 2003. p. 212 – 228) foi encontrado o maior número de inadequações. Primeiramente, no trecho:

“Normally, the most amusing outcome you can hope for in a chemistry experiment is a puff of smoke or a noxious odor. In comparison, Zhabotinsky soup offers nonstop entertainment. When brewed according to its original recipe, its acts like a spontaneous oscillator, the chemical analog of pacemaker cells. “ (p. 212 - 213).

Identificamos o uso da palavra “*entertainment*” como obstáculo epistemológico do tipo obstáculo da experiência primeira, na medida que encara o fenômeno enquanto um entretenimento. Em seguida, a analogia entre os osciladores químicos e a expressão “*pacemaker cells*” foi classificada como sendo um obstáculo epistemológico do tipo obstáculo verbal.

Agora, trecho em que o autor encontra o auge do seu romantismo: “At the molecular scale, the performance would appear even more impressive... trillions of coupled oscillators, hoofing in perfect sync, the largest line dance ever assembled.” (p. 213). Obstáculo experiência primeira foi associado ao termo *impressive*, e os termos *Hoofing* e *dance* ao obstáculo verbal.

Na sequência, no trecho “*If you pour a thin layer of the red soup... it suddenly launches a blue circular wave that expands and spreads like a grassfire*” (p. 213), o termo *grassfire*, que aparece no texto ainda outra vez, foi identificado como obstáculo verbal. E por fim, o termo *wave* mais uma vez foi classificado como um obstáculo verbal, sendo que este termo é identificado ainda mais duas vezes no texto.

Cumprе ressaltar que esta analogia, *grassfire*, já foi apontada na página 43 deste trabalho.

Tabela 2: Tipo de obstáculos epistemológicos em cada livro de divulgação e respectivo número de ocorrências.

OBSTÁCULOS	Nº DE OCORRÊNCIA DOS			
	i	ii	iii	iv
Tipo de Obstáculo				
experiência primeira	-	-	1	3
conhecimento geral	-	-	-	-
obstáculo verbal	2	1	2	8
conhecimento unitário e pragmático	-	-	1	-
obstáculo animista	-	-	-	-

O obstáculo verbal foi o de maior presença no total de trechos de livros de divulgação, tendo sido registrado treze vezes. Em seguida, o obstáculo de maior presença foi o obstáculo da experiência primeira, com quatro aparições, seguida do obstáculo unitário, com uma apenas.

CAPITULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação inicial deste trabalho era desenvolver estratégias e ferramentas pedagógicas úteis ao ensino de sistemas químicos oscilantes. Foi escolhido o referencial bachelardiano como referencial teórico. O conceito de obstáculos epistemológicos foi proposto como ferramenta de abordagem da relação ensino aprendizagem dos sistemas químicos oscilantes. O objetivo do trabalho era verificar a viabilidade da utilização do conceitual teórico dos obstáculos epistemológicos como ferramenta de análise de textos didáticos voltados ao ensino de sistemas químicos oscilantes.

Todos os tipos de obstáculos epistemológicos listados foram identificados ao menos uma vez em algum dos textos. Foi detectada uma grande presença de obstáculos epistemológicos do tipo obstáculo verbal nos textos de livros de divulgação de sistemas complexos, o que era esperado, haja vista a grande cultura de utilização de metáforas em textos de divulgação. Entretanto, mostrou-se preocupante o número de obstáculos epistemológicos encontrados em artigos científicos da área.

Algumas possibilidades ficaram em aberto neste trabalho. A análise histórica dos desenvolvimentos dos sistemas químicos oscilantes, à luz do referencial teórico de Bachelard poderá revelar mais informações importantes. A análise dos artigos não apontou nenhum processo de mudança com o tempo dos tipos de obstáculos epistemológicos observados. Ainda sim, isso não esgota a possibilidade de observação desta dinâmica, pois a amostragem de artigos na nossa pesquisa não abrangeu a totalidade das obras.

Uma futura análise dos perfis conceituais de alunos em contextos de aprendizagem de sistemas químicos oscilantes poderá complementar os resultados e enriquecer esse debate. Além disso, a análise prévia da presença dos obstáculos epistemológicos relativos aos sistemas químicos oscilantes nos alunos poderia favorecer melhores estratégias para superação destes obstáculos

O uso do referencial bachelardiano na análise em textos didáticos mostrou-se como uma interessante ferramenta para a caracterização de obstáculos no ensino de sistemas químicos oscilantes. Vale ressaltar que esta abordagem era até então inédita. Outros temas pertinentes aos sistemas complexos poderiam também se beneficiar desta abordagem.

REFERÊNCIAS

ALLIGOOD, K. T.; SAUER, T.D.; e YORKE, J. A. **Chaos. An introduction to dynamical systems**. New York: Ed. Springer-Verlag, 1996. p. 143 – 147.

ARECCHI, F.T. Introduction, in SERRA, R.; ANDRETTA, M.; COMPIANI, M. & ZANARINI, G. (orgs.), **Introduction to the Physics of Complex Systems**, Oxford: Pergamon. 1986. p. i-xi.

AROCA, P.; AROCA, R. Jr. Chemical oscillations: A microcomputer-controlled experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 64, n. 12, p. 1017-1020. 1987.

BACHELARD, G. **Epistemologia** : Trechos escolhidos por Dominique Lecourt. Rio de Janeiro: Zahar Editoras, 1977.

_____. **O novo espírito científico**. Rio de Janeiro: Ed. Tempo Brasileiro, 1985.

_____. **A Filosofia do Não – Filosofia do Novo Espírito Científico**. Editorial Presença, 1991.

_____. **A Formação do Espírito Científico**. 1a ed. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BENINI, O.; CERVELLATI, R.; FETTO, P.; CIAMICIAN, C. G. The BZ Reaction: Experimental and Model Studies in the Physical Chemistry Laboratory. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 865-868. 1996.

BRAY, W. C. A periodic reaction in homogeneous solution and its relation to catalysis. **Journal of the American Chemical Society**, 1921.

CAINE, R. N. ; CAINE, G. **Making Connections: Teaching and the Human Brain.** Alexandria, Va.: A.S.C.D. , 1991.

Coleção Os Pensadores. **Os Pré-socráticos.** São Paulo: Nova Cultural. 1996.

DAVI, B.; SUMARA, D. **Complexity and Education.** New Jersey: Lawrence Erlbaum, 2006.

DEB, B. M. Chemical Oscillations as an Undergraduate Experiment. **Journal of Chemical Education**, v. 54, n. 4, p. 236-237. 1977.

EPSTEIN, I. R.; POJMAN, J. A.; STEINBOCK, O. Introduction: Self-organization in nonequilibrium chemical systems. **Chaos**, v. 16, n. 3, 2006.

FARIA, R. B. Introdução aos sistemas químicos oscilantes. **Química Nova**, v. 18, n. 3, p. 281–294. 1995.

FIEDLER-FERRARA, N. **Caos. Uma introdução.** São Paulo: Ed. Edgard Blucher. p 206 – 216. 1995.

FIEDLER-FERRARA,N.;MATTOS,C. Seleção e organização de conteúdos escolares: recortes na pandisciplinaridade. In: Vianna,D.M. et al. (Org). Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Sociedade Brasileira de Física. Águas de Lindóia, SP. 2002 (**CD-ROM, arquivo: C081_2**).

FIELD, R. J.; NOYES, R. M. Oscillations in chemical systems. IV. Limit cycle behavior in a model of a real chemical reaction. **The Journal of Chemical Physics**, v. 60, n. 5, p. 1877 - 1884, 1974.

FIELD, R. J.; BURGER, M. **Oscillations and travelling waves in chemical systems.** 1. ed. New York: Wiley-Interscience, 1985.

GLEICK, J. **Caos. A criação de uma nova ciência**. Rio de Janeiro: Ed. Elsevier, 1989. p. 275.

JAPIASSU, H. **Para ler Bachelard**. Rio de Janeiro: F Alves, 1976.

LOPES, A. R. C. Livros didáticos: obstáculos ao aprendizado da ciência química – obstáculos animistas e realistas, **Química Nova**, São Paulo, v.15, n.3, p. 254-261, 1992.

_____. Contribuições de Gaston Bachelard ao Ensino de Ciências. **Enseñanza de las Ciencias**, 11 (3), 324-330, 1993.

_____. Bachelard: o filósofo da desilusão. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, 13(3), 248-273, 1996.

LOPES, A. C. A Disciplina Química: Currículo, Epistemologia e História. **Episteme**. v.3, n. 5, p119-142, 1998.

LOTKA, A. J. Contribution to the theory of periodic reactions. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 14, n. 3, p. 271–274, 1910.

MATURANA,H.; VARELA,F.J. **A árvore do conhecimento**. São Paulo: Athena, 2001.

MARTINS, A. F. **Tempo Físico, a Construção de um Conceito**. Natal: Ed. EDUFRN, 2007.

MARTINS, R. **O Universo: teorias sobre sua origem e evolução**. São Paulo: Editora Moderna. 1994.

MOON, F. C. **Chaotic and Fractal dynamics**. New York: Ed. Wiley interscience, 1992. p. 212 – 214.

MORIN, E.; LE MOIGNE, J. **A inteligência da complexidade**, 3 ed. São Paulo: Peirópolis, 2000.

MORIN, E. **O Método - I. A natureza da natureza (1977); II. O conhecimento do conhecimento (1986).**

NOYES, R. M.; FIELD, R. J.; KÖRÖS, E. Oscillations in chemical systems. I. Detailed mechanism in a system showing temporal oscillations. **Journal of the American Chemical Society**. v. 94, n. 4, p. 1394 - 1395, 1972.

PARENTE, L.T. DE S. **Bachelard e a Química: No Ensino e na Pesquisa**. Fortaleza: Edições UFC, 1990.

PEREIRA, M. G. **Epidemiologia - Teoria e Prática**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1995.

POJMAN, J. A.; CRAVEN, R.; LEARD, R.C. Chemical Oscillations and Waves in the Physical Chemistry Lab. *Journal of Chemical Education*, v. 71, n. 1, p. 84-90. 1994.

PRIGOGINE, I. & ALLEN, P.M. in SCHIEVE, W.C. & ALLEN, P.M. (orgs.), **Self-Organization and Dissipative Structures**, Austin: Ed: University of Texas Press. 1982. p. 3-39.

PRIGOGINE, I., KONDEPUDI, D. **Termodinâmica. Dos motores térmicos às estruturas dissipativas**. Lisboa: Instituto Piaget, 1999. p. 341 – 343.

PRYPSZTEJN, H.; MULFORD, D. R.; STRATTON, D. Tested Demonstrations Chemiluminescent Oscillating Demonstrations: The Chemical Buoy, the Lighting Wave and the Ghostly Cylinder. **Journal of Chemical Education**, v. 82, n. 1, p. 53-54. 2005.

QUEIROZ, G.R.P.; BARBOSA, M.C.L. Conhecimento científico, seu ensino e aprendizagem: Atualidade do construtivismo. **Ciência e Educação**. V. 13, n 3, 2007.

SANTOS, A. Complexidade e transdisciplinaridade em educação: cinco princípios para resgatar o elo perdido. **Revista Brasileira de Educação**. v. 13 n. 37 jan./abr. 2008.

SCHMITZ, G.; ANIC, L. & S.; CUPIC, Z. The Illustration of Multistability W. **Journal of Chemical Education**, v. 77, n. 11, p. 1502-1505. 2000

SCOTT, S. Clocks and chaos in chemistry. In: HALL, N. (Ed). **The new scientific guide to chaos**. Penguin Books. 1992. p. 108 – 121.

STENGERS, I.; PRIGOGINE, I. **A nova aliança**. 3ed. Brasília: Ed UnB, 1997.

STEWART, I. **Será que Deus joga dados? A nova matemática do caos**. Rio de Janeiro: Ed. Jorge Zahar. 1991. p. 201 – 204.

STRIZHAK, P.; MENZINGER, M. Nonlinear Dynamics of the BZ Reaction: A Simple Experiment that Illustrates Limit Cycles, Chaos, Bifurcations, and Noise. **Journal of Chemical Education**, v. 73, n. 9, p. 868-873. 1996.

STROGATZ, S. **Sync. The emergin science of spontaneous order**. New York: Ed. Hiperion, 2003. p. 212 – 228.

WHITESIDES, G.M.; ISMAGILOV, R.F. Complexity in Chemistry, **Science**, v. 284, p. 89-92. 1999.

WINFREE, A. T. The Prehistory of the Belousov-Zhabotinsky Oscillator. **Journal of the Chemical Education**, v.61, n. 8, 1984.

ZANETIC, J. **FTM 405 – Evolução dos Conceitos da Física, Notas de aula**. São Paulo: IFSC/USP. 2008.

ZHABOTINSKI, A. M. The early period of systematic studies of oscillations and waves in chemical systems. In: . **Oscillations and travelling waves in chemical systems**. New York: Wiley-Interscience, 1985. p. 1 - 6.
