

# **Análise de Redes como ferramenta exploratória da Ecologia Conceitual em um tópico da Física**

## **Network analysis as an exploratory tool for Conceptual Ecology on a Physics topic**

**Ernani Vassoler Rodrigues**  
USP – Universidade de São Paulo  
ernanivr@usp.com

**Giuseppi Gava Camiletti**  
UFES – Universidade Federal do Espírito Santo  
giuseppi.ufes@gmail.com

### **Resumo**

Neste trabalho, propomos a implementação de uma atividade em sala de aula, voltada para conexão entre termos e sentenças curtas relacionados à linguagem científica, típica de um tópico da Física (Acústica), construindo uma rede complexa, para um grupo de alunos (N=41) do Ensino Médio regular. Nos valemos da ideia de estruturação de conceitos científicos como um sistema complexo, análogo a um sistema ecológico, para procedermos uma análise das características topológicas das redes de conexões entre os termos dados, construídas pelos sujeitos de pesquisa buscando identificar nesses heurísticos, traços das Ecologias Conceituais dos indivíduos. Posteriormente, procedemos uma análise da rede concatenada para o grupo, buscando regularidades em conexões como traços de um compartilhamento de significados e de associações emergentes do grupo. Por uma Análise de Componente Principal são exploradas as duas dimensões principais dos dados como indícios da robustez e da complexidade inerente às redes de associações feitas pelo grupo.

**Palavras chave: conhecimento fragmentado, ecologia conceitual, redes, sistemas complexos**

### **Abstract**

In this paper, we propose the usage of a classroom activity where students should connect small sentences or terms of scientific language in a Physics topic (Acoustics) building a complex network for a student's group (N = 41). We start from the idea of a concept as a complex system analog to an ecological system, to proceed a topological analysis of the network of connection for the given terms built by the subjects and investigating among these heuristics traces of individual's Conceptual Ecology. Than we proceed an analyses for the concatenated network searching patterns in the connections as traces of shared meaning and shared associations emerging from the group. Through a Principal Component Analysis we explored the two main data dimensions as a clue for robustness and complexity of the association network that students built.

**Key words: conceptual ecology, knowledge in pieces, networks, complex systems**

## **Introdução**

Iniciamos este texto apresentando algumas características de sistemas complexos e como as ciências das redes podem ser ferramentas viáveis para o entendimento desse tipo de sistema em diversas áreas do conhecimento. Então, tratamos da visão dada por Andrea diSessa para aquisição de elementos do conhecimento e o processo de organização desses elementos na elaboração de um senso de mecanismo no aprendizado da Física e apresentamos nossas motivações para a busca de uma abordagem de utilização de redes complexas na investigação do processo de construção conceitual. Em seguida, apresentamos as atividades voltadas para o aprendizado de Acústica que foram desenvolvidas por um grupo de alunos do ensino médio e que permitiram a coleta de dados e produção dos resultados empíricos que sustentam a presente pesquisa, apontando algumas de suas implicações instrucionais e as próximas etapas no desenvolvimento desse tipo de análise.

## **Elementos e conexões: a complexidade da natureza**

Um cosmólogo, na sua busca para entender a relação entre galáxias no universo, um ecólogo estudando a relação entre espécies num ecossistema, um sociólogo estudando relações entre grupos de pessoas ou um engenheiro da computação, estudando a troca de arquivos entre computadores na internet são, todos, exemplos de estudos de sistemas reais que possuem algo em comum: são formados por elementos independentes que se relacionam de alguma forma promovendo a estruturação do todo, que chamamos de sistema complexo. Embora a palavra “complexo” seja muitas vezes utilizada como sinônimo de “difícil”, neste texto trataremos esse termo, conforme proposto por Ladyman et al. (2013). De maneira cuidadosa, esses autores explicitam uma tentativa de definir um sistema complexo, sugerindo condições para que um sistema seja dotado de complexidade:

Um sistema complexo é uma junção de muitos elementos em interação de forma desordenada, resultando numa organização robusta e em memória [...] um sistema é complexo se consegue produzir séries de dados com alta complexidade estatística (LADYMAN et al., 2013, p. 57, tradução nossa)

Esses muitos elementos devem, para configurar um sistema, ser semelhantes em natureza. Por exemplo, num sistema físico, elementos (corpos) que possam interagir em termos de energia, matéria, informação, num sistema social, elementos (personagens) que interagem por compartilhamento de crenças, comportamentos, comunicação ou num sistema ecológico, elementos (espécies) que interagem em termos de nicho, recursos alimentares e competição.

Porém, as interações de forma desordenadas sugeridas por Laydman et al. (2013), configuram relações que não possuem um padrão linear, conferindo a não-linearidade, intrínseca aos sistemas complexos. Isso significa que não é possível detectar uma ordem nas interações, mas é possível que uma organização emerge de sua desordem. Cilliers (2001), bem destaca essa não-linearidade:

Num mundo não-linear, não podemos identificar claramente uma cadeia causal, algo que parece sem importância agora, pode posteriormente ter uma importância vital (CILLIERS, 2001, p. 138, tradução nossa)

Cilliers, se referindo ao sistema como um todo, propõe então, que é impossível modelar um sistema complexo por completo, uma vez que esse modelo seria tão difícil de se compreender quanto o próprio sistema. Entretanto, um sistema complexo pode vir a ser limitado por um quadro teórico, permitindo uma modelagem de parte do sistema e a extração de informações sobre o sistema a partir da estrutura desse modelo (CILLIERS, 2001). Cilliers toma cuidado com a polissemia do termo “estrutura”, deixando claro que o usa no sentido do resultado dos padrões de interação entre elementos do sistema, na emergência de uma rede dotada de complexidade e dinamismo a partir desses padrões.

As ciências das redes complexas vêm se mostrando uma ferramenta poderosa para a modelagem de sistemas complexos, seja na função de quadro teórico, seja como abordagem metodológica, em diversas áreas do conhecimento. Jonassen (1990) propõe a utilização de redes semânticas na estruturação de hipertextos, Barabási et al. (2002) exploram o funcionamento das redes de colaborações científicas e sua importância no estabelecimento da cultura científica, Martinez et al. (2003) olham para as características das redes sociais estabelecidas em sala de aula, a partir das interações entre estudantes, algo que Borgatti et al. (2006) sugerem ser estendido a outros âmbitos das Ciências Sociais, já Cicuto e Correia (2012) tratam das redes proposicionais obtidas a partir da confecção de mapas conceituais construídos por alunos de ensino médio no aprendizado de um domínio da Física.

## Referencial Teórico

Andrea diSessa (1993) propõe uma base epistemológica para o aprendizado da Física fundamentada em elementos do conhecimento que são adquiridos na lida com o mundo físico e que são utilizados na construção de um senso de mecanismo sobre a natureza. Chamados de Primitivas Fenomenológicas (*p-prims*), esses elementos constituem um repertório utilizado para a previsão ou explicação de acontecimentos, entrando em cena por uma certa ordem, dependente de contexto e sendo agrupados numa rede de prioridades. DiSessa argumenta que utilizamos essa rede de prioridades para elaborarmos nosso senso de mecanismo e nos valemos desse senso para identificar que tipo de evento é provável, possível ou impossível. Assim, nosso senso de mecanismo é o conhecimento que utilizamos para verificar semelhanças, fazer previsões ou fornecermos explicações causais sobre a natureza.

O trabalho de diSessa (1993) surge em meio a uma época na qual fervilhavam trabalhos propondo o aprendizado de Física por uma Mudança Conceitual. O modelo mais aceito naquele período, possivelmente iniciado com o trabalho de Posner (1982), se valia de uma Mudança Conceitual por um conflito cognitivo que promoveria uma espécie de substituição do conceito cientificamente equivocado por um conceito cientificamente correto. Essa substituição invoca uma ruptura do antigo com o novo, sendo esse novo, incomensurável com o antigo, dando indícios de uma grande influência da obra de Kuhn (1962) para esse modelo.

DiSessa propõe uma Mudança Conceitual seguindo uma linha diferente. DiSessa e Sherin (1998) apresentam uma Mudança Conceitual baseada na complexificação do construto Classes de Coordenação, que seriam o resultado das estratégias de leitura que o indivíduo utilizaria para extrair informações do mundo físico e da rede causal que o indivíduo elaboraria a partir dessa leitura do mundo. Nossas Classes de Coordenação, então, não se modificariam por uma ruptura, gerando um novo conceito, incomensurável com o antigo. Ao contrário, nossas revisões sobre nossas ideias e nossa lida com o mundo permitiriam que fragmentos do conhecimento, mesmo que não tendo, individualmente, uma coerência estrutural, servissem de elementos da nossa rede causal. Essa rede se torna mais complexa e robusta e, elementos que sistematicamente diminuem sua prioridade na coordenação de classes, vão se mostrando

menos viáveis ao sistema. Esse modelo remete à proposta de Toulmin (1967), para quem o conhecimento científico se desenvolve de maneira análoga a um sistema ecológico: Toulmin sugere que as variantes intelectuais competem entre si e aquelas menos adaptadas são rejeitadas, enquanto as mais adaptadas são incorporadas ao sistema. DiSessa (2002) então, trata da mudança conceitual como um processo de mudança gradual, incorporação e organização de elementos num sistema complexo. Um esquema simplificado de comparação entre essas duas vertentes para uma Mudança Conceitual oferecido por diSessa, conforme a Figura 01, a seguir.

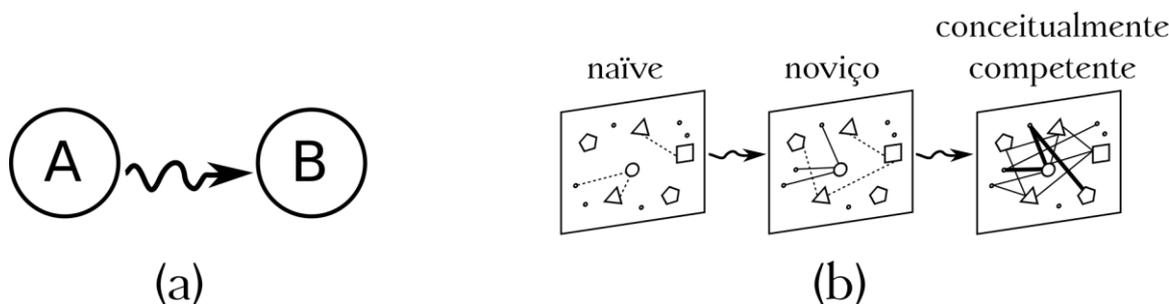


Figura 01: Adaptado de diSessa (2002), a ilustração de dois modelos para uma Mudança Conceitual. No primeiro (a) um conceito naïve se transforma em um outro, esperto e incomensurável com o anterior. No segundo (b), uma evolução conceitual ocorre por um processo de coordenação num sistema complexo de elementos do conhecimento.

A relação entre fragmentos do conhecimento tanto constitui quanto estrutura um sistema de conhecimento e, a partir dessas relações (conexões), grupos de fragmentos se coordenam gradativamente ganhando ou perdendo importância nessa rede de relações, algo que de fato se aproxima das redes de relações ecológicas.

As implicações metodológicas representam uma dificuldade para a observação de classes de coordenação abordando um sistema complexo. Porém, uma possível solução é observar propriedades do sistema ou observar diferentes configurações de elementos idênticos (DISESSA 2002). Por isso, nossa proposta de atividade é oferecer para um grupo de alunos, um conjunto de termos típicos de um tópico da Física e observar as diferentes redes que os alunos constroem para as relações de proximidade e de coordenação desses termos, num tópico da Física. As inferências feitas, a partir das redes propostas na atividade, devem ser cuidadosas, pois estamos modelando apenas um subconjunto do sistema, limitado à relação entre alguns termos típicos de um tópico específico da Física. Mas ainda assim, encontramos um terreno fértil, observando essas redes construídas como traços de organizações cognitivas de maior ordem, as Classes de Coordenação, por parte dos alunos.

## Metodologia

Os sujeitos de pesquisa foram estudantes da 3ª série do ensino médio regular (N = 41) de uma instituição privada da cidade de Vitória, ES. O estudo foi realizado com dois grupos (15 estudantes e 26 estudantes) em duas unidades escolares diferentes, da mesma instituição. Foram utilizadas, no total, oito aulas de 50 minutos, geminadas, procedidas em contra turno, para cada grupo. O presente trabalho é um recorte com as análises dos dados da primeira atividade, nas duas primeiras aulas.

Os estudantes utilizaram um aplicativo de smartphone, gratuito e multiplataforma, originalmente desenvolvido para a afinação de instrumentos musicais (PITCHLAB, 2016), e que foi utilizado para medição da frequência da voz falada. Foram divididos em grupos de 03

e 04 alunos, e listavam, sem uso do aplicativo, qual aluno teria a voz “mais grossa” e a “mais fina” no grupo. Depois, utilizando o aplicativo, mediram os valores das frequências das vocalizações relaxadas de cada um dos integrantes do grupo. Ao final da atividade, depois de uma rodada de discussões sobre as relações entre os valores encontrados e as frequências medidas, os alunos receberam 12 termos típicos da Acústica, mostrado na Figura 02 e deveriam conectar esses termos em função da semelhança que julgassem haver entre eles.

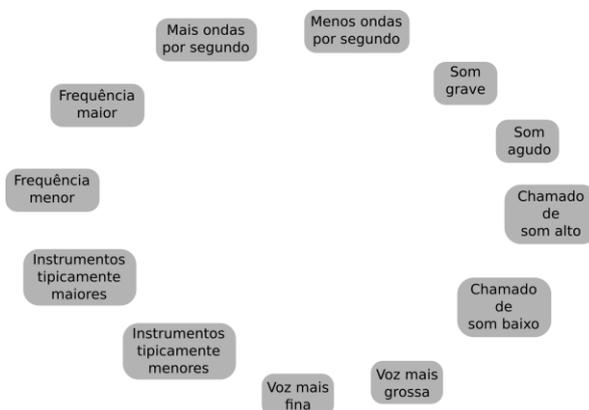


Figura 02: Termos inerentes ao conceito de Altura/Frequência do som, que os alunos deveriam conectar na atividade proposta.

Em uma rede, também chamada de grafo, no contexto da Ciência das Redes, cada elemento é chamado de vértice e cada conexão entre elementos é chamada de aresta. Na Figura 03, a título de exemplo, o grafo construído pelo estudante g\_33 (mero código para preservação do anonimato).

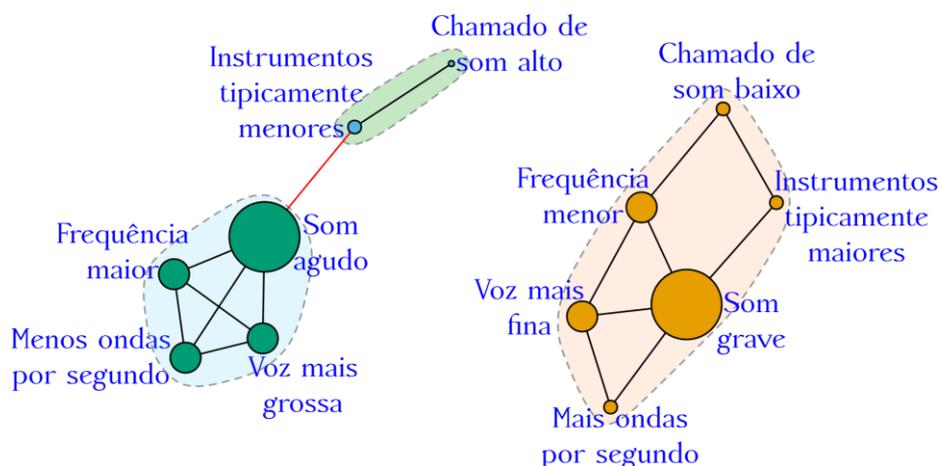


Figura 03: Grafo conectado por um dos alunos, contendo os 12 vértices propostos, 16 arestas conectadas, três clusters identificados, um ponto de articulação representado pela aresta em vermelho. Cada vértice tem o diâmetro de tamanho proporcional ao número de arestas incidentes.

As redes resultantes se relacionam ao julgamento dos estudantes quanto à semelhança entre os termos nos boxes, ou seja, se fazem parte de uma mesma classe de ideias ou não. Após as atividades, as redes foram analisadas na plataforma estatística gratuita e de código aberto R (R, 2008). Para cada aluno, foi gerado um grafo a partir do pacote estatístico *igraph* do R (CSARDI; NEPUSZ, 2006), para verificação das diferentes redes geradas a partir desses termos.

Para cada rede (grafo), procedeu-se um conjunto de medidas topológicas, contendo:

- (1) Densidade – relação entre o número de arestas presentes e o número total possível de arestas;
- (2) Pontos de articulação – contagem das arestas que, quando cortadas, fracionam a rede em duas ou mais sub-redes (conexão em vermelho, na Figura 03);
- (3) Caminho médio – distância média entre dois vértices do grafo;
- (4) Clusters – grupos densamente conectados, dentro da rede, gerados pelo principal autovetor não-negativo na matriz de adjacência do grafo (circulados com linhas pontilhadas na Figura 03).

Então, uma matriz com todas as características topológicas medidas, por aluno, foi gerada. Afim de se reduzir a dimensionalidade de análise dessas características, procedeu-se um teste Scree (CATTELL, 1966) com o pacote *nfactores* (RAICHE; MAGIS, 2010) do R para a determinação do número de fatores a extrair. Então, procedeu-se uma Análise de Componente Principal – PCA (WOLD; ESBENSEN; GELADI, 1987) com o pacote *FactoMineR* (LÊ et al., 2008) do R. Por fim, concatenando-se todas as redes, procedeu-se a plotagem do grafo concatenado para o grupo, novamente com o tamanho do vértice proporcional a seu grau, mas com a espessura da aresta proporcional ao número de vezes que a aresta ocorre, chamada de peso da aresta, apresentado na Figura 05.

## Resultados e discussão

O teste Scree mostrou que a hipótese de dois componentes é suficiente para explicar a variância dos dados (Figura 04, esq.) A Análise de Componente Principal sugere uma primeira dimensão, responsável por 45,99% da variância dos dados e uma segunda dimensão, responsável por 37,68% da variância (Figura 04, dir.).

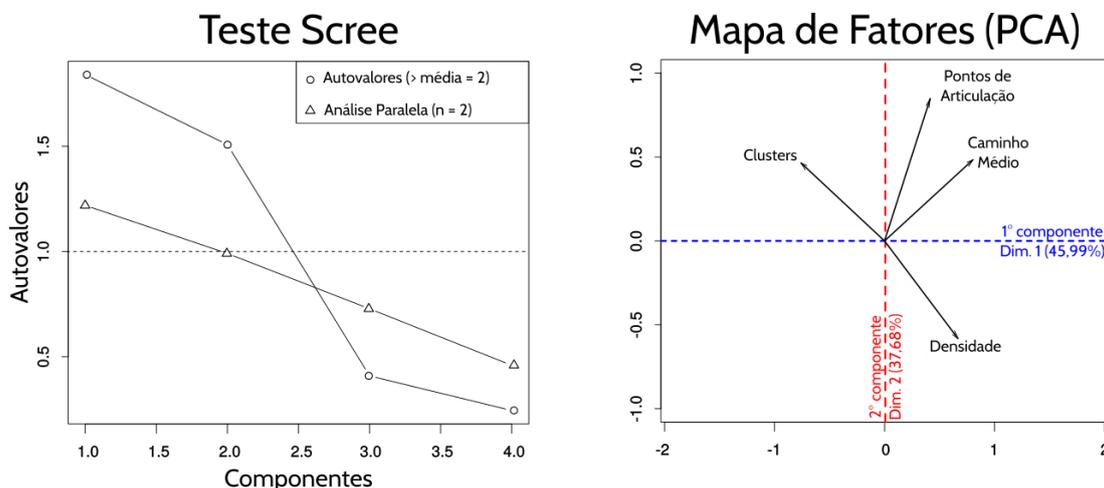


Figura 04: À esquerda, o teste Scree para determinar o número de componentes a extrair e à direita, as variáveis e suas projeções nesses componentes.

Codificamos os dois componentes da análise PCA como sendo o primeiro, associado à robustez das redes construídas pelos alunos. Uma vez que a densidade se projeta positivamente nesse componente e o número de clusters se projeta negativamente. Assim, à medida em que os alunos coordenam suas classes de ideias, criam blocos mais coesos e robustos. Codificamos o segundo componente, como sendo associado à complexidade das redes, observando que redes com mais pontos de articulação são também menos densas.

Os grafos individuais são heurísticos dos alunos onde os vértices de maior grau, ou seja, mais conectados (plotados como bolas maiores na Figura 03) podem ser traços das estratégias de leitura (DISESSA e SHERIN, 1998) que os alunos utilizam como ponto de partida ou de chegada ao associar ideias em Acústica. Os *clusters* dessas redes, representam indícios das relações inferenciais dos alunos, uma das premissas de uma Classe de Coordenação de diSessa e Sherin, funcionando como agrupamentos de ideias a fim de se prever ou explicar os mecanismos de sons agudos e graves em Acústica.

Nos heurísticos dos alunos, podem-se verificar relações cientificamente aceitas e concepções alternativas em coexistência, algo que corrobora a proposta de uma construção conceitual feita a partir de fragmentos de ideias sem uma coerência, mas que, a cada ciclo de revisões, ganham organização e coordenação, incluindo ou rejeitando elementos, a partir da sua adequabilidade ao sistema.

A concatenação de todas as redes, gerou um grafo único, apresentado na Figura 05, onde o tamanho de cada vértice proporcional ao número de conexões que esse vértice recebe e a espessura de cada aresta é proporcional ao número de vezes que a mesma ocorre.

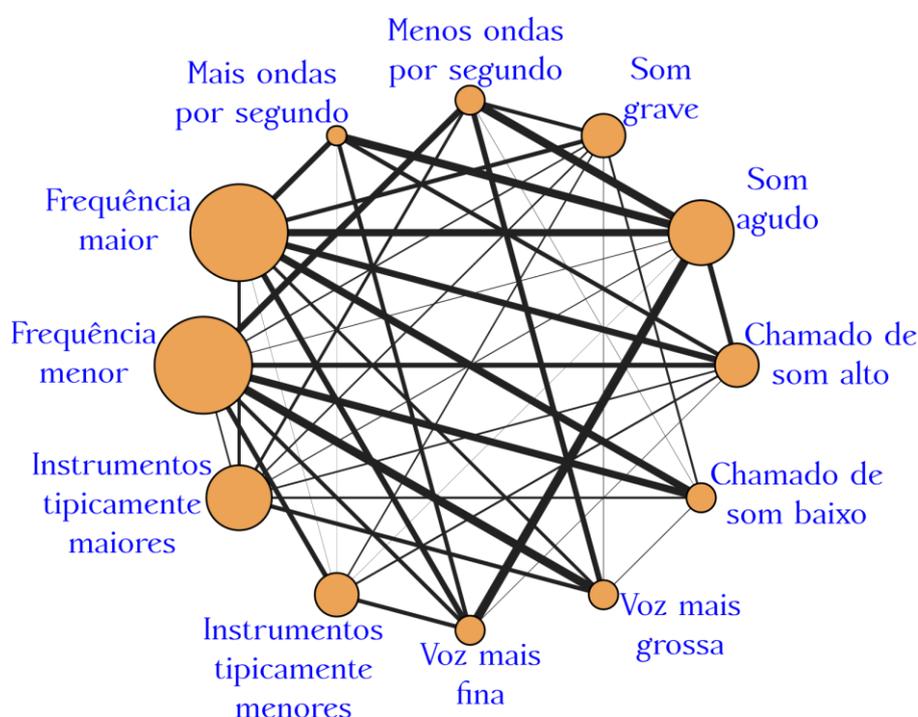


Figura 05: Rede resultante da concatenação de todos os grafos do grupo. Tamanho do vértice proporcional a seu grau (número de conexões) e espessura das arestas, proporcionais a seus pesos (número de vezes que a aresta se repete, no grupo).

A rede concatenada se refere aos consensos do grupo, sendo útil para observação dos vértices que sistematicamente são pontos de partida ou chegada das relações feitas pelos alunos, ou seja, que muitos alunos utilizam como ideia de referência para a conexão a outras ideias, algo que diSessa (1993) chama de prioridade de entrada em cena (*cueing priority*) dos elementos para organizar grupos de ideias ao prever ou explicar um fenômeno.

Os consensos podem ser visualizados rapidamente ao se explorar as redes concatenadas. Por exemplo, observando-se os tamanhos dos vértices “Frequência maior” e “Frequência menor” como vértices de maior grau, podemos dizer que, para o grupo, esses termos representavam pontos de partida para outros termos.

Pode-se também inferir a hermenêutica associada a esses termos, observando os consensos das conexões pelas espessuras (pesos) das arestas, na Figura 05. Vejamos a aresta “Som agudo” ↔ “Voz mais fina”, por exemplo. Muitos alunos do grupo repetiram essa conexão e isso é um indício de uma relação de significado consensual.

A hermenêutica da rede pode também elucidar algumas concepções que, sistematicamente no grupo, não se alinham àquelas cientificamente aceitas, como nas arestas “Frequência maior” ↔ “Chamado de som baixo” e “Menos ondas por segundo” ↔ “Som agudo”. Os termos “grave” e “agudo” fazem parte de um vocabulário cotidiano dos profissionais do áudio, mas não necessariamente dos alunos, bem como a utilização dos termos “som alto” e “som baixo” no contexto da acústica o que também traz à tona um certo afastamento entre a cultura da ciência e a cultura cotidiana no uso desses termos.

## **Considerações finais**

Apresentamos a utilização das Redes Complexas como ferramenta para modelagem cognitiva da Ecologia Conceitual dos alunos, em um tópico da Física. Os resultados preliminares aqui apresentados indicam possibilidades animadoras para o uso desse tipo de abordagem, tanto na observação das redes individuais como heurísticos, quanto na observação da hermenêutica da rede concatenada, onde pudemos identificar sistematicidades a partir das redes complexas de relações entre os termos propostos.

A análise de componente principal reduz as medidas topológicas das redes a duas dimensões de análise, uma possivelmente associada à robustez do sistema de conhecimento e outra à complexidade do mesmo. Sabemos que não poderemos olhar para o sistema todo, devido a sua complexidade intrínseca. Mas, observando as Classes de Coordenação como sendo subgrupos dentro do sistema complexo, é possível inferir, a partir dos clusters das redes, os agrupamentos de ideias semanticamente mais próximas, algo que serve de forte indício do modo como o estudante organiza seus fragmentos do conhecimento.

Algumas limitações devem ser observadas a partir desse tipo de abordagem, deixando algumas questões para reflexão e orientação da continuidade de análises a partir dessa abordagem. Ao se referirem a Acústica, nos seus próprios discursos, os alunos se valem dos mesmos termos propostos? Isso aponta para a inclusão do repertório próprio dos alunos nas redes a serem conectadas. Como as conexões se modificam no tempo? Os ciclos de revisão e reconsideração dos estudantes, acerca de um determinado tema, impõem uma dinâmica em suas redes de significações. O estudo preliminar aqui apresentado, não dá conta dessa dinâmica pois não estamos (ainda) observando as variações das redes no tempo. Como as conexões que sistematicamente ocorrem, para vários alunos são influenciadas pelas relações sociais e as realidades culturais da sala de aula? No modelo apresentado, a atividade proposta considera essencialmente os aspectos cognitivos da construção dos conceitos, embora, algumas ou muitas das relações conectadas pelos alunos, nas redes, podem emergir a partir de um fenômeno social de um determinado grupo ou subgrupo cultural, dentro da sala de aula.

## **Próximos passos**

O desenvolvimento da abordagem de uma análise de redes para investigação da Ecologia Conceitual dos estudantes abordagem pesquisa apontam para (1) a inclusão de vocabulário trazido pelos próprios estudantes, a fim de que as conexões feitas por eles possam representar de maneira mais precisa as relações de causa e efeito que eles constroem para compreensão dos fenômenos discutidos; (2) a análise longitudinal das características dessas redes, pois

numa Ecologia Conceitual, a viabilidade de elementos do sistema é verificada geração após geração ou, no sentido toulmiano, após revisões e revisões das próprias assunções e (3) a inclusão dos aspectos sociais influenciadores das relações e dos significados compartilhados no grupo, pois não se pode descartar o poder da construção de convicções a partir do entorno social, e com isso, um aspecto promissor dessa abordagem é a possibilidade de se estudar a rede social do grupo juntamente as suas redes de significados e de relações causais, permitindo que sejam elucidados aspectos multidisciplinares da construção de conceitos em um grupo de estudantes.

## Agradecimentos e apoios

Agradecimentos à Sociedade Brasileira de Física, especialmente ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física pela viabilização deste e de outros trabalhos. À fundação Capes, do Ministério da Educação do Brasil.

## Referências

- BARABÀSI, A.-L. et al. Evolution of the social network of scientific collaborations. **Physica A: Statistical mechanics and its applications**. V. 311, n. 3, 2002, p. 590–614.
- BORGATTI, S. P. et al. Network analysis in the social sciences. **Science**. V. 323, n. 5916, 2009, p. 892–895.
- CATTELL, R. B. The scree test for the number of factors. **Multivariate behavioral research**. V. 1, n. 2, 1966, p. 245–276.
- CILLIERS, P. "Boundaries, hierarchies and networks in complex systems." **International Journal of Innovation Management**. V.5, n. 2, 2001, p.135-147.
- CSARDI, G.; NEPUSZ, T. The igraph software package for complex network research. **InterJournal, Complex Systems**. V. 1695, n. 5, 2006, p. 1-9.
- DISESSA, A. A. Toward an epistemology of physics. **Cognition and instruction**. V. 10, n. 2-3, 1993, p. 105–225.
- DISESSA, A. A.; SHERIN, B. L. What changes in conceptual change? **International journal of science education**. V. 20, n. 10, 1998, p. 1155–1191.
- DISESSA, A. A. Why “conceptual ecology” is a good idea. In: **Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice**. Springer, 2002, p. 28–60.
- JONASSEN, D. H. **Semantic network elicitation: tools for structuring hypertext**. Oxford, UK: Intellect, 1990.
- LADYMAN, J.; LAMBERT, J. e WIESNER, K. "What is a complex system?." **European Journal for Philosophy of Science**. V. 3, n. 1, 2013, p. 33-67.
- LÊ, S. et al. Factominer: an r package for multivariate analysis 1.3.2. **Journal of statistical software**. V. 25, n. 1, 2008, p. 1–18.
- MARTINEZ, A. et al. Combining qualitative evaluation and social network analysis for the study of classroom social interactions. **Computers & Education**. V. 41, n. 4, 2003, p. 353-368.

PitchLab Guitar Tuner. 2016. Disponível em: <http://pitchlab-pro.android.informer.com>

POSNER, G.J., et al. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. **Science education**. V. 66, n. 2, 1982, p. 211-227.

R - Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2008. Disponível em: <http://www.R-project.org>

RAICHE, G.; MAGIS, D. **nfactors: Parallel Analysis and Non Graphical Solutions to the Cattell Scree Test 2.3.3**. 2010. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/nFactors/index.html>

WOLD, S.; ESBENSEN, K.; GELADI, P. Principal component analysis. **Chemometrics and intelligent laboratory systems**. V. 2, n. 1-3, 1987, p. 37–52.