

TRANSDISCIPLINARIDADE E A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA: RELATOS DE EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS

TRANSDISCIPLINARITY AND PHYSICS MODERN AND CONTEMPORARY EXPERIENCE REPORTS DIDACTIC

Romildo de Albuquerque Nogueira - UFRPE

Paulo Fernando Lima Souza - Colégio Presbiteriano Agnes Erskine

Rubens Filipe de Arruda Amorim Oliveira - Faculdade Joaquim Nabuco

RESUMO

O objetivo deste trabalho é relatar duas experiências didáticas relacionando Transdisciplinaridade (TransD) e princípios da Física Moderna e Contemporânea. Na Física Moderna, o foco foi o Princípio da Dualidade da Luz e, na Física Contemporânea, a Teoria dos Sistemas Complexos, também conhecida como Teoria do Caos. Na primeira experiência didática (oficina), foi promovida uma discussão, com estudantes de graduação em Física, sobre as propriedades ondulatórias e corpusculares da luz e sua relação com a TransD. Essa oficina constituiu-se de três experimentos físicos (a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes) e de uma discussão sobre a TransD, focando, principalmente, na lógica do terceiro incluído. Na segunda oficina, foi proposta uma prática pedagógica para ensinar a Teoria dos Sistemas Complexos (Caos) para estudantes de graduação. Nessa oficina, foi produzido e discutido um curto documentário acerca do Caos no senso comum. Em seguida, rotinas computacionais foram desenvolvidas e utilizadas para discutir as concepções científicas sobre o Caos. Para testar a eficácia das oficinas, aplicou-se um instrumento de avaliação antes e depois da atividade. Na primeira oficina, foi possível observar, nas falas dos estudantes acerca do Princípio da Dualidade da Luz, que inicialmente estas eram desprovidas de uma lógica que respaldasse tal Princípio, emergindo após a oficina algumas relações coerentes entre o Princípio da Dualidade e a TransD. Na segunda oficina, as respostas prévias dos estudantes mostraram uma diversidade de concepções resultantes do senso comum da palavra Caos. Após a realização da oficina, alguns estudantes conseguiram estabelecer diferenças entre o Caos no senso comum e o conceito científico de Caos. Esperamos que os relatos das experiências didáticas relacionando a transdisciplinaridade e a Física Moderna e Contemporânea sejam inspiradores para novas experiências didáticas com a TransD.

Palavras-chave: Transdisciplinaridade. Princípio da Dualidade da Luz. Teoria do Caos. Sistemas Complexos. Experimentos Didáticos.

ABSTRACT

The goal of this work is reporting two educational experiences relating the Transdisciplinarity (TransD) and principles of Physics Modern and Contemporary. In Modern Physics the focus was the principle the duality of Light and in Contemporary Physics Theory of complex systems also known as chaos theory. In the first experiment teaching (workshop) was promoted a discussion, with students from, graduate in physics, about the properties wave and corpusculares of light and its relation with the TransD. This workshop was consisting of three physical experiments (the wave tub the double-slit de Young and the Crookes radiometer) and a discussion about TransD, focusing, mainly, the logic of the third included. In the second workshop proposal a practice pedagogical for teach the Theory of the Systems Complex (Caos) for undergraduate students. In this workshop, was produced and discussed a short documentary on the chaos in the common sense. Then, Computational routines were developed and used for discuss the scientific conceptions about the Chaos. To test the effectiveness of the workshops was applied an assessment tool before and after the activity. For first workshop It was possible to observe the lines of students about the principle of Duality of light, that initially were devoid of a logic that support this principle emerging after the workshop some consistent relationships between the principle of duality and the TransD. In the second workshop answers n advance of the students showed a diversity of resulting conceptions the common sense of the word chaos. After the workshop some students succeeded in establishing differences between the chaos common sense and the scientific concept of chaos. We hope that the reports of the educational experiences relating the transdisciplinarity and modern physics and are Contemporary inspiring to new educational experiences with the TransD.

Keywords: Transdisciplinarity. Principle of Duality of light. Chaos theory. Complex Systems. Educational Experiments.

INTRODUÇÃO

Um dos tópicos de grande importância na Física Moderna é o Princípio da Dualidade da Luz, o qual afirma que a luz possui uma natureza dual, comportando-se, em alguns fenômenos, como uma onda e, em outros, como partícula (TIPLER; MOSCA, 2006). No entanto, a lógica aristotélica, tão utilizada no nosso cotidiano, é inadequada para explicar o Princípio da Dualidade da Luz, pois se respalda na exclusão, na lógica binária, segundo a qual a luz deveria comportar-se ou como uma onda ou como uma partícula (BARTHEM, 2005). A TransD, através da **lógica do terceiro incluído** (NICOLESCU, 2005), propõe uma lógica que, diferentemente da aristotélica, permite, não necessariamente, a exclusão dos contraditórios A e não A e, por isso, é possível que possa trazer contribuição na compreensão do Princípio da Dualidade da Luz. Para aprofundar essa discussão, foi realizada uma oficina intitulada **Princípio da Dualidade da Luz e a TransD**, implementada através de experimentos físicos (a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes) que contemplam o comportamento da luz, como onda e como partícula, e as suas possíveis relações com a TransD.

Na Física Contemporânea, o foco do estudo foi a Teoria dos Sistemas Complexos, mais conhecida como Teoria do Caos. A Teoria do Caos tem sido utilizada em estudos geofísicos (SIVAKUMAR, 2004), biológicos (STAM, 2005), da engenharia de sistemas (CURRY, 2012) e de outros campos do conhecimento. Devido à sua importância para a ciência hoje, a Teoria do Caos requer metodologias de ensino motivadoras, que unam teoria e prática e que sejam condizentes com as demandas tecnológicas. Nessa perspectiva, uma oficina foi construída tendo como principal objetivo ensinar a Teoria do Caos para estudantes de graduação em Física e Matemática, por meio de uma estratégia de ensino que associa conceitos de Caos do senso comum e do científico. No tocante ao senso comum, foi produzido um vídeo sobre o conceito de Caos, utilizando recursos de multimídia (HUNG *et al.*, 2014; TORRES-RAMÍREZ *et al.*, 2014; XU, 2013). Para introduzir a concepção científica sobre Caos, foram realizadas práticas baseadas em computação

científica, que são rotinas computacionais construídas para resolver e mostrar gráficos de equações de sistemas dinâmicos não lineares.

OS TRÊS PILARES DA TRANSDISCIPLINARIDADE

A TransD está apoiada em três pilares: a lógica do terceiro incluído, os diferentes níveis de realidade e a complexidade (NICOLESCU, 2005).

A lógica do terceiro incluído

Interpretar a luz como onda e partícula é de fato contraditório quando utilizamos a lógica clássica ou aristotélica (NICOLESCU, 2005). Essa lógica é baseada em três axiomas:

1. o axioma da identidade: A é A ;
2. o axioma da não contradição: A não é não A ;
3. o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T (T de “terceiro incluído”) que é ao mesmo tempo A e não A .

Se nos apropriarmos da lógica clássica, chegamos à conclusão de que os pares contraditórios (luz-onda e luz-partícula), colocados em evidência pela Física Quântica, são mutuamente excluídos, pois não podemos afirmar, ao mesmo tempo, a validade de um objeto e seu contraditório: A e não A .

A Mecânica Quântica trouxe no seu desenvolvimento a necessidade de uma nova lógica, chamada de lógica “quântica”. O surgimento desta deveu-se à necessidade de resolver os paradoxos mal resolvidos pela Mecânica Quântica e tentar, diante das possibilidades, chegar a uma lógica que pudesse se adequar aos princípios quânticos. Novas lógicas quânticas foram construídas, introduzindo-se um princípio de não contradição com vários valores de verdade no lugar do par binário (A , não A).

Os níveis de realidade

Para Nicolescu (2005), a compreensão do axioma do terceiro incluído torna-se compreensível somente quando é introduzida a noção de “níveis de realidade”. Os diferentes níveis de realidade dizem respeito aos diversos níveis nos quais o universo se organiza e pode ser observado, tais como: o nível nuclear, o nível quântico, o nível macroscópico etc. É importante compreender que as leis físicas que regem os fenômenos naturais podem divergir nesses níveis de realidade distintos. Por exemplo, dois prótons tanto podem se atrair como se repelir, dependendo do nível de realidade no qual o fenômeno é observado. No nível macroscópico, dois prótons se repeliriam, regidos por forças coulombianas, porém, em nível nuclear, sofreriam atração, devido à presença das forças fortes. Nesse sentido, questiona-se: dois prótons se atraem ou se repelem? Como resposta, observa-se: depende do nível de realidade. Portanto, se permanecermos num único nível de realidade, o fenômeno da dualidade da luz aparecerá como um conflito entre dois elementos contraditórios (ex.: luz-onda (A) e luz-corpúsculo (não A)). O terceiro incluído, o estado T, é exercido em outro nível de realidade, quando aquilo que surge como desunido (luz-onda ou luz-corpúsculo) está, de fato, unido (*quantum* – luz-onda e luz-corpúsculo) e o que parece contraditório é percebido como não contraditório (BADESCU, 2001).

A lógica do terceiro incluído é não contraditória, no sentido de que o axioma da não contradição é perfeitamente respeitado, com a condição de que as noções de “verdadeiro” e “falso” sejam alargadas, de tal modo que as regras de implicação lógica digam respeito não mais a dois termos (A e não A), mas a três (A, não A e T) (NICOLESCU, 2005).

A lógica do terceiro incluído é uma lógica formal, da mesma maneira que qualquer outra lógica formal, pois suas regras traduzem-se por um

formalismo matemático coerente (NICOLESCU, 2005), assim, não elimina a lógica do terceiro excluído, apenas limita seu domínio de validade.

Complexidade: o caminhar para o Pensamento Complexo

Fragmentar o conhecimento para melhor compreendê-lo, isto é, entender a parte estritamente separada do todo, é um princípio do Pensamento Cartesiano que tenta reduzir racionalmente a complexidade dos sistemas naturais e sociais. Os métodos advindos dessa perspectiva filosófica, apesar das inúmeras críticas que os cercam, estão bastante imbricados no processo investigativo.

Vivemos sob o império dos princípios de *disjunção*, de *redução* e de *abstração* cujo conjunto constitui o que chamo de o “paradigma de simplificação”. Descartes formulou este paradigma essencial do Ocidente, ao separar o sujeito pensante (*ego cogitans*) e a coisa entendida (*res extensa*), isto é, filosofia e ciência, e ao colocar como princípio de verdade as ideias “claras e distintas”, isto é, o próprio pensamento disjuntivo. Este paradigma, que controla a aventura do pensamento ocidental desde o século XVII, sem dúvida permitiu os maiores progressos ao conhecimento científico e à reflexão filosófica; suas consequências nocivas últimas só começam a se revelar no século XX (MORIN, 2005, p. 11).

O emergir de um Pensamento Sistêmico, que ressalta a interação dos elementos constitutivos do sistema, sinalizou uma mudança de concepção científica e, conseqüentemente, uma inovação nos métodos. A visão sistêmica, segundo Behrens (2011, p. 89), “busca a superação da fragmentação do conhecimento [...]”. Essa visão ganhou força em torno de 1950 e 1960, quando o biólogo Ludwig von Bertalanffy desenvolveu estudos relativos aos diversos sistemas existentes e às suas teorias específicas, no tocante a natureza e evolução dos sistemas. Tais estudos culminaram em sua obra intitulada *Teoria Geral dos Sistemas (TGS)*, que se tornou uma valiosa referência para o

paradigma sistêmico ocidental. Essa teoria foi proposta como uma nova disciplina científica, que busca formular princípios válidos para todos os tipos de sistemas (BERTALANFFY, 2008).

A Teoria Geral dos Sistemas, portanto, é uma ciência geral da “totalidade”, [...] uma disciplina lógico-matemática, em si mesma puramente formal, mas aplicável às várias ciências empíricas. [...] Para as ciências que tratam de “todos organizados” teria uma significação semelhante à que tem a teoria das possibilidades para as ciências que se ocupam de “acontecimentos causais”. Esta também é uma disciplina matemática formal que pode ser aplicada a campos muito diversos, tais como a termodinâmica, a experimentação biológica e médica, genética, estatística de seguros de vida, etc. (BERTALANFFY, 2008, p. 62).

A proposta de Bertalanffy, além da grande importância que vem representando no campo das ciências naturais, sociais e humanas, foi ousada devido a seu caráter unificador das ciências e sua enorme extensão conceitual, porém devemos analisar cuidadosamente aspectos nebulosos de modelos generalistas e explicativos, aqueles que a teoria não atende por ausência de profundidade.

O filósofo Edgar Morin (1998, p. 257-259), em sua obra *Ciência com consciência*, aponta a fragilidade e carência conceitual de uma teoria dos sistemas cuja proposta é abarcar a generalidade do sistema. Morin (1998, p. 258) afirma que a teoria dos sistemas “[...] tende incessantemente a cair nos trilhos reducionistas, simplificadores, mutilantes, manipuladores de que se devia libertar e libertar-nos”. Apesar de não se referir diretamente à TGS nem ao seu autor, Bertalanffy, fica evidente a sua posição contrária, quando enfaticamente se opõe “[...] à teoria geral ou específica dos sistemas, ao afirmar que um paradigma sistêmico deveria estar presente em todas as teorias, sejam quais forem os seus campos de aplicação aos fenômenos” (MORIN, 1998, p. 259). Já o sociólogo ambientalista Enrique Leff (2010, p. 38-39), em

sua obra *Epistemologia Ambiental*, critica o projeto interdisciplinar dessa teoria com o seguinte argumento:

A TGS formula modelos aplicáveis a diferentes estruturas teóricas, mas ao reduzir a especificidade dos processos reais a suas características formais comuns, desconhecem-se os princípios materiais – “a natureza dos elementos ou força do sistema” – dos quais dão conta as diferentes ciências e que permitam apreender as causas e formas de articulação de seus efeitos, bem como a transformação destes fenômenos ao modificarem-se as estruturas materiais que os produzem.

Apesar dos questionamentos apontados por esses autores, reconhecemos que a TGS nos possibilitou uma discussão mais apurada sobre os sistemas, de modo que uma visão sistêmica emergiu de um mundo até então estritamente fragmentando (cartesiano). Bertalanffy inseriu no campo das ciências um novo conceito para sistemas quando, em sua busca por uma teoria de estudo geral, levou em conta não somente os elementos de um sistema, como também suas interações.

Devemos reconhecer que o pensamento linear (causa-efeito) cartesiano (fragmentador) nos levou ao desenvolvimento de saberes diversos, porém a necessidade de compreender as irregularidades na natureza e os fenômenos não lineares fez surgir novas concepções de pesquisa que permitem um olhar analítico mais contextualizado.

Não há dúvida de que o princípio de fragmentação acumulou conhecimentos, ocasionando um verdadeiro boom tecnológico hoje altamente visível e vivenciado. No entanto, no cerne desse progresso vem se praticando um outro tipo de relação com o conhecimento, na forma de rede de relações, o que sugere mudança conceitual e princípios mais adequados ao estágio atual de desenvolvimento da ciência (SANTOS, 2008, p. 73).

O filósofo Edgar Morin, atento a uma compreensão mais rica sobre as relações inerentes ao sujeito e ao mundo, desenvolveu a teoria da

complexidade, atualmente conhecida como Pensamento Complexo. Neste, a compreensão de Morin (2005, p. 13) sobre a Complexidade ganha duas dimensões:

A um primeiro olhar, a complexidade é um tecido (complexus: o que é tecido junto) de constituintes heterogêneas inseparavelmente associadas: ela coloca o paradoxo do uno e do múltiplo. Num segundo momento, a complexidade é efetivamente o tecido de acontecimentos, ações, interações, retroações, determinações, acasos, que constituem nosso mundo fenomênico.

Não se trata de descartar métodos antigos por meio de novos, mas de convidá-los a um diálogo permanente. Para compreendermos o Pensamento Complexo, Morin, Ciurana e Motta (2003) apresentam sete princípios (ou caminhos) metodológicos, os quais Mariotti (2000) denominou de operadores cognitivos: 1. Sistêmico ou organizacional: religa o conhecimento das partes com o conhecimento do todo e vice-versa; 2. Hologramático: a parte está no todo assim como o todo está na parte; 3. Retroatividade ou Circularidade: a causa age sobre o efeito, que, por sua vez, retroage sobre a causa; 4. Recursividade: é uma dinâmica autoprodutiva e auto-organizacional; 5. Autonomia/dependência: para manter sua autonomia, qualquer organização precisa da abertura ao ecossistema do qual se nutre, o qual transforma; 6. Dialógico: permite considerar lógicas que se complementam e se excluem; 7. Transacionalidade do sujeito/objeto: o sujeito e o objeto estão indissociavelmente interligados, ou seja, o sujeito, ao refletir sobre o objeto de estudo, o está construindo.

O caminho hologramático corresponde à noção de que o sistema e suas partes (que podem ser um subsistema) são vistos como igualmente relevantes, pois o todo está na parte e a parte está no todo. A princípio, parece contraditório declarar que a parte contém o todo, porém, há diversos exemplos no universo que ratificam essa afirmação. De acordo com Morin (2007, p. 74), “a ideia de holograma vai além do reducionismo que só vê as partes e do

holismo que só vê o todo”. Além de permitir um entendimento mais rico sobre a complexidade, esse princípio também é relevante para o ensino, pois a contextualização que se revela na dinâmica do vai e vem, da parte ao todo e do todo à parte possibilita a religação de saberes que estavam restritos pela disciplinarização (ARAUJO, 2011).

A recursividade diz respeito ao comportamento autorreplicador e circular do sistema. Sistemas gerados em cadeia por um algoritmo matemático computacional ou provenientes da natureza podem ser regidos pela recursividade. Daí, podemos perceber que “os sistemas complexos caracterizam-se, portanto, pela sua capacidade de autorregulação, estabelecendo seus próprios parâmetros, e de autorreprodução, multiplicando-se dentro dos parâmetros estabelecidos” (LEFFA, 2006, p. 37). Porém, aplicada aos sistemas de relações humanas, tal noção vai além da complexidade matemática identificada em sistemas dinâmicos, pois, como aponta Morin (2007, p. 74), “efeitos e produtos são ao mesmo tempo causas e produtores do que produz”. Da mesma maneira que um ensino produzido por sua lógica aristotélico-cartesiana se reproduz e se alimenta, é possível desenvolver um ensino baseado em uma lógica não cartesiana. Considerar essa possibilidade nos permite propor um ensino de matemática e de física coerente com o conhecimento da realidade complexa da natureza, descartando a simplificação.

No caminho dialógico, está presente a noção da necessária interação e coexistência de ordem e desordem para que ambas possam existir individualmente, o que Morin (2007, p. 74) denomina de “dualidade no seio da unidade”. De acordo com a definição de Morin, Ciurana e Motta (2003, p. 36), esse princípio corresponde à “associação complexa (complementar/concorrente/antagônica) de instâncias necessárias, conjuntamente necessárias à existência, ao funcionamento e ao desenvolvimento de um fenômeno organizado”. Isso significa que as contradições devem caminhar juntas para que um sistema faça sentido: “Já

dizia Pascal que o contrário da verdade não é a mentira, mas uma verdade contrária” (LEFFA, 2006, p. 36).

Os contrários se complementam com a noção dialógica, possibilitando uma aproximação conceitual até então inconcebível por uma lógica excludente. O ensino por meio da dialógica da tensão conceitual, provocada entre as possíveis controvérsias, pode promover um pensar complexo. Considerar tal dialógica, no entanto, não significa o fim das tensões, e sim mais uma possibilidade de aproximação entre elementos aparentemente díspares, tornando possível uma compreensão mais crítica do fenômeno. Da mesma forma, esse argumento pode ser aplicado ao ensino de física e de matemática, pois, ainda que os livros e currículos acadêmicos apresentem um sofisticado arcabouço de teoremas e simbologias, o contexto escolar se revela dinâmico e mais exigente quanto ao sentido do conhecimento proposto. Logo, este é passível de situações antagônicas, como, por exemplo, a relação entre concepção empírica do sujeito sobre um determinado conceito e aquela advinda dos campos científicos. A dialógica da contradição entre os sentidos empíricos e científicos pode ser um meio de promover um avanço no repertório conceitual do sujeito que aprende, uma vez que, como afirma Morin (1998, p. 203), “temos de aprender a pensar conjuntamente ordem e desordem”. Se existe uma dificuldade histórica dos pesquisadores, professores e alunos em entender ordem e desordem através de uma lógica “complementar”, então, se justifica a prática da dialógica entre o empírico e o científico.

Por último, há a **Transacionalidade do sujeito/objeto**, que inicialmente foi denominada por Morin, Ciurana e Motta (2003) de *reintrodução do sujeito cognoscente em todo o conhecimento*. Com a afirmação de que o sujeito constrói a realidade, em vez de somente refletir sobre ela, esse princípio critica o pensamento científico baseado apenas no controle do conhecimento. Ao coletar, observar ou construir dados e teorias, o sujeito cria uma tradução da realidade que pode conter erros, ainda que seja uma interpretação bastante próxima do real (MORIN, 2002). A realidade é

como o paradoxo de Zenão, em que sempre a metade do caminho deve ser percorrida para se deslocar de um ponto a outro. Nessa situação, pode-se chegar a uma distância muito próxima do final, porém, jamais chegaremos precisamente ao ponto final. De fato, as teorias são modelos próximos da realidade até que outros modelos mais “realísticos” sejam constituídos, num processo ilimitado de construção e reconstrução, de ordem e desordem, de organização e desorganização. Entre o sujeito e o objeto existe um espaço disputado pelas certezas e incertezas. Por exemplo, uma teoria de ensino-aprendizagem bem estruturada e estabelecida, por mais que seja sofisticada, não escapa das incertezas da complexidade. Portanto, na dimensão conceitual, os caminhos do pensar complexo são próximos o bastante para inferirmos que são mutuamente válidos na tentativa de entender o sistema em sua complexidade. Quando o sujeito busca seguir um deles, inevitavelmente, encontra-se com os outros. No entanto, esses princípios podem até fazer parte do plano de aula de um professor ou de uma instituição, porém são irrelevantes se ensinados e aprendidos como uma receita. Nesse caso, a ordem em que eles são ensinados é menos importante do que o modo como são apresentados pelo(s) docente(s) e interpretados pelo(s) estudante(s).

Complexidade: o caminhar para os Sistemas Complexos

A complexidade é uma abordagem que permite analisar os problemas da natureza de maneira sistêmica, evitando a fragmentação da realidade. O pensamento complexo configura uma nova visão de mundo, que aceita e procura compreender as mudanças permanentes do real e não pretende negar a contradição à multiplicidade, à aleatoriedade e à incerteza, e sim conviver com elas (TRONCA, 2006). “A complexidade é o resultado natural da complementaridade entre a ordem e a desordem e mostra que uma não se reduz à outra nem ambas se resolvem numa síntese, elas convivem como

polos antagônicos e mutuamente alimentadores” (MARIOTTI, 2000, p. 88). Como ressalta Morin (2005), os momentos nos quais não se pode superar as contradições, vencer os antagonismos, ou seja, ultrapassar os paradoxos, são aqueles onde está a complexidade.

A palavra complexidade é também aplicada na Teoria dos Sistemas Complexos, na qual se localiza a Teoria do Caos e cujos estudos pertencentes a esse campo de investigação nada têm a ver com o termo Caos em termos filosóficos ou no seu uso cotidiano.

FUNDAMENTOS DA TEORIA DOS SISTEMAS COMPLEXOS (TEORIA DO CAOS)

Caos é uma palavra que traz consigo uma etimologia rica e intrigante. Etimologicamente, a palavra deriva do grego (χάος khaos), que significa abismo ou vazio. As tragédias, os conflitos, os problemas com nenhuma explicação aparente, ou seja, tudo o que se afasta de certa ordem linear e forma definida é chamado Caos. Entretanto, o Caos na concepção científica diz respeito a um sistema dinâmico, aparentemente fora de ordem, mas apresentando padrões que se repetem durante o seu funcionamento, em outras palavras, são fenômenos que apresentam autossimilaridade. Os trabalhos realizados em sistemas caóticos são atualmente reconhecidos pelo *status* de Ciência dos Sistemas Complexos, Teoria do Caos ou, mais especificamente, Caos Determinístico.

As duas características abaixo são princípios básicos para a Teoria do Caos:

I. A sensibilidade às condições iniciais: nos sistemas caóticos, pequenas diferenças nas condições iniciais (entrada) podem acarretar grandes diferenças nos valores finais (saída) do sistema (LIEBOVITCH, 1998). Dessa maneira, os sistemas caóticos amplificam as pequenas diferenças nas condições iniciais de

um fenômeno em grandes diferenças no seu final, um evento conhecido como Efeito Borboleta, devido à seguinte metáfora de Lorenz (1995): “*Does the flap of a butterfly’s wings in Brazil set off a tornado in Texas?*” (Pode o bater de asas de uma borboleta no Brasil desencadear um tornado no Texas?);

II. Previsibilidade limitada: previsões do comportamento futuro dos sistemas caóticos podem ser impraticáveis, pois são limitadas a certo nível de iterações. De fato, o sistema caótico é imprevisível em longo prazo, por causa da sensibilidade às condições iniciais, o que impede uma previsão exata das variáveis no final do processo (LIEBOVITCH, 1998).

COMO GERAR E IDENTIFICAR O CAOS?

Podemos gerar sistemas caóticos determinísticos mesmo se partindo de uma equação bastante simples, como proposta por May (1976) para descrever a dinâmica populacional de insetos:

$$X_{n+1} = ax_n (1 - x_n) \quad (\text{Eq.1})$$

Onde n é o índice de iterações, a é um parâmetro e x_n corresponde à n ésima iteração de x .

Para identificar o Caos, alguns conceitos são fundamentais, tais como espaço de fase, atrator e bifurcação. Genericamente, o espaço de fase é um gráfico espacial que descreve a dinâmica de um processo, porém pode ser traçado mesmo quando se conhece somente uma única variável do sistema. Isso é possível usando-se a proposição de Takens (1981), que permite a transformação de uma série temporal unidimensional num objeto no espaço. Ele também é chamado de espaço de estados, por representar todos os estados (ou posições) possíveis de um sistema dinâmico. Em termos matemáticos, pode-se representar o espaço de fase de uma série temporal por um gráfico cartesiano em que a variável independente é valor da variável em

estudo num instante t (eixo horizontal) e a variável dependente é o valor da variável em estudo num instante $t+\Delta t$, sendo Δt um pequeno intervalo de tempo. Esse método matemático associado ao dispositivo computacional permite, entre outras aplicações, diferenciar a série temporal graficamente em aleatória ou caótica. Quando a série é resultante de um processo aleatório, os pontos são distribuídos em todo o espaço do gráfico e, quando a série resulta de um processo determinístico, os pontos estão concentrados numa região específica do gráfico, chamada atrator. Entende-se por atrator um ponto ou conjunto de pontos para os quais o sistema converge depois de um número de iterações de uma ou mais equações que representam o sistema dinâmico em análise. Existem vários tipos de atratores para diferentes tipos de sistemas dinâmicos. Os atratores estranhos são típicos de sistemas caóticos (STAM, 2005).

Bifurcações ocorrem quando uma pequena variação num parâmetro da/das equação/equações que representam um sistema caótico pode gerar grandes alterações no comportamento desse sistema.

OFICINA 1: O PRINCÍPIO DA DUALIDADE DA LUZ E A TRANSD

A oficina foi iniciada com os alunos respondendo a um questionário de pesquisa, cujas perguntas são apresentadas a seguir:

1. O que caracteriza o Princípio da Dualidade da Luz?
2. Pensar que a luz pode comportar-se de forma dual é razoável? Justifique sua resposta.
3. A partir da lógica aristotélica, que se baseia nos seguintes axiomas: 1) o axioma da identidade: $A \text{ é } A$ (Ferro é Ferro); 2) o axioma da não contradição: $A \text{ não é não } A$ (Madeira não é Ferro); 3) o axioma do terceiro excluído: não existe um terceiro termo T que ao

mesmo tempo seja A e não A (não existe nada que seja Madeira e Ferro), essa lógica pode ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

4. A natureza pode ser regida por uma lógica complexa não aristotélica que leva em consideração diferentes níveis de realidade, de maneira que exista um terceiro termo T sendo ao mesmo tempo A e não A. Uma lógica desse tipo poderia ser aplicada ao Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

Após a aplicação do questionário, foi discutido um texto elaborado pelo pesquisador sobre o Princípio da Dualidade e a Transdisciplinaridade e aplicado um segundo questionário de sondagem, cujas perguntas são mostradas a seguir:

1. Na sua concepção, a luz pode ser ao mesmo tempo onda e partícula? Justifique sua resposta.

2. O Princípio da Dualidade da Luz pode ser compreendido com o auxílio do Pensamento Transdisciplinar? Justifique sua resposta.

3. A lógica do terceiro incluído é mais adequada do que a lógica do terceiro excluído para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz? Justifique sua resposta.

Na terceira etapa da oficina, foram realizados três experimentos e a oficina sobre a Transdisciplinaridade. O primeiro experimento foi o da **cuba de onda**, que consiste num tanque de água rasa no qual dois martelinhos geram ondas planas na superfície. Essas ondas se desviam na borda de um obstáculo e produzem ondas semicirculares, quando passam por um orifício pequeno, confeccionado num anteparo colocado no interior da cuba. Esse experimento permitiu mostrar os fenômenos da interferência e da difração em ondas mecânicas.

Em seguida, foi apresentado um *software* conhecido como “wave-interference”, abordando o mesmo tema, que permitiu motivar uma discussão sobre os fenômenos envolvidos. Por fim, os alunos responderam à seguinte questão aberta sobre o experimento: “Sua forma de conceber o conceito vivenciado mudou em que após o experimento?”.

Um segundo experimento foi o da **dupla fenda de Young**, que consiste em deixar que a luz visível se difracte através de duas fendas, produzindo bandas numa tela. As bandas formadas, ou padrões de interferência, mostram regiões claras e escuras, que correspondem aos pontos de interferências construtivas e destrutivas, respectivamente. O objetivo desse experimento foi analisar o comportamento ondulatório de uma onda luminosa (*laser*), no que diz respeito aos fenômenos de difração e de interferência. Novamente, o *software* “wave-interference” foi usado para iniciar uma discussão sobre os fenômenos envolvidos e, por fim, foi solicitado que os alunos respondessem à mesma questão aberta do experimento anterior.

Posteriormente, foi realizado o terceiro experimento, o **radiômetro de Crookes**, que consiste em quatro hélices presas em braços que podem girar em torno de um ponto vertical com atrito muito pequeno. Todo o mecanismo é encapsulado em um invólucro de vidro, do qual o ar é parcialmente evacuado por uma bomba. As hélices têm tons claros (prateado) e escuros (preto), sendo dispostas alternadamente. Elas começam a girar, enquanto a luz de qualquer natureza (solar, artificial) incide em sua superfície. O objetivo desse experimento foi analisar o efeito de colisões de quanta de luz, produzidas por meio do radiômetro de pressão, entender o momento linear e explicar o funcionamento do moinho de luz. Após a realização do experimento, um vídeo chamado de “Dr. Quantum”, abordando o mesmo tema, foi usado para motivar a discussão sobre os fenômenos envolvidos e, ao final, a mesma questão dos experimentos anteriores foi proposta aos alunos.

Por fim, foi realizada a **oficina transdisciplinar**, iniciada com uma palestra e um texto para leitura a respeito do Pensamento Transdisciplinar, abordando questões como: a disciplinaridade e a transdisciplinaridade e seus pilares,

operadores de ligação do pensamento complexo (a ideia de emergência; a ideia de circularidade; o operador hologramático; e o operador dialógico), como também os axiomas da **lógica** clássica. Em seguida, foi promovido um debate sobre o tema abordado, mediado pelo pesquisador. Ao término da oficina, foi apresentado, para o grupo de alunos, um *software* conhecido como “wave-interference”, que apresenta o comportamento ondulatório para uma onda luminosa e mecânica, descrevendo os fenômenos da difração e da interferência e um vídeo do Youtube – “Dr. Quantum” –, que revela o fenômeno da difração e da interferência para elétrons (partículas), ao passarem pela dupla fenda de Young, o que demonstra o comportamento ondulatório dos elétrons.

Finalmente, os alunos foram solicitados a responder a seguinte pergunta: como a TransD pode contribuir para a compreensão do Princípio da Dualidade da Luz? O objetivo dessa oficina transdisciplinar foi discutir as bases do Pensamento Transdisciplinar e seus pilares, na possibilidade de contribuir para o entendimento do Princípio da Dualidade da Luz.

OFICINA – TEORIA DO CAOS: CONCEITOS E APLICAÇÕES COMPUTACIONAIS

A atividade didática para introduzir a Teoria dos Sistemas Complexos ou Teoria do Caos foi realizada através de uma oficina intitulada “Teoria do Caos: conceitos e aplicações computacionais”. Essa oficina está formatada em três etapas distintas, didaticamente interligadas: na primeira etapa, um vídeo sobre o Caos no senso comum, criado exclusivamente para esta pesquisa, foi utilizado no intuito de auxiliar na introdução dos conceitos; na segunda etapa, o tema Caos foi apresentado em seu significado etimológico e comumente empregado em diferentes contextos da sociedade; na última etapa, a concepção científica sobre o Caos foi discutida de forma interativa, usando recursos computacionais para introduzir conceitos formais sobre o Caos determinístico.

PRODUÇÃO DE UM DOCUMENTÁRIO SOBRE CAOS NO SENSO COMUM

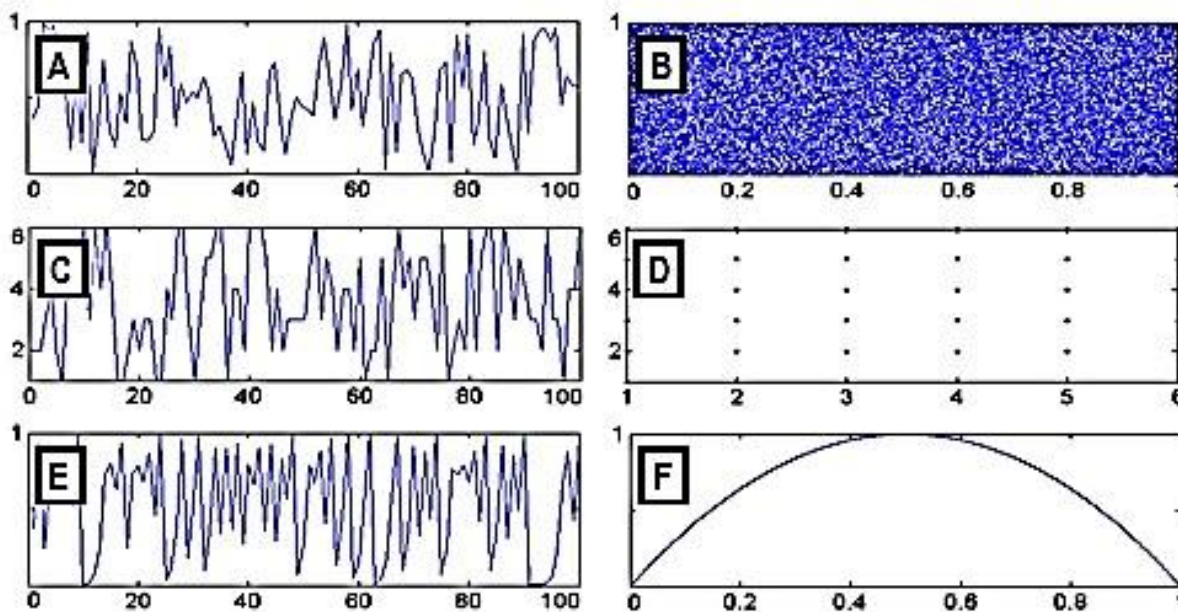
Foram documentadas em vídeo, transcritas e analisadas as concepções sobre o termo Caos de 60 indivíduos, incluindo funcionários, professores e alunos da UFRPE, e feita uma comparação com a visão de Caos científico. A pesquisa foi realizada com base na pergunta: o que é o Caos para você? Para apresentação na oficina, foi produzido um vídeo com aproximadamente 4 minutos de duração.

ROTINAS COMPUTACIONAIS PARA GERAR SISTEMAS ALEATÓRIOS E DETERMINÍSTICOS

Para contextualizar o Caos através da análise gráfica do comportamento de sistemas dinâmicos (deterministas e aleatórios), a linguagem MATLAB foi usada como uma ferramenta de ensino, na construção das rotinas computacionais.

A rotina computacional denominada “Sistemas dinâmicos: aleatório *versus* caótico” foi construída visando: 1. Gerar séries numéricas aleatórias e mostrar o espaço de fase dessas séries (Figura 1A e 1B); 2. Simular o lançamento de dados no computador e construir seu espaço de fase (Figura C e D); 3. Gerar uma sequência de valores caóticos e seu respectivo espaço de fase, iterando-se uma equação logística (Figura 1E e 1F); 4. Estabelecer as principais diferenças entre dados aleatórios e caóticos, comparando os gráficos e seus espaços de fases. 5. Discussão – responder em grupo a seguinte pergunta: o que aprendemos sobre o Caos determinístico e aleatoriedade?

Figura 1: Comparação entre o comportamento aleatório e o determinista de sistemas dinâmicos.



Fonte: Dados da pesquisa.

Na primeira linha, temos a série aleatória (A) e o seu espaço de fase (B). Na segunda linha, temos o registro de lançamentos de dados (C) e o seu espaço de fase (D). Na terceira linha, temos a série do mapa logístico (E) e o seu espaço de fase (F). Em cada série, foram utilizados 100000 pontos

É importante que seja discutido com os alunos que, apesar de as séries serem bastante parecidas, o espaço de fase de cada uma delas é totalmente diferente. Isso permite distinguir o que é aleatório e o que é caótico.

AVALIANDO AS OFICINAS

Avaliando a oficina 1: o Princípio da Dualidade da Luz e a TransD

O Quadro 1 apresenta as diferentes concepções de uma amostra de 3 estudantes, numa turma (total de 8 alunos) da disciplina Instrumentação para o Ensino de Física II, que participaram da oficina. Todos os alunos haviam cursado as disciplinas Física Geral, Experimentação IV e Física Moderna, o

REVISTA INTER-LEGERE

TRANSDISCIPLINARIDADE E A FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA:

RELATOS DE EXPERIÊNCIAS DIDÁTICAS

Romildo de A. Nogueira, Paulo F. L. Souza e Rubens F. de A. A. Oliveira

que pressupõe que os alunos tinham algum conhecimento sobre o Princípio da
Dualidade da Luz.

Quadro 1 – O Princípio da Dualidade da Luz e a Lógica do Terceiro Inclusoo

Respostas dos alunos	Antes da oficina (1º questionário)	Após a oficina (2º questionário)
A	Essa dúvida em relação à natureza da luz se dá porque ora se comporta como onda, ora se comporta como se fosse matéria. Esse fenômeno que descreve sobre a luz vem sendo estudado há vários anos pelos maiores Físicos, tais como: Maxwell, Lorentz, Newton, Einstein. Com a realização de alguns experimentos no início do século, a Ciência começou a observar que a luz apresentava propriedades, isto é, ficou caracterizado pelo experimento de dupla fenda, onde constataram o fenômeno de interferência, logo a luz poderia ser considerada uma onda, mas, incrivelmente, os cientistas observaram também que quando colocado um “sensor” para determinar por onde passava a luz nas duas fendas a luz passava a se comportar como partículas. Era o que se apresentava no anteparo colocado através das fendas.	A principal característica desse princípio é o fato de ele obedecer a uma lógica não aristotélica, onde existem vários níveis de realidade, onde a luz pode se comportar de formas diferentes, ela pode ser onda, como também pode ser partícula. Essa é a lógica do terceiro incluso.
B	É o fato de que a luz pode ser considerada tanto onda como partícula.	O Princípio da dualidade é caracterizado pelo fato de que a luz pode se comportar como onda, apresentando efeito de difração e de interferência, e como partícula, onde a luz emite fótons (partícula), como foi observado no experimento radiômetro de Crookes.
C	É o fato de a luz ter um comportamento de onda e partícula, ou seja, além das propriedades ondulatórias, a luz se comporta de maneira discreta, pois sua energia é quantizada.	O fato é que a luz apresenta um comportamento ondulatório, ou seja, a luz possui características ondulatórias e ao mesmo tempo a luz apresenta-se de maneira corpuscular, ou seja, descontínua, a luz ora se comporta como onda, ora como partícula.

Fonte: Dados da pesquisa.

Na sua resposta, o **aluno A** relatou a importância de vários cientistas no desenvolvimento das ideias que levaram à dualidade e descreveu o experimento da dupla fenda de Young, com o objetivo de mostrar o comportamento ondulatório da luz. Citou, equivocadamente, que a experiência de Young

também podia mostrar o caráter corpuscular da luz, tendo em vista que declarou já ter assistido ao vídeo “Dr. Quantum”, confundindo a representação de feixe de elétrons com onda luminosa. Portanto, o aluno centrou sua resposta prévia em experiências físicas, como é esperado nos períodos finais do curso de Física. Após a oficina, o **aluno A** focou sua resposta em aspectos da TransD, apesar de não ter respondido adequadamente à pergunta.

Na resposta prévia do **aluno B**, percebe-se a sua objetividade ao caracterizar a dualidade da luz. Após os experimentos didáticos (a cuba de onda, a dupla fenda de Young e o radiômetro de Crookes), o **aluno B** apropriou-se de conceitos físicos que são importantes para a construção do conceito da dualidade da luz. No entanto, ele não mostrou na sua fala ter se apropriado após a oficina de conceitos da TransD e, em particular, da Lógica do Terceiro Incluso. O **aluno C**, após a oficina, permaneceu com o mesmo discurso, não agregando as novas aprendizagens adquiridas nessa experiência didática.

Nas falas dos **alunos A, B e C**, pode-se observar que apenas um deles incorporou no seu discurso a lógica do terceiro incluso como forma de justificar o Princípio da Dualidade da Luz, o que é um indicativo da dificuldade de o aluno trabalhar com a TransD e, em particular, com a lógica do terceiro incluso. Dessa forma, é importante que os professores de Física discutam as possibilidades que as novas lógicas podem trazer para o ensino da Física Moderna.

Avaliando a oficina 2: Teoria do Caos: conceitos e aplicações computacionais

Conceito prévio à realização da oficina sobre Caos – Inicialmente foi aplicado um questionário sobre dados pessoais relativos a idade, sexo, estado civil, disponibilidade de tempo para participar da pesquisa e uma pergunta aberta acerca do entendimento prévio do aluno sobre a teoria do Caos (a mesma pergunta do documentário: o que é Caos para você?).

Conceito de Caos pós-oficina – Depois de verificar o perfil de cada estudante, convidamos quatro licenciandos, sendo dois em física e dois em matemática, para responder a mesma pergunta (o que é Caos para você?). Todos os licenciandos estavam cursando do sexto ao último período e tinham idade na faixa etária de 20 a 30 anos.

Quadro 2 – O que é Caos para você?

Respostas dos alunos	Antes da oficina	Após a oficina
A	O Caos está relacionado ao comportamento das coisas em torno do universo, ou seja, é como se tudo estivesse ligado entre si, então, quando temos um desequilíbrio em certo ponto, isso causa uma reação em cadeia. Mas nem sempre o organizado, ou mesmo o certo, significa estar certo (normal).	Na natureza, existem sistemas que são possíveis de prever seus próximos passos, mas também tem alguns que, por si só, são complexos de se ter uma aproximação. Partindo do seu atual estágio, esses sistemas têm uma relação com os meios caóticos, ou seja, fogem do padrão de desenvolvimento. O surgimento desses sistemas dá-se por dois meios, um pelo processo natural em si, ou através de alteração em seus meios. Esses sistemas são chamados de caóticos.
B	Ela serve para explicar sistemas complexos dinâmicos (é o que sei).	É uma teoria que explica o funcionamento de sistemas complexos e dinâmicos.
C	São definições sobre um conjunto de fatores que descrevem um determinado sistema e que podem mantê-lo constante, num estado de repouso ou movimento, ou podem com a alteração de algum desses fatores transformar totalmente a condição do sistema, pois não podemos prever a condição final do sistema devido à alteração feita em seu estado inicial.	Estudo de um sistema dinâmico e organizado que é gerado por um conjunto de padrões decorrentes dos fatores que formam o sistema. Esse estado caótico surge das interações entre esses sistemas sensíveis a mudanças no seu estado inicial e que ao interagirem dão resultados pouco semelhantes ao sistema inicial.
D	Um momento em que faltarão condições necessárias à sobrevivência.	Possui certa organização, estrutura e funcionamento.

Fonte: Dados da pesquisa.

A resposta inicial do **aluno A** associa ao Caos interligação de todos os elementos do sistema “Universo”. Na última frase, sugere que em alguns sistemas pode existir um comportamento aparentemente organizado, porém, na realidade, não é. Aqui o **aluno A** faz confusão, pois os sistemas caóticos funcionam justamente de maneira contrária, ou seja, apresentam um comportamento aparentemente desorganizado, no entanto podem ser regidos por leis determinísticas (ordem). Na segunda resposta do **aluno A**, a previsibilidade limitada é percebida logo na primeira frase, no trecho: “tem alguns que, por si só, são complexos de se ter uma aproximação”. Na penúltima frase do **aluno A** pós-oficina, a disjunção sugere que um sistema caótico se origina tanto através de um “processo natural” como por alguma interferência externa: “alteração em seus meios”. De fato, existem sistemas que são naturalmente caóticos, como o sistema cardiovascular (GODOY, 2003), e existem sistemas gerados por um algoritmo, isto é, sistemas cujo comportamento caótico surge da iteração das variáveis que os caracterizam, como, por exemplo, a Equação Logística, proposta inicialmente por May (1976) para mapear a dinâmica de populações.

A distinção entre sistemas complexos e dinâmicos é percebida na recorrência e objetividade das respostas do **aluno B**, que já mostra ter um conhecimento inicial sobre a Teoria do Caos, porém, limitado a uma definição geral. Essas generalizações, feitas pelos alunos a respeito de Caos e sistemas complexos, são bastante comuns. Morin, Ciurana e Motta (2003) distinguem os conceitos de Caos, complexidade e determinismo, relatando a confusão que se estabelece nesses campos do conhecimento científico. O uso das palavras complexo ou complexidade é atraente como uma substituição ao termo complicado. Não vemos problemas no uso da palavra *complexus* e seus derivados, desde que estejamos cientes da dimensão conceitual de cada área e de que a complexidade é mais do que definições ou rótulos.

No trecho inicial da resposta do **aluno C**, a Teoria do Caos é generalizada a “definições de um conjunto de fatores”, capazes de descrever e alterar o estado do sistema. Os termos “constante” e “repouso”, usados em sua fala, denotam um comportamento de um sistema estacionário, e não de um sistema dinâmico linear ou não linear. O **aluno C** ainda não percebeu, claramente, que o termo “dinâmico” sugere movimento ou mudança de estado no decorrer do tempo. Percebemos, especialmente na última frase, uma aproximação da “dependência sensível de um sistema as suas condições iniciais”. Esse princípio e a noção de imprevisibilidade são elementos que se mantêm na sua segunda resposta, argumento que é até certo ponto compatível com o conceito de Caos determinístico, pois, como afirma Ferreira (2009, p. 17): “Caos é um fenômeno cuja evolução temporal se processa de maneira aparentemente aleatória, porém regida por uma lei determinística”. O **aluno C** empregou o termo “organizado” para qualificar o Caos. Apesar de esse termo não conferir um erro conceitual, podemos nos confundir ao entender Caos como um sistema totalmente ordenado. Seria mais adequado se referir ao Caos como sistemas “aparentemente desordenados” para evidenciar que esses sistemas, cuja dinâmica parece aleatória, são constituídos por padrões que os caracterizam.

Na concepção prévia de Caos do **aluno D**, percebe-se a ideia de Caos no senso comum. Na segunda resposta do **aluno D**, há uma tentativa de definir a Teoria do Caos sem especificar suas propriedades. A objetividade excessiva desse aluno e a falta de mais elementos de análise em sua curta resposta não nos permitem avançar na interpretação de sua concepção.

Esperamos que os relatos das experiências didáticas relacionando a Transdisciplinaridade e a Física Moderna e Contemporânea sejam inspiradores para novas experiências didáticas com a TransD.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, A. F. **Projetos de trabalho em educação ambiental**: uma alternativa transdisciplinar à prática docente. 2011. 162f. Dissertação (Mestrado em Ensino das Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Ensino das Ciências, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.

BADESCU, H. **Stephane Lupasco**: o Homem e a Obra. São Paulo: Triom, 2001.

BARTHEM, R. **A Luz**. São Paulo: Livraria da Física. Sociedade Brasileira de Física, 2005.

BEHRENS, M. A. **O paradigma emergente e a prática pedagógica**. 5. ed. Petrópolis: Vozes, 2011. 117 p.

BERTALANFFY, L. von. **Teoria geral dos sistemas**: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

CURRY, D. M. Practical application of chaos theory to systems engineering. In: New Challenges in Systems Engineering and Architecting. Conference on Systems Engineering Research (CSER). **Procedia Computer Science**, n. 8, p. 39-44, 2012.

FERREIRA, H. S. Dinâmica caótica em ecologia: avanços teóricos e metodológicos. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 4, n. 3, set./dez. 2009.

GODOY, M. F. **Teoria do caos aplicada à medicina**. 2003. 179f. Tese (Livre Docente em Cardiologia) – Faculdade de Medicina de São José do Rio Preto, São José do Rio Preto, 2003.

HUNG, I. C. *et al.* A context-aware video prompt approach to improving students in-field reflection levels. **Computers & Education**, n. 70, p. 80-91, 2014.

LEFF, E. **Epistemologia ambiental**. 5. ed. São Paulo: Cortez, 2010.

LEFFA, V. Transdisciplinaridade no ensino de línguas: a perspectiva das Teorias da Complexidade. Universidade Católica de Pelotas. **Revista Brasileira de Linguística Aplicada**, v. 6, n. 1, 2006.

LIEBOVITCH, L. S. **Fractals and chaos simplified for the life sciences**. New York: Oxford University Press, 1998.

LORENZ, E. **The essence of chaos**. Seattle: University of Washington Press, 1995. p. 181-184.

MAY, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. **Nature**, v. 261, p. 459-467, jun. 1976.

MARIOTTI, H. **As paixões do ego**: Complexidade, política e solidariedade. São Paulo: Palas Athena, 2000.

MORIN, E.; CIURANA, E. R.; MOTTA, R. D. **Educar na era planetária**. São Paulo: Cortez, 2003.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2005.

MORIN, E. **Os sete saberes necessários à educação do futuro**. São Paulo: Cortez, 2002.

MORIN, E. **Ciência com consciência**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

NICOLESCU, B. **O Manifesto da Transdisciplinaridade**. São Paulo: Triom, 2005.

SANTOS, A. Complexidade e transdisciplinaridade em educação: cinco princípios para resgatar o elo perdido. **Revista Brasileira de Educação**, v. 13, n. 37, p. 71-83, jan./abr. 2008.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in geophysics: past, present and future. **Chaos, Solitons and Fractals**, v. 19, n. 2, p. 441-462, 2004.

STAM, C. J. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field. **Clinical Neurophysiology**, v. 116, p. 2266-2301, 2005.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence. In: RAND, D. A; YOUNG, L. S. Dynamical Systems and Turbulence. **Lecture Notes in Mathematics**, v. 88, p. 366-381, 1981.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2006. (Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria, 3).

TRONCA, D. S. **Transdisciplinaridade em Edgar Morin**. Caxias do Sul: Educus, 2006.

TORRES-RAMÍREZ, M. *et al.* Video-sharing educational tool applied to the teaching in renewable energy subjects. **Computers & Education**, v. 73, p. 160-177, 2014.

XU, L. Teaching Quality about Application of Multimedia in Higher Education. In: International Conference on Education Technology and Management Science (ICETMS). **Atlantis Press**, p. 393-395, 2013.

Artigo recebido em: 04/05/2015.