



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, MATEMÁTICA E ESTATÍSTICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 9

MAPEAMENTO DA ESTRUTURA COGNITIVA EM
ONDULATÓRIA: UM ESTUDO COM O TESTE DE ASSOCIAÇÃO
NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)

José Vânio Paula Silva

MOSSORÓ-RN

2025

JOSÉ VÂNIO PAULA SILVA

**MAPEAMENTO DA ESTRUTURA COGNITIVA EM
ONDULATÓRIA: UM ESTUDO COM O TESTE DE ASSOCIAÇÃO
NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)**

Dissertação apresentada ao Polo 9 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física do Centro de Ciências Exatas e Naturais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora: Profa. Dra. Erlania Lima de Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos.

MOSSORÓ – RN
2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

P326m PAULA SILVA, JOSE VANIO .
MAPEAMENTO DA ESTRUTURA COGNITIVA EM
ONDULATÓRIA: UM ESTUDO COM O TESTE DE ASSOCIAÇÃO
NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC) / JOSE VANIO PAULA
SILVA. - 2025.
87 f. : il.

Orientadora: . Erlania Lima de Oliveira..
Coorientador: Carlos Alberto dos Santos..
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Física, 2025.

1. Física Ondulatória. 2. Aprendizagem
Significativa. 3. TANC. 4. Escalonamento
multidimensional. I. Lima de Oliveira., . Erlania
, orient. II. dos Santos., Carlos Alberto , co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOSÉ VÂNIO PAULA SILVA

**MAPEAMENTO DA ESTRUTURA COGNITIVA EM
ONDULATÓRIA: UM ESTUDO COM O TESTE DE ASSOCIAÇÃO
NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação (nome dado na instituição) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Aprovada em: 29 de agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Erlania Lima de Oliveira - Orientadora
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA

Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos - Coorientador
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA

Profa. Dra. Luciana Angélica da Silva Nunes
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA

Prof. Dr. Antônio Marques dos Santos
Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte- IFRN

MOSSORÓ - RN

2025

“Dedico esta dissertação a Deus, por me prover a força para enfrentar o Everest que é a pesquisa acadêmica. Em cada noite de estudo, senti sua presença, guiando-me através da névoa de artigos científicos e teorias complexas, provando que milagres existem, especialmente na forma de prazos estendidos.”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse ao longo de minha vida e não somente nestes anos como universitário, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, a seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

É com muita admiração e enorme respeito que venho mostrar toda minha gratidão a minha orientadora Prof. Dra. Erlania Lima de Oliveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos, que dia após dia mostra sua dedicação e amor por esta profissão tão essencial na vida de todos.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

*“Temos que continuar aprendendo. Temos que estar abertos. E temos que estar prontos
para espalhar nosso conhecimento a fim de chegar a uma compreensão mais elevada
da realidade.”*

Thich Nhat Hanh

RESUMO

MAPEAMENTO DA ESTRUTURA COGNITIVA EM ONDULATÓRIA: UM ESTUDO COM O TESTE DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)

O presente trabalho investigou os efeitos do ensino de Física Ondulatória na organização cognitiva de estudantes do Ensino Médio, buscando compreender de que modo diferentes estratégias pedagógicas podem favorecer a construção de entendimentos mais sólidos e coerentes dos conceitos envolvidos. Para isso, foi conduzida uma sequência de cinco aplicações do Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC), configurando uma abordagem inédita na literatura, voltada a acompanhar a evolução temporal das estruturas conceituais dos alunos ao longo de uma intervenção didática sobre oscilações, ondas e acústica. As aplicações do TANC ocorreram antes, durante e após o ensino dos conteúdos, permitindo mapear as transformações progressivas na organização conceitual dos estudantes. As matrizes de dados foram processadas no software estatístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), por meio do algoritmo de Escalonamento Multidimensional (ALSCAL/INDISCAL). Ressalta-se que o SPSS é um software pago e licenciado, disponibilizado institucionalmente pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), garantindo a conformidade ética e técnica da análise. A pesquisa foi realizada entre fevereiro e março de 2025, no Instituto São José (Aracati-CE), envolvendo 14 alunos, dos quais 11 concluíram todas as etapas. Os resultados evidenciaram que, inicialmente, as estruturas conceituais eram dispersas e pouco organizadas, mas, com o avanço da intervenção, emergiram agrupamentos conceituais mais coerentes e alinhados ao modelo científico. A análise individual de casos, incluindo estudantes com diferentes rendimentos e necessidades educacionais específicas, revelou mudanças significativas na estrutura cognitiva, indicando a formação progressiva de redes conceituais estáveis e integradas.

Palavras-chave: Física Ondulatória; Aprendizagem Significativa; TANC; Escalonamento multidimensional.

ABSTRACT

MAPPING THE COGNITIVE STRUCTURE IN WAVES: A STUDY WITH THE NUMERICAL ASSOCIATION OF CONCEPTS TEST (TANC)

This study investigated the effects of teaching Wave Physics on the cognitive organization of high school students, aiming to understand how different pedagogical strategies can foster the development of more solid and coherent conceptions of the topics addressed. To this end, a series of five administrations of the Numerical Concept Association Test (TANC) was conducted, establishing a longitudinal approach unprecedented in the literature, designed to monitor the temporal evolution of students' conceptual structures throughout a didactic intervention on oscillations, waves, and acoustics. The TANC assessments were administered before, during, and after the teaching process, enabling the mapping of progressive transformations in students' conceptual organization. The data matrices were processed using the statistical software SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), through the Multidimensional Scaling algorithms (ALSCAL/INDISCAL). It is worth noting that SPSS is a paid and licensed software, institutionally provided by the Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), ensuring the ethical and technical compliance of the analyses. The research was conducted between February and March 2025 at Instituto São José (Aracati, Ceará, Brazil), involving 14 students, 11 of whom completed all stages. The results revealed that the initial conceptual structures were dispersed and poorly organized, but as the intervention progressed, more coherent and scientifically aligned conceptual groupings emerged. Individual case analyses, including students with varying levels of performance and special educational needs, indicated significant changes in cognitive structure, pointing to the progressive formation of stable and integrated conceptual networks.

Keywords: Wave Physics; Meaningful Learning; TANC; Multidimensional Scaling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (A) Mapa com $S=0,00086$; (B) Mapa com $S=0,00568$; (C) Mapa com $S=0,05446$	25
Figura 2 - Mapa conceitual.....	27
Figura 3 - Mapas conceituais obtidos a partir de um TANC.....	27
Figura 4 - Mapa de um grupo de professores.....	38
Figura 5 - Mapa obtido a partir de medidas de similaridade geradas pelo ChatGPT.....	38
Figura 6 - Mapa obtido com uma matriz contendo valores aleatórios.....	39
Figura 7 - Mapa do grupo no pré-teste.....	40
Figura 8 - Mapa do grupo no pós-teste.....	41
Figura 9 - TANC1: Mapa do grupo.....	45
Figura 10 - TANC2: Mapa do grupo.....	46
Figura 11 - TANC3: Mapa do grupo.....	46
Figura 12 - TANC4: Mapa do grupo.....	47
Figura 13 - TANC5: Mapa do grupo.....	48
Figura 14 - TANC1: Mapa do aluno 9.....	49
Figura 15 - TANC1: Mapa do aluno 10.....	49
Figura 16 - TANC3: Mapa do aluno 9.....	50
Figura 17 - TANC3: Mapa do aluno 10.....	51
Figura 18 - TANC5: Mapa do aluno 9.....	51
Figura 19 - TANC5: Mapa do aluno 10.....	52
Figura 20 - Curvas de monotonicidade dos alunos selecionados. (A): TANC1, aluno 1; (B): TANC1, aluno 5; (C): TANC3, aluno 1; (D): TANC3, aluno 5; (E): TANC5, aluno 1; (F): TANC5, aluno 5.....	54
Figura 21 - TANC1: Mapa do aluno 1. $Dim1=0,6723$; $Dim2=0,7076$; $W=0,1057$	55
Figura 22 - TANC3: Mapa do aluno 1. $Dim1=0,6165$; $Dim2=0,5203$; $W=0,1008$	56
Figura 23 - TANC5: Mapa do aluno 1. $Dim1=0,9489$; $Dim2=0,1180$;	

W=0,8302.....	56
Figura 24 - TANC1: Mapa do aluno 5. Dim1=0,3198; Dim2=0,2859; W=0023.....	57
Figura 25 - TANC3: Mapa do aluno 5. Dim1=0,4097; Dim2=0,2983; W=0,1921.....	58
Figura 26 - TANC5: Mapa do aluno 5. Dim1=0,1201; Dim2=0,7930; W=0,8226.....	58
Figura 27 - TANC2: Mapa do aluno 9. Dim1=0,0032; Dim2=0,9717.....	59
Figura 28 - TANC2: Mapa do aluno 11. Dim1=0,0285; Dim2=0,8307.....	59
Figura 29 - TANC3: Mapa do aluno 7. Dim1=0,8776; Dim2=0,0755.....	60
Figura 30 - TANC3: Mapa do aluno 7 com eixos cartesianos (vermelhos) a 45 graus dos eixos originais.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de similaridade fornecidas pelo ChatGPT.....	37
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC1.....	43
Tabela 3 - Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC2.....	43
Tabela 4 - Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC3.....	43
Tabela 5 - Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC4.....	44
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC5.....	45
Tabela 7 - Pesos dimensionais e estranheza no TANC1.....	52
Tabela 8 - Pesos dimensionais e estranheza no TANC3.....	53
Tabela 9 - Pesos dimensionais e estranheza no TANC5.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 MAPEAMENTO COGNITIVO E ESTRUTURA CONCEITUAL	18
2.2 TESTE DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)	19
2.3 ANÁLISE DOS TESTES DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC) COM ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL (EMD)	21
2.3.1 Aspectos estatísticos da EMD	23
2.3.2 Interpretação Topológica dos Mapas Conceituais	25
3 METODOLOGIA	29
3.1 TIPO DE PESQUISA	29
3.2 PRODUTO EDUCACIONAL: ESTRUTURA E APLICAÇÃO	30
3.3 ESTRUTURA GERAL DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 ANÁLISE DOS TESTES DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)	34
4.1.1 Grupo 1: rendimento escolar	41
4.1.2 Grupo 2: pesos dimensionais	52
4.1.2.1 – Grupo 2: aluno 1	53
4.1.2.2 – Grupo 2: aluno 5	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS	64
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL: SEQUÊNCIA DIDÁTICA DIAGNÓSTICA PARA O ENSINO DE ONDULATÓRIA COM USO DO TANC	72

1 INTRODUÇÃO

A Física, enquanto ciência que busca compreender, descrever e prever os fenômenos naturais, é essencial para a formação de cidadãos críticos, capazes de entender o mundo em que vivem e interagir de maneira consciente e responsável com a sociedade contemporânea, cada vez mais dependente da tecnologia e de processos científicos avançados. A compreensão dos fenômenos físicos permite aos estudantes interpretar a realidade de forma fundamentada e tomar decisões embasadas cientificamente, ampliando sua autonomia intelectual e protegendo-os contra manipulações.

No mundo contemporâneo, marcado pela rápida circulação de conteúdos nas plataformas digitais e redes sociais, os estudantes tornam-se cada vez mais vulneráveis à manipulação e à propagação das chamadas fake News, tornando o desenvolvimento de competências críticas indispensável. Essa urgência se intensifica quando consideramos que nossos estudantes, pertencentes às gerações digitais, constroem grande parte de sua comunicação, expressão e participação social nesses ambientes, espaços onde informações verdadeiras e falsas circulam lado a lado em velocidade e volume sem precedentes.

Conforme o relatório da UNICEF (2021), crianças e jovens são particularmente expostos à desinformação e necessitam de habilidades de literacia midiática para navegar nesse cenário. De modo semelhante, Morais e Sobral (2020) mostram que, mesmo no ensino superior, persistem lacunas na capacidade dos estudantes de identificar notícias falsas, reforçando que a educação desempenha papel decisivo na mitigação desse risco. Nesse contexto, o ensino de Física assume uma função estratégica, pois, ao desenvolver nos estudantes a capacidade de interpretar fenômenos, analisar evidências e fundamentar suas decisões com base na ciência, contribui diretamente para reduzir sua vulnerabilidade a informações distorcidas.

Entretanto, o ensino de Física não tem conseguido exercer plenamente essa função. Os desafios tornam-se mais evidentes quando o processo de ensino permanece ancorado em metodologias tradicionais, centradas na transmissão expositiva de conteúdos, na memorização de equações isoladas e na resolução mecânica de exercícios padronizados. Nessas condições, perde-se a oportunidade de promover o raciocínio crítico, a compreensão conceitual e a articulação entre a Física e situações reais,

justamente as competências importantes para enfrentar a desinformação no mundo contemporâneo.

Essa limitação metodológica se intensifica quando consideramos que o modelo tradicional, centrado apenas na transmissão de conteúdos, frequentemente desconsidera o papel ativo do estudante na construção do conhecimento e ignora a importância de suas concepções prévias e vivências. Essa postura contribui para que a Física continue sendo percebida como uma disciplina difícil e desconectada do cotidiano, dificultando o processo pedagógico, favorecendo aprendizagens superficiais e perpetuando concepções alternativas que interferem na apropriação dos conceitos científicos.

Diante desse cenário, torna-se essencial repensar o processo de ensino, de modo que a escola e especialmente o docente, atualize suas metodologias, criando condições para que os estudantes relacionem os conteúdos às suas experiências cotidianas. Como destaca Kong et al. (2021), práticas baseadas apenas na exposição verbal e na transmissão de informações já não atendem às demandas contemporâneas. Quando o ensino se ancora em experiências contextualizadas e situações reais, os estudantes apresentam maior motivação, engajamento e capacidade de atribuir sentido ao que aprendem, favorecendo uma aprendizagem mais profunda.

Reconhecendo esse contexto, torna-se necessário refletir sobre novas estratégias pedagógicas que aproximem o ensino de Física da realidade dos estudantes. Nesse sentido, este trabalho investigou os efeitos do ensino de Física Ondulatória na organização cognitiva de alunos do Ensino Médio, analisando como diferentes estratégias podem favorecer a consolidação de conceitos relacionados a oscilações, ondas e acústica.

Para que tais estratégias sejam bem-sucedidas, é fundamental compreender o ponto de partida dos estudantes. Assim, identificar as concepções alternativas iniciais constitui um passo essencial, uma vez que essas ideias prévias influenciam diretamente a forma como novos conhecimentos serão assimilados. O uso de instrumentos diagnósticos permite mapear sistematicamente essas concepções, corretas, incompletas ou equivocadas, oferecendo ao docente um panorama claro de como os estudantes organizam seus conhecimentos antes do ensino formal. Esse diagnóstico inicial orienta o planejamento de intervenções didáticas mais eficazes, ajustando estratégias às necessidades específicas da turma e evitando a mera transmissão de conteúdo. Ao considerar as concepções iniciais dos discentes, o docente torna o ensino mais conectado à realidade deles, favorecendo compreensões mais sólidas, coerentes com os

conceitos científicos e integradas de forma significativa à estrutura cognitiva dos estudantes.

Partindo desses pressupostos, este estudo foi orientado por quatro eixos centrais: identificar as concepções alternativas iniciais dos estudantes sobre os conceitos de Física Ondulatória; acompanhar a evolução de seus entendimentos ao longo da intervenção por meio de cinco aplicações do Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC); analisar a reorganização de suas estruturas conceituais utilizando técnicas de Escalonamento Multidimensional; e compreender como esses conhecimentos se transformam ao longo do processo educativo.

Nesse processo de acompanhamento, diferentes ferramentas analíticas podem aprofundar a compreensão sobre a forma como os estudantes estruturam seus conhecimentos, entre elas, o Escalonamento Multidimensional, adotado neste trabalho. Essa técnica possibilita uma análise mais refinada da organização cognitiva, revelando relações conceituais que dificilmente emergiriam a partir de avaliações tradicionais, como provas objetivas ou dissertativas. O método permite visualizar como os estudantes agrupam ou dissociam conceitos, evidenciando lacunas e conexões importantes no percurso de aprendizagem. Tal abordagem fornece, portanto, uma base sólida para diagnosticar dificuldades conceituais e orientar intervenções pedagógicas mais eficazes.

Desse modo, os dados obtidos também contribuem para subsidiar a elaboração de materiais didáticos mais assertivos, que considerem as dificuldades recorrentes e proponham sequências de ensino alinhadas à lógica de aprendizagem dos estudantes. Assim, o docente deixa de atuar apenas como transmissor de conteúdos e passa a assumir o papel de mediador que promove a aprendizagem significativa, fortalecendo tanto a compreensão dos fenômenos físicos quanto o interesse dos alunos pela disciplina.

1.1 OBJETIVO GERAL

Investigar a evolução da estrutura cognitiva de estudantes do Ensino Médio no aprendizado de Física Ondulatória, por meio da aplicação do Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC), analisando como diferentes estratégias pedagógicas podem favorecer a organização e a consolidação dos conceitos de oscilações, ondas e acústica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar e aplicar o TANC em diferentes momentos do processo de ensino, registrando a evolução da organização conceitual dos estudantes.
- Interpretar e analisar os resultados do TANC por meio das técnicas de Escalonamento Multidimensional (EMD), identificando mudanças nas configurações espaciais ao longo da sequência didática.
- Comparar os mapas cognitivos obtidos nos diferentes momentos (por exemplo, TANC1 e TANC5), verificando deslocamentos, aproximações ou afastamentos entre conceitos.
- Avaliar em que medida as transformações nas estruturas conceituais refletem o impacto da sequência didática em Ondulatória.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos que sustentam a análise da estrutura conceitual adotada nesta pesquisa, articulando o mapeamento cognitivo, o **TESTE DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)** e o **Escalonamento Multidimensional (EMD)** no estudo da aprendizagem em Física Ondulatória. O objetivo é situar a investigação no campo das pesquisas sobre organização do conhecimento científico, discutindo como essas ferramentas permitem acessar, representar e interpretar a forma como os estudantes estabelecem relações entre conceitos e como essas conexões se transformam ao longo do processo de ensino-aprendizagem.

2.1 MAPEAMENTO COGNITIVO E ESTRUTURA CONCEITUAL

A aprendizagem de conceitos científicos, sobretudo na Física, exige a construção de uma rede de relações entre termos, leis e modelos. Essa rede, denominada estrutura conceitual, organiza o conhecimento de modo que alguns conceitos assumem papel central, funcionando como núcleos estruturantes, enquanto outros permanecem em posições periféricas ou complementares.

Compreender essa organização interna requer metodologias capazes de tornar visíveis as conexões cognitivas estabelecidas pelos estudantes. Nesse contexto, o mapeamento cognitivo se apresenta como uma estratégia de externalização da estrutura conceitual, convertendo-a em representações gráficas ou numéricas. Mais do que verificar a simples memorização de conteúdos, o mapeamento permite compreender como os conceitos se inter-relacionam e se transformam ao longo do tempo, possibilitando diagnosticar concepções e avaliar mudanças cognitivas decorrentes de intervenções pedagógicas.

O mapeamento cognitivo pode ser realizado por diferentes ferramentas, entre as quais se destacam:

- Mapas conceituais
- Testes de associação de conceitos (escrita ou numérica)
- Técnicas estatísticas como o Escalonamento Multidimensional (MDS)

O mapa conceitual foi desenvolvido por Joseph D. Novak e seus colaboradores como uma forma de representação gráfica dos princípios da Teoria da Aprendizagem Significativa, formulada por David P. Ausubel. Essa teoria, proposta originalmente nos

anos 1960, defende que a aprendizagem torna-se significativa quando novas informações são relacionadas de maneira não arbitrária e substantiva aos conhecimentos prévios do estudante, que atuam como subsunçores (AUSUBEL, 1960; AUSUBEL, 1961; AUSUBEL; FITZGERALD, 1961). Com base nesses pressupostos, Novak (1990) sistematizou os mapas conceituais como ferramentas para visualizar e promover a estruturação hierárquica do conhecimento, representando as relações entre conceitos e facilitando a aprendizagem significativa.

Ao construir ou interpretar um mapa conceitual, o aluno explicita como compreende as relações entre os conceitos de um determinado tema, permitindo ao professor avaliar a profundidade e a coerência dessa compreensão (FARIAS E BELLUZZO, 2021).

Neste trabalho, optou-se por utilizar o Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC), pois ele oferece uma forma complementar de capturar a estrutura conceitual dos estudantes, indo além da representação visual proporcionada pelos mapas conceituais. O TANC possibilita uma análise estruturada e quantitativa: ao solicitar que os estudantes avaliem o grau de relação entre diferentes pares conceituais, obtém-se uma matriz de dissimilaridade que revela como esses conceitos estão organizados cognitivamente.

Essa abordagem é mais direta e compatível com os objetivos da pesquisa, pois atua sobre a memória associativa e exige apenas o julgamento de proximidade entre conceitos, sem a interferência de outras habilidades procedimentais envolvidas na resolução de problemas. Além disso, os dados coletados pelo TANC podem ser processados por meio do Escalonamento Multidimensional (MDS), técnica estatística que gera representações visuais capazes de evidenciar padrões de agrupamento conceitual antes e depois da intervenção didática.

Portanto, os mapas conceituais, os testes de associação e as técnicas de mapeamento cognitivo são recursos complementares que contribuem para acessar, interpretar e intervir na estrutura conceitual dos aprendizes. Essa compreensão aprofundada da organização do conhecimento dos estudantes é essencial para favorecer uma aprendizagem significativa, transformadora e duradoura em contextos de ensino de Ciências.

2.2 TESTE DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)

O TANC constitui uma ferramenta quantitativa que possibilita uma representação mais precisa da organização conceitual dos estudantes, sobretudo no

domínio da Física Ondulatória. Proposto no Brasil por Dos Santos (1978), o TANC tem como objetivo mensurar a intensidade das associações cognitivas percebidas entre pares de conceitos.

No âmbito da Física, o TANC consolidou-se como instrumento eficaz para mapear a estrutura de conhecimentos em diversas áreas. Dos Santos e Moreira (1979) empregaram a Análise Multidimensional para traçar o mapa cognitivo de conceitos físicos de forma geral, e, posteriormente, aplicaram o Escalonamento Multidimensional à associação numérica de conceitos em termodinâmica, demonstrando como as concepções dos alunos se organizam espacialmente no espaço conceitual (DOS SANTOS; MOREIRA, 1979; 1980). Esses estudos indicam que o mapeamento multidimensional permite identificar núcleos de conhecimento, áreas de sobreposição entre conceitos e lacunas conceituais, fornecendo subsídios robustos para o desenvolvimento de intervenções didáticas que articulem o saber formal às representações prévias dos alunos.

Posteriormente, o TANC passou a ser explorado em diferentes contextos de pesquisa. Em Física Quântica, Hilger e Moreira (2013) o combinaram com a associação livre de palavras, de modo a quantificar a familiaridade numérica entre pares de termos e, simultaneamente, captar representações verbais espontâneas dos estudantes. No âmbito do MNPEF/UFERSA, o instrumento também tem sido amplamente utilizado em dissertações e trabalhos publicados, com aplicações em áreas como eletricidade (DE AQUINO, E. M., 2025), e ondulatória (FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024; FÉLIX, H. R. T., 2024). O que está por trás do princípio do TANC baseia-se na ideia de estrutura cognitiva, assim posta por Ausubel e Fitzgerald, citados por Félix (2024):

Por estrutura cognitiva entende-se a organização, estabilidade e clareza de conhecimento de um indivíduo em um determinado campo do conhecimento (...). No sentido mais geral e de longo prazo, as variáveis da estrutura cognitiva referem-se à influência de propriedades organizacionais significativas na aquisição de conhecimento nesta área disciplinar (...). No sentido mais específico e de curto prazo, as variáveis de estrutura cognitiva referem-se aos efeitos das propriedades organizacionais apenas dos conceitos imediatamente (ou próximos) relevantes dentro de um determinado campo de assunto sobre a aprendizagem e retenção de pequenas unidades do referido assunto.

Embora os procedimentos analíticos reportados por de Aquino e Félix sejam integralmente utilizados nesta dissertação, há uma diferença importante que deve ser salientada. Enquanto nos estudos anteriores o TANC foi aplicado apenas antes e depois do produto educacional, aqui o teste foi aplicado em diferentes momentos para possibilitar a investigação da evolução temporal da estrutura cognitiva em função do processo de aprendizagem, conforme detalhado no capítulo 4.

O TANC é capaz de revelar nuances sutis na organização conceitual dos estudantes, mensurando até que ponto eles percebem determinados conceitos como próximos ou distantes. Esse diagnóstico permite identificar agrupamentos cognitivos e verificar a coerência interna da estrutura conceitual de cada estudante. Por exemplo, após a introdução dos tópicos “frequência”, “amplitude”, “velocidade de propagação”, “comprimento de onda” e “ressonância”, o docente fornece aos alunos uma tabela contendo todos os pares possíveis desses termos. Cada par recebe, então, uma nota de 0 a 5, indicando o grau de relação percebido. Com esses dados, utiliza-se um software estatístico para gerar um mapa conceitual baseado em similaridades, que pode ser comparado antes e depois da sequência didática, evidenciando a reorganização cognitiva provocada pelo ensino.

No contexto desta dissertação, o uso do TANC apresentado no Apêndice será fundamental para comparar a estrutura conceitual dos estudantes em diferentes momentos da mediação pedagógica de Física Ondulatória, permitindo avaliar, de forma empírica, o impacto da aprendizagem significativa na reconfiguração das conexões entre os conceitos. O teste, com as instruções dados aos alunos.

2.3 ANÁLISE DOS TESTES DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC) COM ESCALONAMENTO MULTIDIMENSIONAL (EMD)

O emprego de técnicas de Escalonamento Multidimensional (EMD) no tratamento dos dados do TANC remonta aos trabalhos pioneiros de C. A. dos Santos (1978), que introduziu simultaneamente, no Brasil, tanto os testes de associação numérica quanto os algoritmos de *Multidimensional Scaling* (MDS). Esses métodos, posteriormente consolidados na literatura sob o termo *Escalonamento Multidimensional* (DOS SANTOS; MOREIRA, 1991). A literatura a respeito desse assunto é imensa, mas nossa leitura para a elaboração dessa dissertação se restringiu à dissertação

mencionada, aos trabalhos elaborados aqui no MNPEF-UFERSA (DE AQUINO, E. M., 2025; FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024; FÉLIX, H. R. T., 2024) e a alguns poucos artigos não mencionados por essas referências.

O TANC gera uma matriz de similaridades entre pares de conceitos. Embora essa matriz forneça os dados brutos do julgamento dos estudantes, sua leitura direta não permite visualizar, de maneira clara, a estrutura global dessas relações. É nesse ponto que o EMD se torna fundamental: trata-se de uma técnica estatística que converte as medidas de similaridade em uma representação espacial bidimensional. O resultado é um mapa cognitivo, em que cada ponto representa um conceito e a distância entre eles expressa o grau de proximidade ou afastamento percebido pelos estudantes.

A técnica de EMD foi desenvolvida para solucionar um problema geométrico clássico: como reconstruir um mapa a partir das distâncias entre seus pontos. De forma análoga, ela busca representar, em um espaço geométrico, as distâncias psicológicas ou cognitivas entre conceitos. Assim, quanto maior a semelhança percebida entre dois conceitos, menor será a distância entre eles no mapa resultante.

Existem diversos algoritmos de EMD, que podem ser classificados em duas categorias principais:

- Métricos, que utilizam os valores absolutos das medidas de proximidade (similaridade ou dissimilaridade);
- Não-métricos, que consideram apenas o ordenamento dessas medidas, estabelecendo uma relação monotônica entre similaridades e distâncias.

O presente trabalho utiliza o modelo não-métrico, implementado no pacote estatístico SPSS por meio dos algoritmos ALSCAL/INDSCAL (CARROLL; CHANG, 1970; TAKANE; YOUNG; DE LEEUW, 1977; YOUNG; TAKANE; LEWYCKYJ, 1978), amplamente empregados em pesquisas recentes na área do ensino de Ciências.

O princípio fundamental do EMD consiste em encontrar a configuração geométrica que melhor se ajusta às medidas de proximidade (similaridade ou dissimilaridade). Esse ajuste é obtido por meio da minimização de uma função estatística denominada Stress, que expressa o grau de discrepância entre as distâncias calculadas e as medidas originais de similaridade. O algoritmo busca a configuração que produza o menor valor de *Stress*, assegurando uma relação monotônica entre as

similaridades e as distâncias representadas, procedimento análogo ao método dos mínimos quadrados, utilizado em ajustes de dados experimentais.

Por meio de algoritmos sofisticados (DOS SANTOS, 1978; DE AQUINO, E. M., 2025; FÉLIX, H. R. T., 2024), o EMD transforma as medidas de similaridade em coordenadas espaciais cuja dimensão é definida pelo usuário, sendo a representação bidimensional a mais comum na literatura. Essa conversão permite identificar padrões de agrupamento conceitual, núcleos de significação e lacunas cognitivas, fornecendo subsídios valiosos para a compreensão da organização interna do conhecimento dos estudantes e das transformações provocadas por intervenções pedagógicas.

De modo ilustrativo, o processo pode ser comparado à reconstrução de um mapa geográfico: conhecendo-se apenas as distâncias entre as cidades, é possível reconstruir a disposição espacial dos pontos. Da mesma forma, o EMD, a partir das distâncias cognitivas obtidas pelo TANC, reconstrói um mapa mental que representa as relações conceituais estabelecidas pelos estudantes.

2.3.1 Aspectos estatísticos da EMD

Existem duas modalidades de algoritmos EMD: algoritmos métricos e não-métricos. Ambos utilizam o método de ajustes de dados bem conhecido nas ciências experimentais como *método do qui quadrado*, χ^2 . O algoritmo ajusta os dados experimentais a uma determinada curva, de modo a função χ^2 seja mínima. Na EMD, essa função é conhecida como Stress, S, sendo assim definida (DE AQUINO, E. M., 2025):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i < j} (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2}{\sum_{i < j} d_{ij}^2}}, \quad (2.1)$$

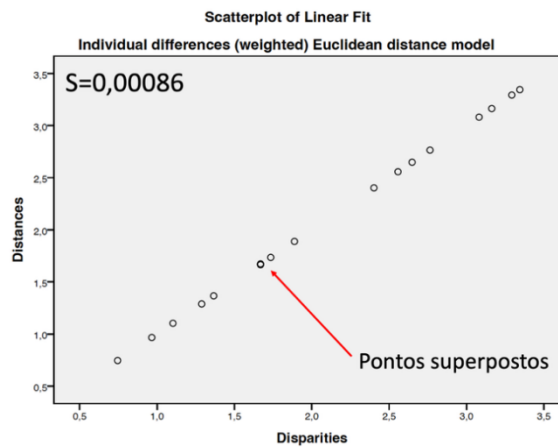
onde d_{ij} são as distâncias ajustadas, e, nos algoritmos métricos, $\hat{d}_{ij}$ são as medidas de similaridade. O algoritmo funciona exatamente como no caso das ciências experimentais, como a física. Nos algoritmos não-métricos, como o que usamos aqui, que são, do ponto de vista computacional, mais potentes do que os métricos, as medidas de similaridade não são diretamente usadas no processo de ajuste. Não há necessidade dos valores exatos dessas medidas. Basta saber o ordenamento dessas medidas. Não há

necessidade de saber os valores das similaridades entre os conceitos A-B e C-D, basta saber qual é o maior valor. Daí vem o nome da técnica: escalonamento.

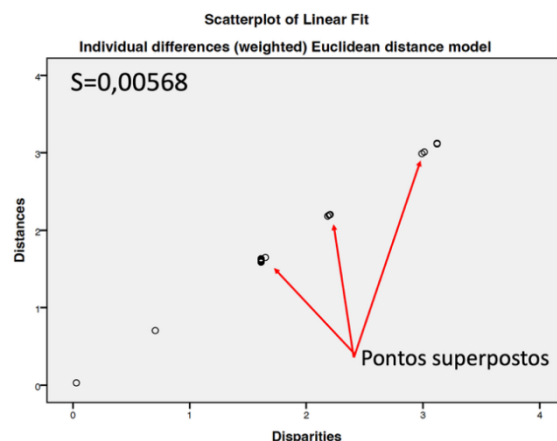
Nos algoritmos não-métricos, $\hat{d}_{ij}$, denominados disparidades, são números monotonicamente relacionados com as medidas de similaridade, s_{ij} . Ou seja, se $s_{ij} < s_{kl}$, então $\hat{d}_{ij} < \hat{d}_{kl}$. Portanto, o algoritmo transforma a matriz com as similaridades em uma matriz com as disparidades e ajusta os dados de modo que seja mínimo o valor de S (equação 2.1). O algoritmo faz isso, tendo em conta a necessidade de minimizar S e de não violar a desigualdade triangular. Ou seja, dados três pontos, i, j e k, suas disparidades devem satisfazer essa relação:

$$\hat{d}_{jk} < \hat{d}_{ij} + \hat{d}_{ik}. \quad (2.2)$$

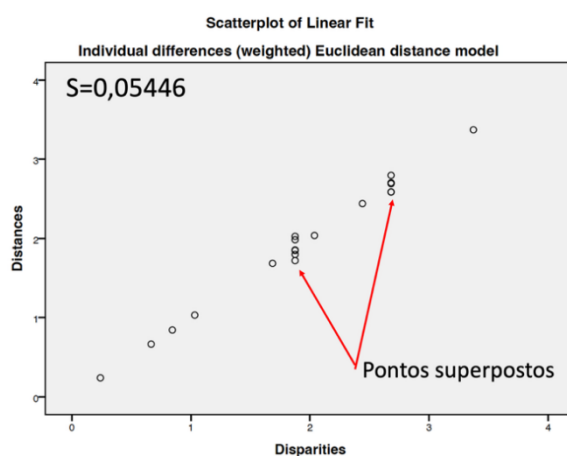
Raramente isso é possível para todos os conjuntos de três pontos. Há duas relações de monotônicas. Uma entre $\hat{d}_{ij}$ e s_{ij} , e outra, depois do ajuste, entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$. O algoritmo ALSCAL que usamos, apresenta essa última na saída dos resultados. A violação da desigualdade triangular se manifesta no valor de S e na monotonicidade entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$. Ou seja, quanto pior a monotonicidade, maior o valor de S, e pior é o ajuste. Dito de outro modo, quanto menor o valor de S, mais linear é a curva d_{ij} versus $\hat{d}_{ij}$, conforme ilustra a Figura 1. Os dados apresentados nessa figura foram extraídos dos resultados obtidos no pós-teste. Foram selecionados três mapas. O primeiro com $S=0,00086$, o segundo com $S=0,00568$, e o terceiro com $S=0,05446$. Vê-se claramente que quanto menor for o valor de S, ou seja, quanto melhor for o ajuste, mais linear é a relação monotônica entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$.



(A)



(B)



(C)

Figura 1 – (A) Mapa com $S=0,00086$; (B) Mapa com $S=0,00568$; (C) Mapa com $S=0,05446$.

Os valores de S e as linearidades nas curvas de monotonicidade podem ser usados para classificar os mapas conforme a qualidade dos dados iniciais. Quando as medidas de similaridade apresentam consistência organizacional, o ajuste aproxima-se da perfeição, com baixos valores de S e alta linearidade na curva de monotonicidade.

2.3.2 Interpretação Topológica dos Mapas Conceituais

Existem na literatura duas formas básicas de interpretar os resultados obtidos com o TANC. Na primeira, relatada em poucos casos, os investigadores tentam interpretar o significado de cada dimensão. Quando os estímulos têm propriedades físicas e sensoriais bem definidas, isso é mais fácil, mas quando os estímulos estão associados a propriedades cognitivas complexas, como é o caso de conceitos científicos, a associação de significados a cada dimensão é praticamente impossível. No caso de

conceitos científicos, não conhecemos na literatura nenhum trabalho com identificação das dimensões. O que há são artigos apresentando a análise com a formação de grupos de conceitos (DOS SANTOS, 1978; DOS SANTOS; MOREIRA, 1979; GLINER, 1981; IRESON, G., 1999; PATRICK, H.; KAPLAN, A.; RYAN, A. M., 2011; THRO, M. P., 1978). Félix e colaboradores acrescentaram à metodologia da formação de grupos, uma metáfora topológica para analisar os resultados (FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024). Em vez de $\text{dim}1$ versus $\text{dim}2$, são usados os pontos cardinais, Norte, Sul, Leste e Oeste, como ilustra a Figura 2.

Dado um espaço geométrico como esse ilustrado na Figura 2, é natural que se pense nos aspectos topológicos desse espaço. Não é por acaso que alguns autores têm trabalhado com essa ideia, do ponto de vista formal cuja natureza complexa está acima do escopo da presente dissertação (AFLALO, Y.; KIMMEL, R., 2013; CARROLL, J. D.; ARABIE, P., 1998; CHEN, C., 2013; CLANCY, S. J., 2006). Ficaremos aqui com a ideia intuitiva de Félix e colaboradores, que tem algo a ver com uma definição encontrada em notas de aula da UERJ (VILCHES, M. A., 2012):

A Topologia utiliza os mesmos objetos que a Geometria, com a seguinte diferença: não interessa a distância, os ângulos nem a configuração dos pontos. Na Topologia, objetos que possam transformar-se em outros, através de funções contínuas reversíveis, são equivalentes e indistinguíveis.

Dessa definição, Félix e colaboradores passaram a usar a ideia de congruência entre polígonos formados por determinados conceitos nos mapas conceituais. A figura 2 foi elaborada para ilustrar o procedimento analítico. Como já foi dito, em vez de usar os eixos dimensionais, como geralmente reportado na literatura, usamos os pontos cardinais como referência, porque nossa análise envolve dilatação e contração dos lados dos polígonos e rotações desses polígonos. Essas operações são mais simplesmente referidas em termos dos pontos cardinais do que dos eixos dimensionais.

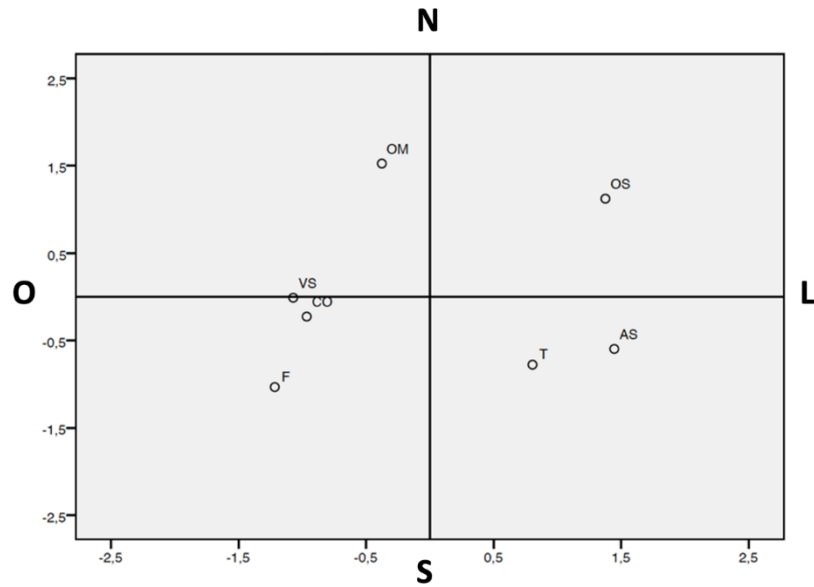
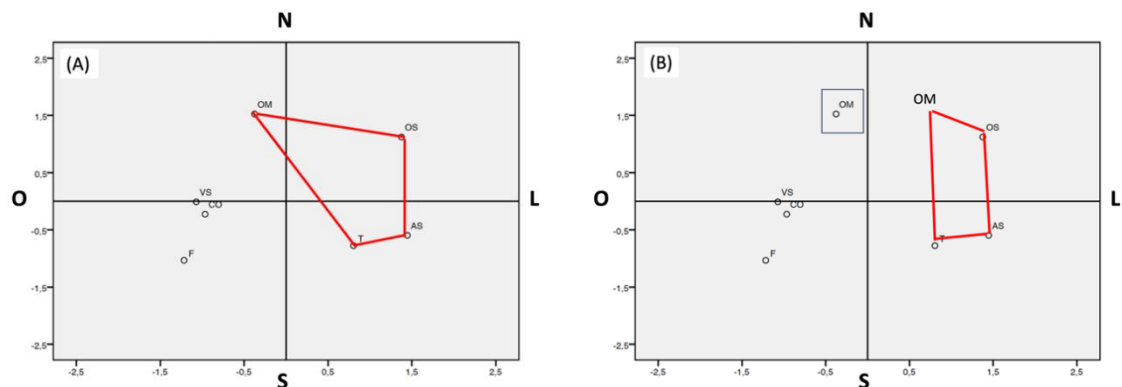


Figura 2 – Mapa conceitual.

O grupo destacado na Figura 3 pode ser denominado $\{T, OM, OS, AS\}$, ou qualquer denominação com as letras comutadas no sentido horário: $\{OM, OS, AS, T\}$, $\{OS, AS, T, OM\}$ e $\{AS, T, OM, OS\}$. Qualquer uma dessas denominações representam o mesmo grupo, mas ao longo desta dissertação sempre usaremos a primeira denominação, $\{T, OM, OS, AS\}$. E para apresentar a análise topológica, vamos denominar os grupos assim: $\{T-AS\}^a$, $\{T-AS\}^b$, $\{T-AS\}^c$ e $\{T-AS\}^d$.

Todos os grupos apresentados na Figura 3 são topologicamente congruentes. O grupo $\{T-AS\}^b$ transforma-se em $\{T-AS\}^a$, por intermédio de três operações: rotação no sentido horário, alterações nas distâncias T-OM e OS-OM. De modo análogo é fácil mostrar a congruência entre $\{T-AS\}^a$ e $\{T-AS\}^d$. O grupo $\{T-AS\}^d$ também é congruente com $\{T-AS\}^a$, uma vez que resulta de uma rotação de 180 graus desse último grupo.



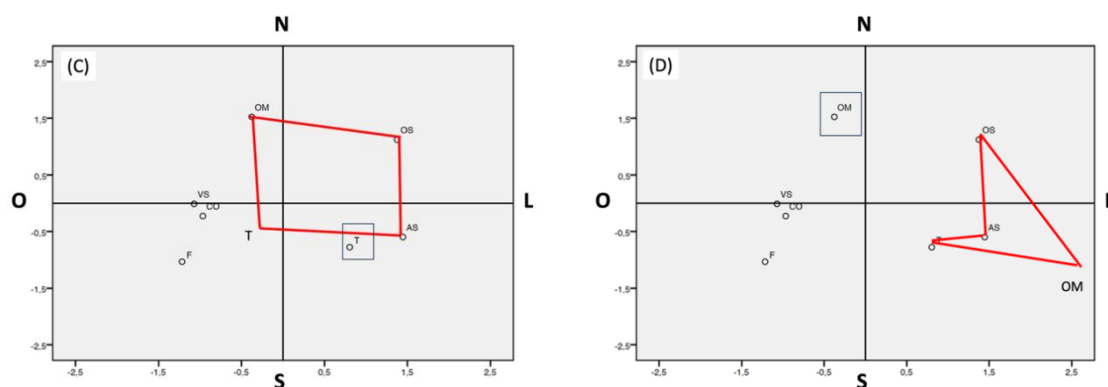


Figura 3 – Mapas conceituais obtidos a partir de um TANC

Usaremos esse procedimento no capítulo de resultados, destinado à análise e comparação dos mapas obtidos com o TANC, buscando evidenciar as transformações na estrutura conceitual dos estudantes ao longo da sequência didática. Desse modo, o presente referencial teórico consolida o alicerce conceitual da investigação, articulando teoria e prática na compreensão de conceitos de Física Ondulatória. O estudo do mapeamento cognitivo, do TANC e do EMD fundamenta as escolhas metodológicas que orientam a elaboração e aplicação do Produto Educacional.

A seguir, descreve-se a estrutura, o contexto de aplicação e os procedimentos adotados na condução da investigação, compondo o percurso metodológico desta pesquisa.

3 METODOLOGIA

3.1 TIPO DE PESQUISA

O objetivo do MNPEF é capacitar em nível de mestrado professores da Educação Básica quanto ao domínio de conteúdos de Física e de técnicas atuais de ensino para aplicação em sala de aula como, por exemplo, estratégias que utilizam recursos de mídia eletrônica, tecnológicos e/ou computacionais para motivação, informação, experimentação e demonstrações de diferentes fenômenos físicos. (<https://www1.fisica.org.br/mnpef/>).

Como qualquer mestrado profissional, o foco do MNPEF é o produto educacional (PE) e a dissertação restringe-se ao relato da aplicação do PE. Portanto, não se trata de um trabalho que exija uma tipologia de pesquisa usual. No portal da SBF, recomenda-se que o corpo da dissertação contenha: (I) uma introdução; (II) uma curta revisão bibliográfica sobre o assunto; (III) um capítulo de física relacionado ao tema abordado em nível superior ao considerado no currículo do Ensino Médio; (IV) o desenvolvimento do produto e o relato dos resultados obtidos com ele em sala de aula; (V) uma conclusão; (VI) referências bibliográficas nas normas da ABNT e (VII) apêndices, sendo um deles o produto educacional.

Observa-se que não há qualquer exigência quanto ao tipo de pesquisa, nem mesmo a necessidade de que ela seja declarada. Certamente uma dissertação do MNPEF não se enquadra na categoria de pesquisa quantitativa (GATTI, 2012), na medida em que o desenho de uma pesquisa quantitativa é muito restrito a um conjunto de metodologias bem definidas e validadas pela comunidade científica (LIBARKIN; KURDZIEL, 2002). Por exemplo, há necessidade de análise estatística a partir de resultados obtidos com grupos experimentais e controle, formados aleatoriamente na população a ser investigada. Essa exigência é praticamente impossível nas condições em que o PE deve ser aplicado, ou seja, o PE é aplicado de acordo com as circunstâncias de gestão da escola.

O que acontece na prática é que muitas dissertações do MNPEF contêm elementos de pesquisa qualitativa, tais como o uso de questionários e testes de avaliação pré e pós-aprendizagem. Esse tipo de abordagem enquadra-se no que se denomina estudo de caso (COUSIN, 2005), que visa explorar e descrever um cenário com vistas a promover a compreensão de determinada situação como a eficiência relativa de

determinada estratégia didática, por exemplo, como os alunos reagem a um jogo utilizado em sala de aula ou a um texto didático.

O Produto Educacional (PE) apresentado nesta dissertação consiste em uma sequência didática estruturada para o ensino de ondulatória, organizada com base nos conteúdos previstos para a disciplina e desenvolvida em consonância com o livro didático adotado na escola. A proposta foi elaborada para favorecer a compreensão progressiva dos conceitos, priorizando uma abordagem clara, contextualizada e coerente com a realidade do estudante. A questão referente essa aplicação é: essa estratégia didática favorece a organização conceitual na estrutura cognitiva dos alunos em conformidade com a estrutura do conteúdo?

A resposta foi investigada por meio de um estudo de caso de uma turma da 1ª Série do Ensino Médio do Instituto São José – Cidade de Aracati, no estado do Ceará. Participaram efetivamente 11 estudantes. Como instrumentos de medida foram usados testes de associação numérica de conceitos.

3.2 PRODUTO EDUCACIONAL: ESTRUTURA E APLICAÇÃO

O produto educacional desenvolvido consistiu em uma sequência didática voltada ao ensino de Física Ondulatória, concebida com base em princípios que valorizam a estrutura cognitiva dos estudantes e a organização conceitual dos conteúdos. O planejamento buscou ativar as concepções espontâneas dos estudantes por meio de apresentações descritivas dos conceitos essenciais, articulada com exemplos do cotidiano, imagens ilustrativas e analogias que possibilitaram a conexão entre conhecimentos já adquiridos e os novos conceitos abordados. Estruturada em seis etapas interdependentes, a proposta integra objetivos específicos, recursos didáticos e avaliações formativas, como o TANC, de forma articulada, promovendo a construção progressiva e integrada dos conceitos fundamentais da área. A seguir, apresenta-se a estrutura geral do produto e detalha-se a aplicação em cada um dos oito momentos.

A sequência foi organizada em três blocos temáticos: Oscilação, ondas mecânicas e acústica, de modo a garantir uma progressão lógica e integrada dos conceitos. Em primeiro lugar, abordou-se o Movimento Harmônico Simples (MHS), em que se definiu a oscilação periódica em torno de uma posição de equilíbrio. Nesse bloco, apresentou-se a representação gráfica de um MHS, explicitando como identificar,

em um gráfico deslocamento $\times$ tempo, as propriedades fundamentais: o período (T), a frequência (f) e a aceleração. Logo depois, mostrou-se como as equações de posição, velocidade e aceleração se relacionam.

No segundo bloco temático, abordou-se primeiramente a natureza das ondas mecânicas por meio de uma discussão qualitativa, sem recorrer a fórmulas. Utilizou-se a imagem de ondas na água para ilustrar que uma onda nada mais é do que uma sequência periódica de pulsos, distinto de um único pulso isolado. Em seguida, classificou-se essas ondas em transversais e longitudinais, além de diferenciá-las de ondas eletromagnéticas, que não dependem de meio material para se propagar. Posteriormente, apresentou-se as propriedades fundamentais de uma onda, agora com fórmulas: crista e vale, amplitude (A), comprimento de onda (λ) e velocidade de propagação (v). Logo depois, explorou-se os fenômenos ondulatórios, como: reflexão, refração, difração e, por fim, a ressonância.

No último bloco, a acústica foi estudada partindo do princípio de que a onda sonora é, antes de tudo, uma onda mecânica. Destacou-se que sua propagação depende de um meio material: no vácuo, sem partículas para vibrar, o som simplesmente não existe. Além disso, ao viajar de um alto-falante até o nosso ouvido, as moléculas de ar apenas oscilam localmente, elas não se propagam junto com onda. Em seguida, introduziu-se o conceito de infrassom e ultrassom e discutiu-se como a velocidade do som varia de acordo com o meio em que se propaga. Também se analisou o fenômeno da reflexão, responsável por ecos e reverberações quando a onda sonora incide sobre superfícies rígidas, e da refração, que faz com que o som mude de direção ao atravessar meios com diferentes propriedades (como ar quente e ar frio). Por fim, explorou-se as qualidades fisiológicas do som: altura, timbre e intensidade, ressaltando como cada uma delas interfere na forma como percebemos diferentes sons.

Dessa forma, a sequência didática ofertou uma progressão estruturada, iniciando-se pela fundamentação conceitual de oscilação (MHS), avançando para o delineamento matemático das propriedades de ondas, classificações fundamentais, fenômenos ondulatórios e, por fim, a acústica. Essa disposição em blocos temáticos garantiu que cada novo tópico se fundamentasse no anterior, promovendo uma aprendizagem significativa e coerente para os estudantes de física ondulatória.

3.3 ESTRUTURA GERAL DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Diagnóstico Inicial (50 min)

- Aplicação de instrumentos diagnósticos (TANC 1) para mapear as concepções alternativas e as associações semânticas iniciais dos alunos.

- O teste é composto por pares de conceitos, apresentados em uma tabela (apêndice A). Para cada par, o estudante deve indicar, em uma escala numérica de 1 a 9, o grau de relação percebido:

1 → conceitos altamente relacionados (ex.: temperatura e calor).

9 → conceitos praticamente sem relação (ex.: volume e velocidade).

Os valores intermediários (2 a 8) indicam níveis graduais de associação. Quanto mais próximo de 1, maior a relação percebida; quanto mais próximo de 9, menor a relação.

- Importante: não há limite de tempo para a realização do teste. O participante deve marcar com um “X” a coluna que melhor representa sua percepção para cada par de conceitos.

Exposição Qualitativa de Conceitos - Sem Equações (50 min)

- Em cada bloco temático, Oscilações, Ondas Mecânicas e Acústica, foi realizada uma apresentação descritiva dos conceitos centrais, utilizando exemplos do cotidiano, imagens e analogias explicativas para favorecer a compreensão inicial dos fenômenos.

- Objetivo: ativar conhecimentos prévios de modo a facilitar a diferenciação progressiva.

Introdução Gradual de Aspectos Matemáticos (50 min)

- Inserção dos parâmetros quantitativos (frequência, período, amplitude, comprimento de onda, velocidade de propagação e etc), após a consolidação das ideias qualitativas de cada bloco temático.

- Justificativa: evitar que a matemática apareça como algo desconectado, promovendo a reconciliação integradora.

Exercícios Práticos e Leituras Contextualizadas (100 min)

- Aplicação de exercícios extraídos do livro-texto, alinhados a cada bloco temático.

- Inclusão de textos e discussões sobre fenômenos acústicos em situações reais, aproximando teoria e prática.

Avaliações Formativas Intermediárias - TANC (50 min)

- Reaplicação periódica do TANC após cada bloco temático (pós-oscilações, pós-ondas, pós-acústica) para mensurar quantitativamente a evolução da organização conceitual.

Avaliações Formativas Finais - TANC (50 min)

- Reaplicação do TANC (pós-teste) após a conclusão da sequência didática, possibilitando a comparação entre a estrutura conceitual inicial e a final por meio da técnica de escalonamento multidimensional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DOS TESTES DE ASSOCIAÇÃO NUMÉRICA DE CONCEITOS (TANC)

Como já foi dito, usaremos aqui procedimentos similares aos reportados por Félix e colaboradores a respeito dos mesmos conceitos, porém em uma intervenção didática completamente diferente da nossa (FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024; FÉLIX, H. R. T., 2024). Pelo que conhecemos da literatura nacional e internacional (GLINER, 1981; LEITZMAN, D. F.; RUTT, D. P.; AUSTIN, D. R., 1980; MATTHEWS, G. P.; BROOK, V. G.; KHAN GANDAPUR, T. H., 1984; THRO, M. P., 1978), essa é a primeira vez em que o TANC é usado para avaliar a evolução temporal da estrutura cognitiva em função do processo da aprendizagem. Geralmente, os testes são aplicados antes e após o processo de aprendizagem.

Em nosso caso, o TANC foi aplicado cinco vezes. Antes e após a intervenção e entre cada bloco temático, Oscilações, Ondas Mecânicas e Acústica. Desse modo, podemos examinar como a organização conceitual de cada aluno é alterada conforme o assunto que acabaram de estudar.

Antes de procedermos com a análise dos resultados, vamos resumir o que foi apresentado em capítulos anteriores. Os conceitos são organizados em nossas mentes com uma estrutura que se denomina estrutura cognitiva. Não há como acessar diretamente essa estrutura. Uma das formas indiretas de acesso é por meio do uso de testes de associação de conceitos. O TANC é um desses testes. Esse teste fornece medidas de similaridades entre conceitos. Extrair a estrutura que está por trás dessas medidas é outro problema complexo. Os algoritmos de escalonamento multidimensional (EMD) propõem-se a realizar essa tarefa. Usando sofisticados mecanismos estatísticos, o algoritmo ajusta as medidas de similaridade a uma configuração geométrica que se supõe representar a organização geométrica da estrutura cognitiva. A qualidade desse ajuste é medida por uma função conhecida como Stress, S . Quanto menor o valor de S , melhor o ajuste. O algoritmo vai alterando as posições espaciais dos conceitos até que chegue ao mínimo da função S . O algoritmo faz isso iterativamente. Portanto, além do valor de S , o número de iterações é outro indicativo da qualidade do ajuste. Bons resultados exigem poucas iterações para a minimização de S . É claro que o valor mínimo de S é zero, mas raramente isso acontece. Então, o algoritmo impõe uma

condição para declarar finalizado o processo. Isso ocorre quando a diminuição em valores sucessivos da função S é menor do 0,0001. Portanto, além de S , o número de iterações é outro parâmetro que indica a qualidade do ajuste, que é consequência da qualidade dos dados.

O grau de linearidade entre as distâncias ajustadas e os valores das similaridades é outro aspecto que simboliza a qualidade do ajuste. Quanto mais linear for a curva de distância em função da similaridade, melhor o ajuste.

Quando o algoritmo trabalha com um conjunto de matrizes de similaridade, como é o caso nesta dissertação, surge outro parâmetro muito importante. Trata-se do índice de estranheza, que os algoritmos denominam Weiriness, W . É uma medida (varia de 0 a 1) que indica o quão estranho é determinado sujeito em relação grupo. Quando maior o valor de W , mais afastado estará o sujeito em relação ao grupo. Recomenda-se (GIGUÈRE, 2006) cuidado ao incluir indivíduos com W maior do que 0,5. Indivíduos com $W > 0,5$ destoam muito da média do grupo.

No capítulo 2 foram apresentados alguns mapas obtidos no presente estudo, e seguindo os resultados obtidos por Félix, consideramos a formação nesses mapas de três grupos de conceitos. O primeiro grupo, {F, CO, VS}, representa a definição de velocidade do som. O segundo grupo, {T, AS, OM, OS}, tem a ver com a acústica e a fisiologia do som. O terceiro grupo {F, T, AS} refere-se à definição de timbre, que é a característica do som responsável por nos permitir diferenciar dois sinais com mesma frequência e amplitude, mas originados de fontes sonoras distintas.

Mas, antes da análise dos resultados obtidos nesta dissertação, é interessante examinarmos alguns resultados que servem como uma espécie de validação para o TANC e para a análise EMD.

Dado um conjunto de conceitos físicos, é possível termos um mapa conceitual padrão? Rigorosamente a resposta é não! As medidas de similaridade dependem características humanas incontroláveis. Claro que o conhecimento do assunto é primordial, mas dois conhecedores do assunto podem atribuir valores de similaridades diferentes para determinados pares de conceitos e isso altera o mapa resultante. Todavia, podemos usar mapas de especialistas no assunto como referência, algo como um padrão.

Com o surgimento do ChatGPT, um algoritmo capaz de associar palavras em determinado contexto, surgiu a ideia de usar mapas produzidos pelo algoritmo, que não apresentariam a interveniência dos fatores humanos. Fornecemos ao ChatGPT a tabela

de pares de conceitos e pedimos que ele fornecesse os valores de similaridade entre os vários pares. O algoritmo atribuiu valores de 0 a 1, com os seguintes critérios:

0.0 → Conceitos idênticos ou praticamente iguais.

0.1 a 0.3 → Muito próximos conceitualmente ou funcionalmente.

0.4 a 0.6 → Relacionados, mas distintos em natureza ou aplicação.

0.7 a 1.0 → Pouco ou indiretamente relacionados.

Ao atribuir os valores o algoritmo justificou, de acordo com os critérios acima, o valor atribuído a cada par. Os resultados fornecidos pelo ChatGPT são apresentados na Tabela 1. Essas respostas nos deixaram confiantes quanto ao uso do mapa do ChatGPT como padrão de comparação.

Para estabelecermos algum termo de comparação na análise dos resultados obtidos com as respostas dos alunos, usamos três mapas obtidos com fontes independentes. Chamaremos esses mapas de *mapas-referenciais*. O primeiro mapa-referencial (Figura 4) foi obtido a partir de medidas de similaridade fornecidas por quatro professores, sendo um mestrando do MNPEF e professor de ondulatória no ensino médio, e três doutores em física, professores universitários de física geral. O segundo mapa-referencial (Figura 5) foi obtido a partir das medidas de similaridades fornecidas pelo ChatGPT (Tabela 1). O terceiro mapa-referencial (Figura 6) foi obtido com uma matriz contendo números aleatórios na mesma escala usada no TANC, ou seja, números de 1 a 9.

Destacamos nesses mapas os grupos topológicos mencionados acima: {F, CO, VS}, {F, T, AS} e {T, AS, OM, OS}. Notar que a ordem das letras segue o sentido horário no mapa. Isso é importante para a análise de congruência entre os polígonos que faremos mais adiante ao analisar os mapas dos alunos.

É notável o fato de que, para o grupo de professores, os conceitos F e CO praticamente se confundem. Se esses conceitos estão relacionados pela definição da velocidade do som, seria de se esperar que os três estivessem equidistantes, ou superpostos. Os professores optaram pela maior aproximação de F a CO pelo simples fato de que, ao relatar fenômenos ondulatórios, os físicos costumam classificar as radiações em termos do comprimento de onda, ou da frequência. As duas classificações coincidem. Ou seja, abordar um fenômeno ondulatório tendo como termo de referência a frequência é equivalente a abordá-lo tendo como referência o comprimento de onda.

Tabela 1 – Medidas de similaridade fornecidas pelo ChatGPT.

Conceito A	Conceito B		Justificativa
Onda sonora	Onda mecânica	0.1	Onda sonora é um tipo de onda mecânica
Timbre	Onda mecânica	0.6	Timbre é perceptual, onda mecânica é física
Frequência	Onda sonora	0.2	Frequência é uma característica essencial da onda sonora
Onda mecânica	Frequência	0.4	Toda onda mecânica tem frequência, mas conceito é mais geral
Comprimento de onda	Frequência	0.3	Inversamente proporcionais em ondas periódicas
Onda sonora	Comprimento de onda	0.3	Comprimento de onda caracteriza a onda sonora
Frequência	Amplitude do som	0.5	São independentes fisicamente (altura vs. volume)
Comprimento de onda	Onda mecânica	0.2	Toda onda mecânica tem comprimento de onda
Velocidade do som	Comprimento de onda	0.3	Ligados pela equação $v = f \cdot \lambda$
Timbre	Frequência	0.4	Timbre depende de harmônicos, relacionados à frequência
Frequência	Velocidade do som	0.4	Relacionados via comprimento de onda
Velocidade do som	Onda sonora	0.2	A velocidade determina a propagação da onda sonora
Onda mecânica	Velocidade do som	0.3	Velocidade é propriedade da onda mecânica
Amplitude do som	Velocidade do som	0.6	Pouco diretamente relacionados
Amplitude do som	Comprimento de onda	0.5	São propriedades diferentes e independentes
Amplitude do som	Onda sonora	0.2	Amplitude está relacionada ao volume percebido
Amplitude do som	Onda mecânica	0.3	Amplitude é propriedade da onda mecânica
Onda sonora	Timbre	0.3	Timbre é uma qualidade perceptiva da onda sonora
Comprimento de onda	Timbre	0.5	Timbre depende mais da forma de onda que do comprimento
Timbre	Velocidade do som	0.6	Conceitos pouco ligados diretamente
Amplitude do som	Timbre	0.4	Ambos são qualidades perceptuais, mas distintas

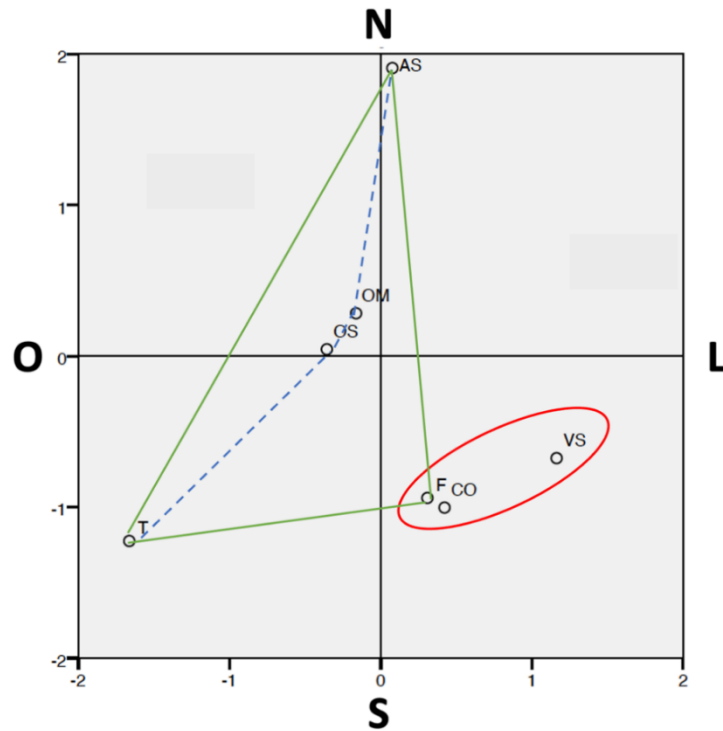


Figura 4 – Mapa de um grupo de professores

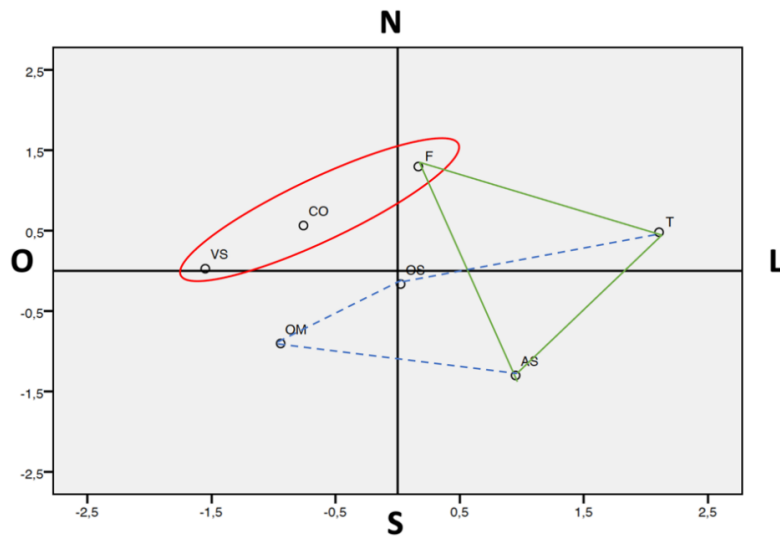


Figura 5 – Mapa obtido a partir de medidas de similaridade geradas pelo ChatGPT.

Observe que o ChatGPT parece não saber desse detalhe a respeito da equivalência de tratamento de ondas a partir da frequência ou do comprimento de onda, uma vez que em seu mapa (Figura 6) o referido grupo forma uma linha, com CO praticamente equidistante de F e VS. Os grupos {F, T, AS} nos dois mapas são topologicamente congruentes. Um transforma-se com uma rotação e alguns ajustes nas distâncias entre os conceitos. O mesmo ocorre com o grupo {T, AS, OM, OS}.

Portanto, podemos dizer que o mapa do ChatGPT é topologicamente congruente ao mapa dos professores.

É interessante chamar a atenção para o mapa da matriz aleatória (Figura 6). Em primeiro lugar, esse mapa foi obtido com $S=0,16922$, e o processo foi interrompido na 11ª iteração, porque o programa não conseguiu baixar o valor de S . Isso significa que os dados da matriz são altamente desestruturados, o que é normal, uma que se trata de uma matriz aleatória. Todos os valores de S obtidos com as matrizes dos alunos são inferiores a 0,01. Além desse padrão em termos do valor de S , o mapa aleatório estabelece um padrão visual para comparar com aqueles resultantes das matrizes dos alunos. Um aspecto interessante no caso de matriz aleatória é a superposição entre quase todos os grupos.

Os conceitos de uma determinada disciplina são organizados de acordo com suas relações no contexto científico. Chama-se isso de estrutura do conteúdo (DOS SANTOS, 1978). O mapeamento cognitivo obtido via TANC e EMD deve refletir essa organização, de modo que haja uma certa discriminação entre os vários de conceitos da estrutura cognitiva, como se vê nas figuras 4 e 5. No caso de uma matriz aleatória, ou de um aluno com uma fraca organização conceitual na sua estrutura cognitiva, o mapa apresenta muitas superposições entre os vários grupos, como se vê na Figura 6.

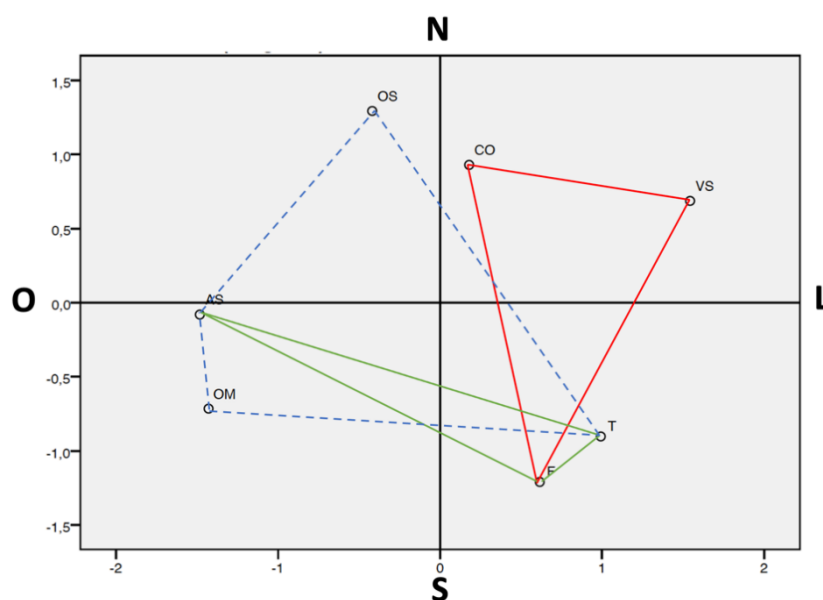


Figura 6 – Mapa obtido com uma matriz contendo valores aleatórios. Há superposição entre todos os grupos.

A análise detalhada de resultados do TANC com EMD é muito complexa e trabalhosa. Uma estratégia analítica conveniente é fazer uma estratificação da população

investigada. Os critérios para estratificação dependem do tipo de amostragem e dos objetivos analíticos. No presente caso, a amostragem é constituída de alunos submetidos a uma intervenção didática. Um critério natural seria estratificar a turma em termos do rendimento escolar, assim como em termos da participação nas atividades em sala de aula. Outro critério seria estatístico, por meio do índice de estranheza, que se reflete visualmente no que se chama de mapa do grupo. Ou seja, o algoritmo faz um mapa exibindo os indivíduos no plano resultante do ajuste. Sujeitos com W próximos de zero ficam próximos à mediatriz do plano, enquanto sujeitos com W acima de 0,3 ficam afastados da mediatriz, como ilustram as figuras 7 e 8. Valores altos de W significam que ao avaliar um par de conceitos, o sujeito atribui peso maior a uma dimensão do que à outra. Por exemplo, no pré-teste, o aluno 3, atribuiu peso à dimensão 1 igual 0,3203, e 0,6028 à dimensão 2. Portanto, no conjunto das suas medidas, o aluno 3 privilegia a dimensão 2. Por outro lado, o aluno 10 atribuiu peso 0,7859 à dimensão 1, e 0,1186 à dimensão 2. Ou seja, ele privilegia a dimensão 1 nas suas avaliações de similaridade. Infelizmente não conseguimos atribuir uma propriedade ou característica conceitual a cada uma dessas dimensões, razão pela qual decidimos analisar os mapas em função de aspectos topológicos.

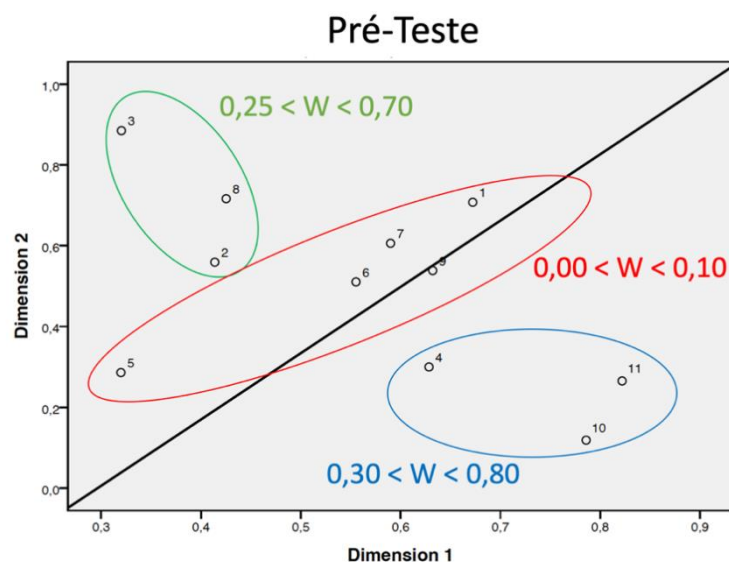


Figura 7 – Mapa do grupo no pré-teste.

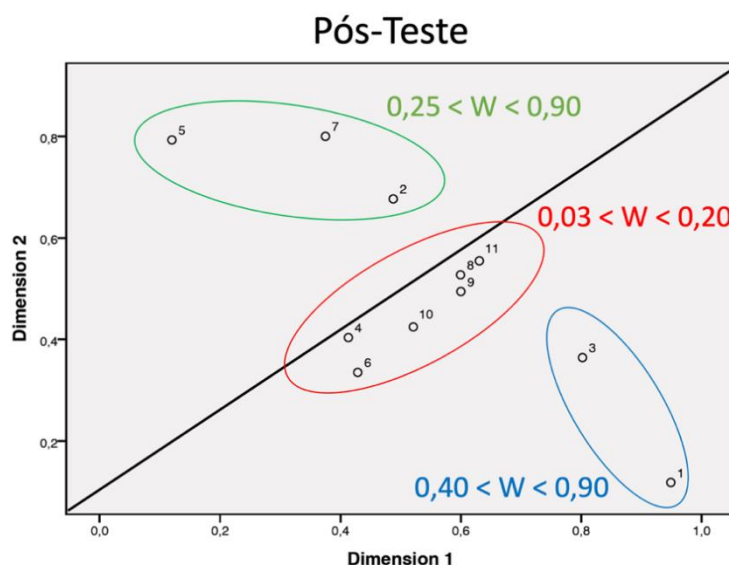


Figura 8 – Mapa do grupo no pós-teste.

Decidimos fazer dois tipos de estratificação. O primeiro consiste em formar um grupo de acordo com o rendimento escolar. Seleccionamos três alunos com rendimentos superiores e três com rendimentos inferiores. Quando começamos a obter os mapas, percebemos que um aluno se destacava pelo aspecto visual de seus mapas. Tratava-se de um jovem diagnosticado com TEA e TDAH, e que eventualmente se afastava das aulas por causa de crises. Em função dessa condição de saúde e dos seus excelentes resultados resolvemos inclui-lo nesse grupo.

O segundo tipo de estratificação foi de acordo com os pesos atribuídos a cada dimensão no pós-teste. Seleccionamos:

1. o aluno que apresentou o maior peso na dimensão 1 e o menor na dimensão 2 (aluno 1, peso1 = 0,9489, peso2 = 0,1118);
 2. o aluno na situação oposta, ou seja, menor peso na dimensão 1 e maior na dimensão 2 (aluno 5, peso1 = 0,1201, peso2 = 0,7930);
 3. o aluno com valores similares (aluno 8, peso1 = 0,5995, peso2 = 0,5271).
- Analizamos os resultados desses três alunos do pré-teste até o pós-teste.

4.1.1 Grupo 1: rendimento escolar

A disciplina tinha 18 alunos, mas apenas 11 responderam todos os cinco testes TANC. Portanto esse grupo de 11 alunos constitui o objeto inicial da presente análise. Como a quantidade de dados é muito grande, resolvemos diminuir o grupo para sete

elementos, de acordo com o seguinte critério: três alunos com os mais altos rendimentos nos exames, três com os mais baixos rendimentos, e um aluno com rendimento médio, mas que foi diagnosticado com TEA e TDAH, e eventualmente tinha que se afastar da escola por causa de crises.

A Tabela 2 contém os parâmetros estatísticos mencionados acima para o ajuste do pré-teste (TANC1). As tabelas seguintes referem-se aos outros testes: TANC2 (Tabela 3); TANC3 (Tabela 4); TANC4 (Tabela 5); TANC5 (Tabela 6). O TANC2 foi aplicado após a abordagem do capítulo 8 (oscilações) do livro-texto (VÁLIO, A. B. M. *et al.*, 2024); o TANC3 após o capítulo 9 (ondas); o TANC4 após o capítulo 10 (acústica); o TANC5 foi aplicado após a intervenção didática.

Vamos analisar esses parâmetros estatísticos para decidirmos quais mapas selecionaremos para uma análise mais detalhada a respeito da organização mental de cada aluno. Células sinalizadas com amarelo indicam que o respectivo parâmetro se destaca na amostragem. Isso foi feito seguindo os seguintes critérios. Foram destacadas as células com Stress menor do que 0,001, número de iterações igual a 20, ou menor, índice de estranheza maior do 0,5, e aquelas que apontam a não existência de grupos superpostos. Essa seleção é arbitrária, mas pode ser justificada. Existem muitos ajustes com Stress abaixo de 0,002, razão pela qual estabelecemos um critério mais rigoroso. O número de iterações para a obtenção do ajuste é inversamente proporcional à qualidade dos dados, em termos da estrutura organizacional dos conceitos. Ou seja, quanto mais bem organizados forem os conceitos no sentido de obediência às relações científicas, menor será o número de iterações. Como existem muitos ajustes com número de iteração superior 20, decidimos estabelecer com número máximo para a seleção do mapa. O critério para o limite da estranheza segue a recomendação de Giguère (2006), segundo a qual, indivíduos com $W > 0,5$ destoam muito da média do grupo. Queremos entender o que significa isso no grupo de alunos que participaram da nossa intervenção didática.

Decidimos analisar detalhadamente os mapas dos alunos que apresentarem pelo menos três células satisfazendo todos os critérios. O aluno 1 foi o único selecionado em três ocasiões: TANC1, TANC4 e TANC5. No TANC2, apenas o aluno 9 foi selecionado. No TANC3, os alunos 8, 9 e 10 foram selecionados. Portanto, analisaremos apenas os mapas dos alunos 1, 8, 9 e 10.

Antes de analisarmos esses mapas, convém discutirmos alguns resultados mostrados nas tabelas 2, 3, 4, 5 e 6.

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC1. Os três primeiros alunos obtiveram os mais altos rendimentos escolares. O quarto aluno, diagnosticado com TEA e TDAH, tem rendimento escolar intermediário. Os três últimos alunos apresentaram os rendimentos escolares mais inferiores.

Aluno	Stress	Iterações	Estranheza	Grupos Superpostos
10	0,05750	33	0,7864	Sim
7	0,00224	128	0,0903	Não
1	0,00000	1	0,1057	Não
9	0,00028	6	0,0285	Sim
6	0,00110	44	0,0199	Não
11	0,00072	66	0,5576	Sim
8	0,05654	24	0,3807	Sim

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC2. Os três primeiros alunos obtiveram os mais altos rendimentos escolares. O quarto aluno, diagnosticado com TEA e TDAH, tem rendimento escolar intermediário. Os três últimos alunos apresentaram os rendimentos escolares mais inferiores.

Aluno	Stress	Iterações	Estranheza	Grupos Superpostos
10	0,00042	25	0,5550	Sim
7	0,00227	50	0,2536	Sim
1	0,00038	21	0,5637	Sim
9	0,00000	1	1,0032	Não
6	0,00080	29	0,6920	Sim
11	0,01362	47	1,0328	Sim
8	0,00048	23	0,2532	Sim

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC3. Os três primeiros alunos obtiveram os mais altos rendimentos escolares. O quarto aluno, diagnosticado com TEA e TDAH, tem rendimento escolar intermediário. Os três últimos alunos apresentaram os rendimentos escolares mais inferiores.

Aluno	Stress	Iterações	Estranheza	Grupos Superpostos
10	0,00000	1	0,0673	Não
7	0,00047	31	0,8896	Sim
1	0,07250	23	0,1008	Sim

9	0,00000	1	0,0334	Não
6	0,00499	53	0,0863	Sim
11	0,08134	27	0,7563	Sim
8	0,00049	10	0,5319	Sim

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC4. Os três primeiros alunos obtiveram os mais altos rendimentos escolares. O quarto aluno, diagnosticado com TEA e TDAH, tem rendimento escolar intermediário. Os três últimos alunos apresentaram os rendimentos escolares mais inferiores.

Aluno	Stress	Iterações	Estranheza	Grupos Superpostos
10	0,00272	50	0,0697	Sim
7	0,00000	1	0,1276	Sim
1	0,00000	1	0,7521	Sim
9	0,00041	13	0,0267	Sim
6	0,08888	26	0,3619	Sim
11	0,03708	19	0,2205	Sim
8	0,06273	30	0,1428	Sim

Os valores de estranheza mostrados nas tabelas acima, sugerem que à medida que o curso avança, os alunos convergem para a reta de monotonicidade na mediatriz do plano cartesiano, como pode se vê nas figuras 5, 6, 7, 8 e 9. É notável a dispersão dos alunos no pré-teste, TANC1. Vale lembrar que os alunos estudaram esse conteúdo no 9º. Ano do EF, com uma abordagem qualitativa e com referência a situações do cotidiano. Isso justifica o fato de que, em média, os valores do Stress são razoavelmente baixos. Veja que a matriz aleatória, Figura 6, foi ajustada com $S=0,16922$. Provavelmente essa dispersão tenha a ver com o tempo decorrido entre o assunto estudado no 9º. Ano e o momento da aplicação do teste. Logo depois que os alunos estudaram o capítulo sobre oscilações, o TANC2 foi aplicado. Percebe-se a diminuição da dispersão (Figura 10). Os alunos 9 e 11 se destacaram por apresentarem baixos valores dos pesos da dimensão 1 (dim1), e altos valores dos pesos na dim2. Esses dois alunos apresentaram os mesmos valores de W, em torno de 1,00. Os alunos 1, 6 e 10 formaram um grupo com outros que não foram selecionados para análise, caracterizados por altos valores do peso na dimensão 1, e baixos valores na dimensão 2. Mais adiante analisaremos os mapas dos alunos 1, 9 e 10, selecionados pelos critérios definidos acima.

Tabela 6 – Parâmetros estatísticos obtidos com o TANC5. Os três primeiros alunos obtiveram os mais altos rendimentos escolares. O quarto aluno, diagnosticado com TEA e TDAH, tem rendimento escolar intermediário. Os três últimos alunos apresentaram os rendimentos escolares mais inferiores.

Aluno	Stress	Iterações	Estranheza	Grupos Superpostos
10	0,00086	37	0,0815	Sim
7	0,00000	1	0,4784	Sim
1	0,00000	1	0,8302	Sim
9	0,00086	46	0,0747	Sim
6	0,00490	83	0,1082	Sim
11	0,02576	34	0,0331	Sim
8	0,05446	41	0,0332	Não

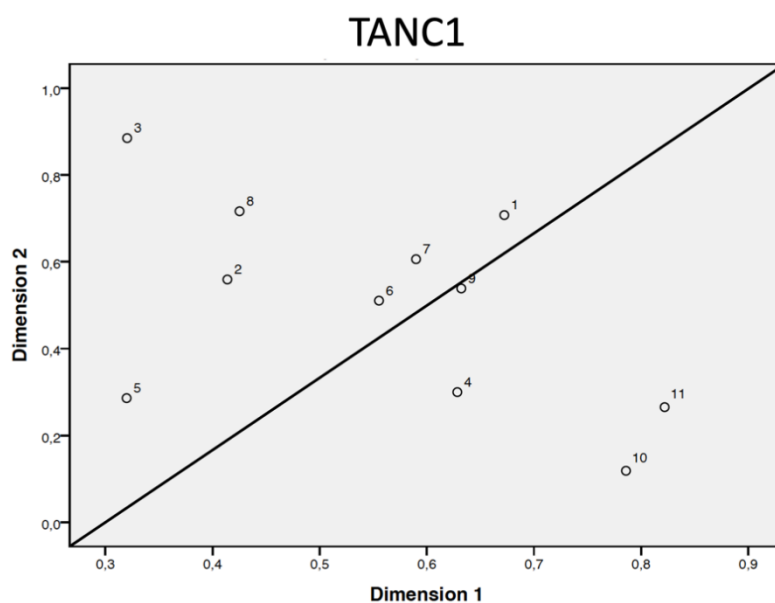


Figura 9 –TANC1: Mapa do grupo

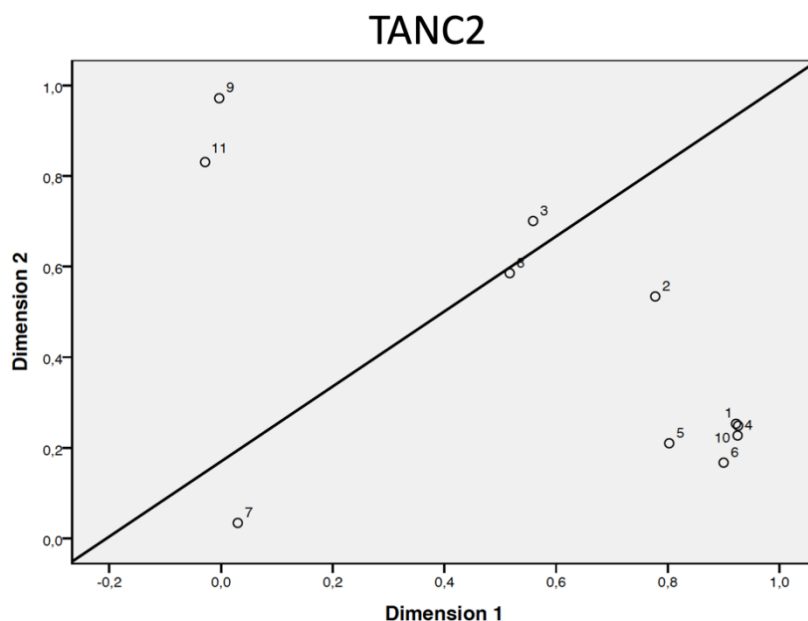


Figura 10 –TANC2: Mapa do grupo

O TANC3, aplicado depois do capítulo a respeito de ondas (Figura 11), mostra mais claramente a tendência da convergência dos alunos em direção à reta de monotonicidade ideal. O aluno 7 continuou deslocado, mas dessa vez ele passou a atribuir um peso muito maior à dim1. O aluno 11 permaneceu na sua posição anterior, com alto valor do peso na dim2 e baixo valor na dim1. Pelo que se vê na Tabela 4, três alunos (8, 9 e 10) se destacaram nesse teste. Mais adiante examinaremos seus mapas.

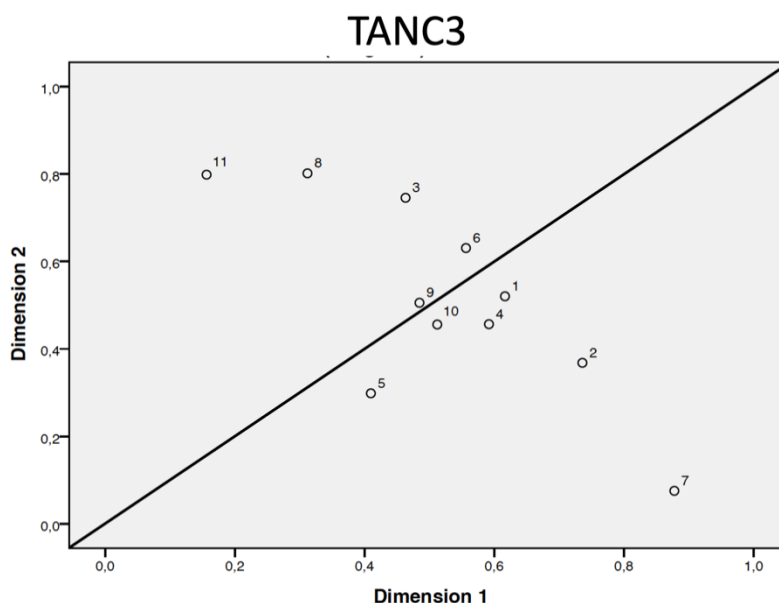


Figura 11 –TANC3: Mapa do grupo

No TANC4 (Figura 12), depois do capítulo sobre acústica, praticamente todos os alunos convergiram na direção da reta de monotonicidade ideal. Divergiram apenas os alunos 1 e 5. O primeiro mudou de posição em relação ao TANC3. Deixou a posição de pesos aproximadamente iguais e migrou para uma posição com baixo valor na dim1 para uma posição com alto valor na dim2. Analisaremos isso com a exibição do seu mapa mais adiante. O aluno 5 não foi selecionado para a análise detalhada dos mapas.

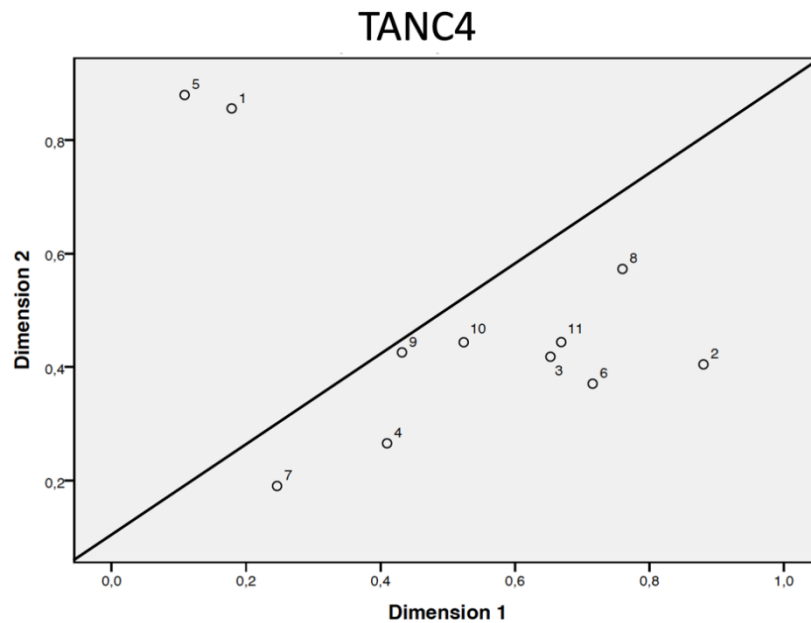


Figura 12 –TANC4: Mapa do grupo

Finalmente, o TANC5 (Fig. 13), aplicado algumas semanas após o TANC4, mostrou alguma dispersão de alguns alunos. O aluno 1 mudou completamente sua posição, invertendo a ordem dos valores dos pesos. A mesma coisa aconteceu com o aluno 7.

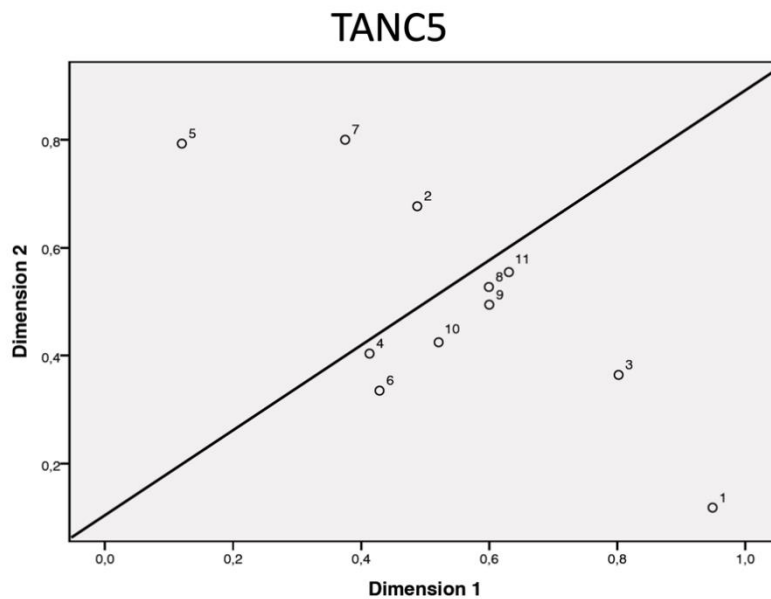


Figura 13 –TANC5: Mapa do grupo

Considerando os cinco testes, e os quatro alunos selecionados (1, 8, 9 e 10) teríamos que exibir 20 mapas. Decidimos restringir a seleção. Vamos analisar os mapas de dois alunos, em três ocasiões (TANC1, TANC3 e TANC5). Os dois alunos selecionados foram o aluno 10, que teve o melhor rendimento da turma (obteve 10 em todas as provas), e o aluno 9 (TEA+TDAH), que obteve a maior quantidade de ajustes com $S < 0,001$.

Os mapas do TANC1 dos alunos 9 e 10 são apresentados, respectivamente, nas figuras 14 e 15. Esses mapas resultam da aprendizagem que eles tiveram no EF. O aluno 9 define claramente uma espécie de simetria, com o conceito OM numa extremidade, e OS na outra. Entre esses dois extremos ele distribui os outros conceitos. Sem levar em conta os diferentes polígonos, esse arranjo tem uma lógica científica interessante. Os conceitos básicos são o tipo de onda (OM ou OS), entre eles ficam os conceitos que pertencem aos dois tipos. Se no mapa do aluno 10, o conceito OS tivesse coordenadas próximas de $\{2,0;1,00\}$, os dois mapas teriam a mesma lógica estrutural.

O mais impressionante nesses dois mapas, é que no interior da estrutura, ou seja, entre OM e OS, os conceitos são organizados de modo similar. Os grupos $\{F, VS, CO\}$ e $\{T, OS, AS, OM\}$ são topologicamente congruentes, mas o grupo $\{F, AS, T\}$ está no sentido anti-horário no mapa do aluno 9, e no sentido horário no mapa do aluno 10.

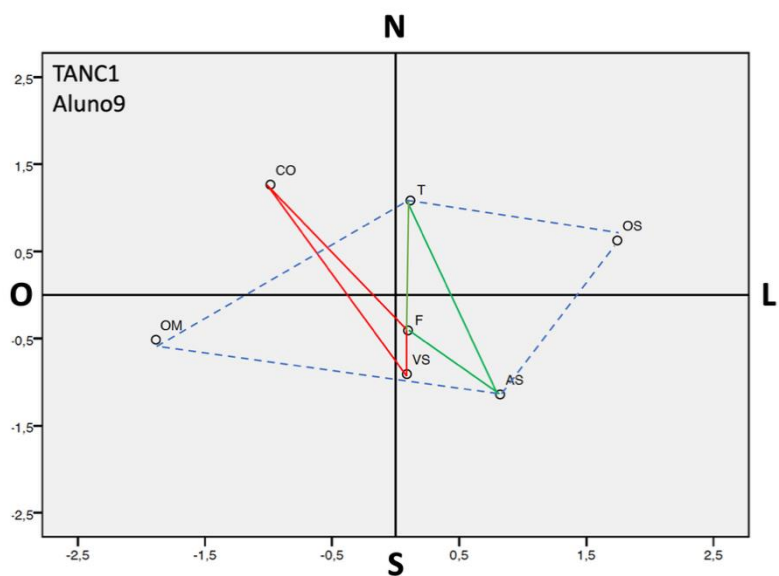


Figura 14 –TANC1: Mapa do aluno 9

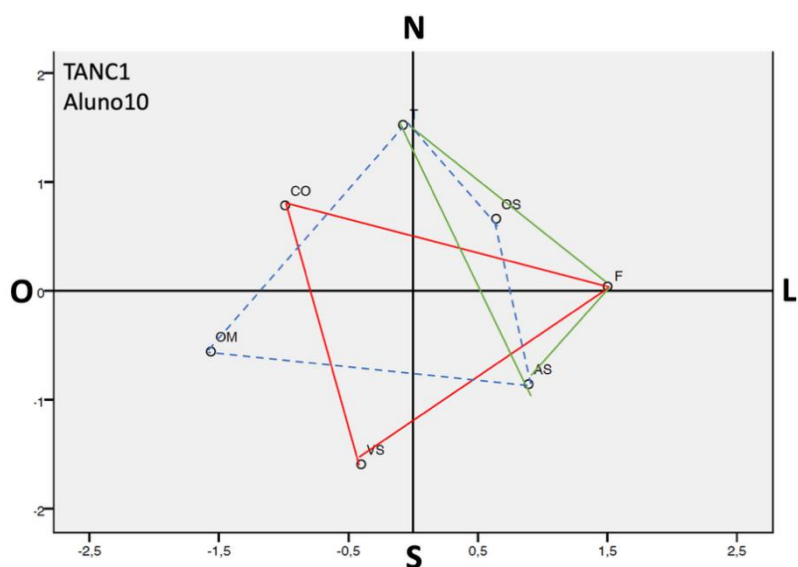


Figura 15 –TANC1: Mapa do aluno 10

Os mapas do TANC3 dos alunos 9 e 10 são exibidos, respectivamente, nas figuras 16 e 17. Depois de estudarem oscilações e ondas no EM esses dois alunos mudaram suas perspectivas conceituais, mas permaneceram com estruturas cognitivas similares. Na nova perspectiva os conceitos são agrupados com critérios mais específicos, de modo que os grupos são desacoplados. Ou seja, são formados separadamente. Em ambos os mapas, o grupo {F, VS, CO} está no sentido anti-horário. Mas, {F, AS, T} está no sentido horário no mapa do aluno 9, e no sentido anti-horário

no mapa do aluno 10. O grupo {T, OS, AS, OM} aparece no mapa do aluno 9 com estrutura, {T, AS, OS, OM}, e com estrutura {T, OM, OS, AS} no mapa do aluno 10. Ou seja, no TANC3 os dois alunos apresentam estruturas não congruentes.

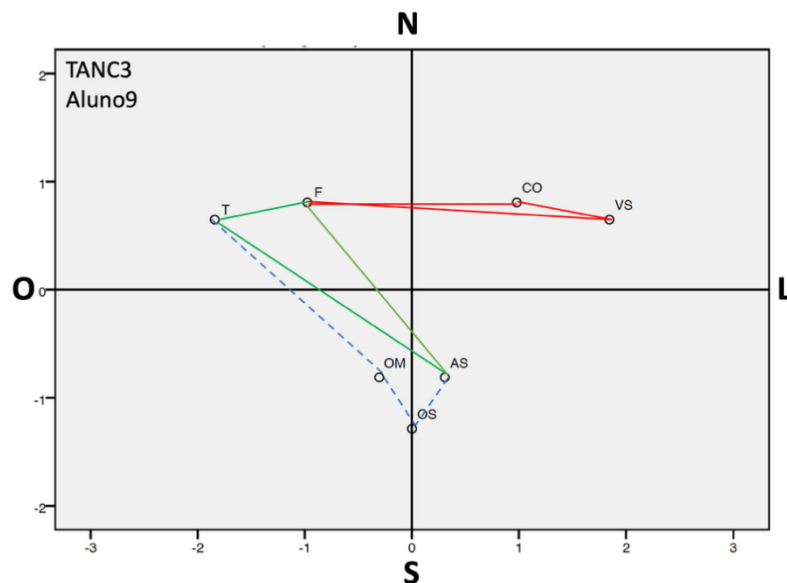


Figura 16 –TANC3: Mapa do aluno 9

O TANC5 foi aplicado uma semana depois do final da intervenção didática (Figuras 18 e 19). Não temos elementos para avaliar o efeito do tempo na persistência da estrutura conceitual. Ou seja, quanto muda a estrutura cognitiva algum tempo depois do processo de aprendizagem? Independentemente da resposta, o fato é que os alunos 9 e 10 apresentaram estruturas cognitivas similares, com a formação dos seguintes grupos. Em ambos os mapas, o grupo {F, VS, CO} aparece no anti-horário, assim como o grupo {F, AS, T}. O grupo inicial {T, OS, AS, OM} apareceu com outro formato: {T, AS, OM, OS}, que tem significado conceitual mais interessante, uma vez que o timbre está mais associado com a amplitude do som do que com o tipo de onda.

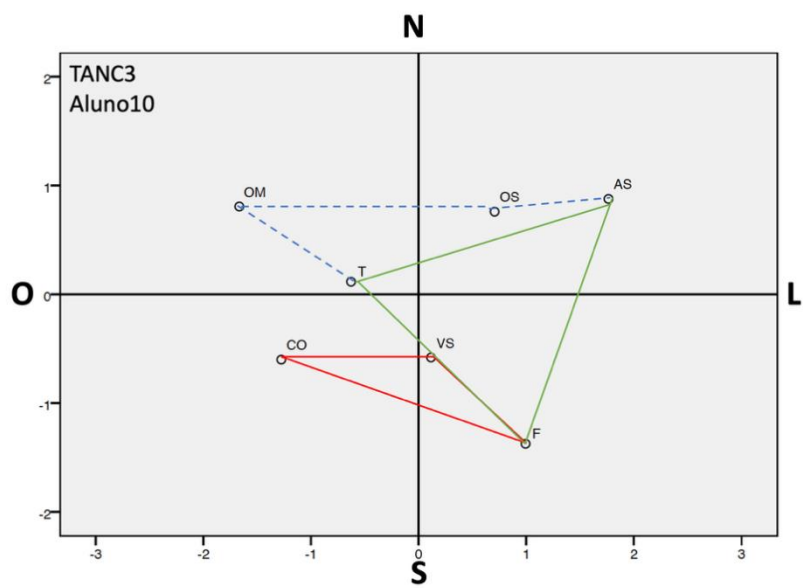


Figura 17 –TANC3: Mapa do aluno 10

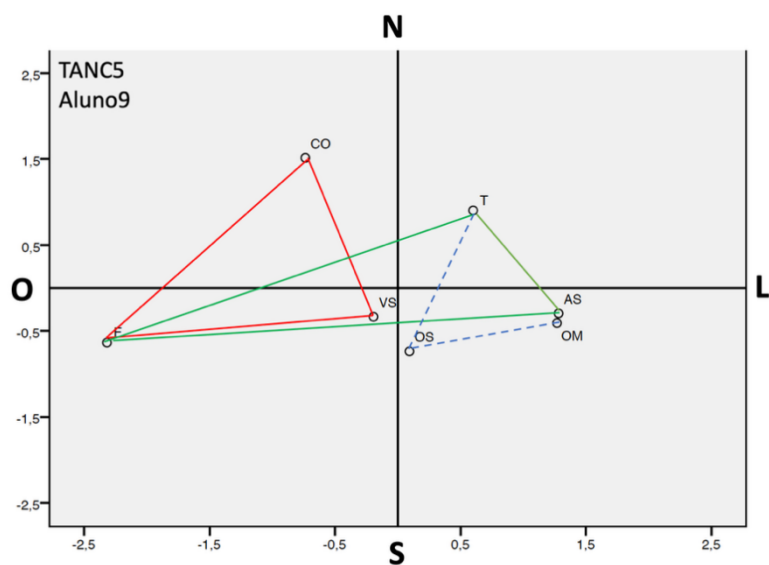


Figura 18–TANC5: Mapa do aluno 9

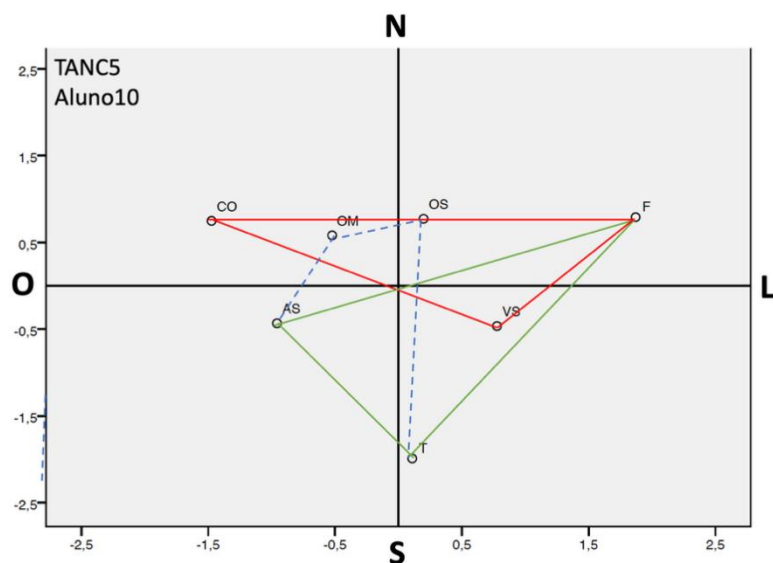


Figura 19 –TANC5: Mapa do aluno 10

Portanto, para esses alunos, separados do grupo pela estratificação associada ao rendimento escolar, os resultados sugerem fortemente que o processo de aprendizagem produziu mudanças relevantes nas suas estruturas cognitivas. Mais importante do que isso, essas estruturas convergiram para uma estrutura consistente com a estrutura do conteúdo estudos.

4.1.2 Grupo 2: pesos dimensionais

Vamos abordar aqui os mesmos testes abordados acima: TANC1, TANC3 e TANC5. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Pesos dimensionais e estranheza no TANC1.

Aluno	Peso dim1	Peso dim2	Estranheza	Stress	Grupos Superpostos
1	0,6723	0,7076	0,1057	0,00000	Não
5	0,3198	0,2859	0,0023	0,00849	Sim
8	0,4252	0,7164	0,3807	0,05654	Sim

Tabela 8 – Pesos dimensionais e estranheza no TANC3.

Aluno	Peso dim1	Peso dim2	Estranheza	Stress	Grupos Superpostos
1	0,6165	0,5203	0,1008	0,07250	Sim
5	0,4097	0,2983	0,1921	0,00234	Sim
8	0,3120	0,8014	0,5319	0,00049	Sim

Tabela 9 – Pesos dimensionais e estranheza no TANC5.

Aluno	Peso dim1	Peso dim2	Estranheza	Stress	Grupos Superpostos
1	0,9489	0,1180	0,8302	0,00000	Sim
5	0,1201	0,7930	0,8226	0,05835	Sim
8	0,5995	0,5271	0,0332	0,05446	Sim

A partir dos pesos dimensionais e da estranheza no TANC5, selecionamos os alunos 1 e 5 para examinarmos detalhadamente seus mapas. A justificativa dessa escolha tem a ver com a antissimetria nos valores dos pesos para o caso de mesmo valor da estranheza. No TANC5, esses alunos apresentaram aproximadamente os mesmos valores de $W = 0,8$, mas seus pesos dimensionais são opostos. É importante avaliar qual é a repercussão desse fato nos mapas conceituais. Assim como no caso anterior, analisamos detalhadamente os mapas obtidos com os testes TANC1, TANC3 e TANC5.

As curvas de monotonicidade desses ajustes estão na Figura 20. Percebe-se que para ajustes com $S > 0,01$, as curvas fogem da linearidade. Isto significa dificuldade no ajuste, razão pela qual deve-se ter cuidado na análise dos mapas.

4.1.2.1 – Grupo 2: aluno 1

De todos os mapas apresentados de todos os alunos, o único que tem significado estrutural facilmente identificado é o da Figura 21, obtido com os resultados do aluno 1, no TANC1. Os três grupos, {F, VS, CO}, {F, AS, T} e {T, OS, AS, OM} aparecem desacoplados, o que indica boa discriminação dos conceitos. Todavia, apenas o primeiro grupo aparece com a ordem definida como padrão, {F, VS, CO}. Os outros têm alguns conceitos invertidos. O que é compreensível, uma vez que esses conceitos foram vistos no EF, alguns meses antes da aplicação do teste, e de modo qualitativo.

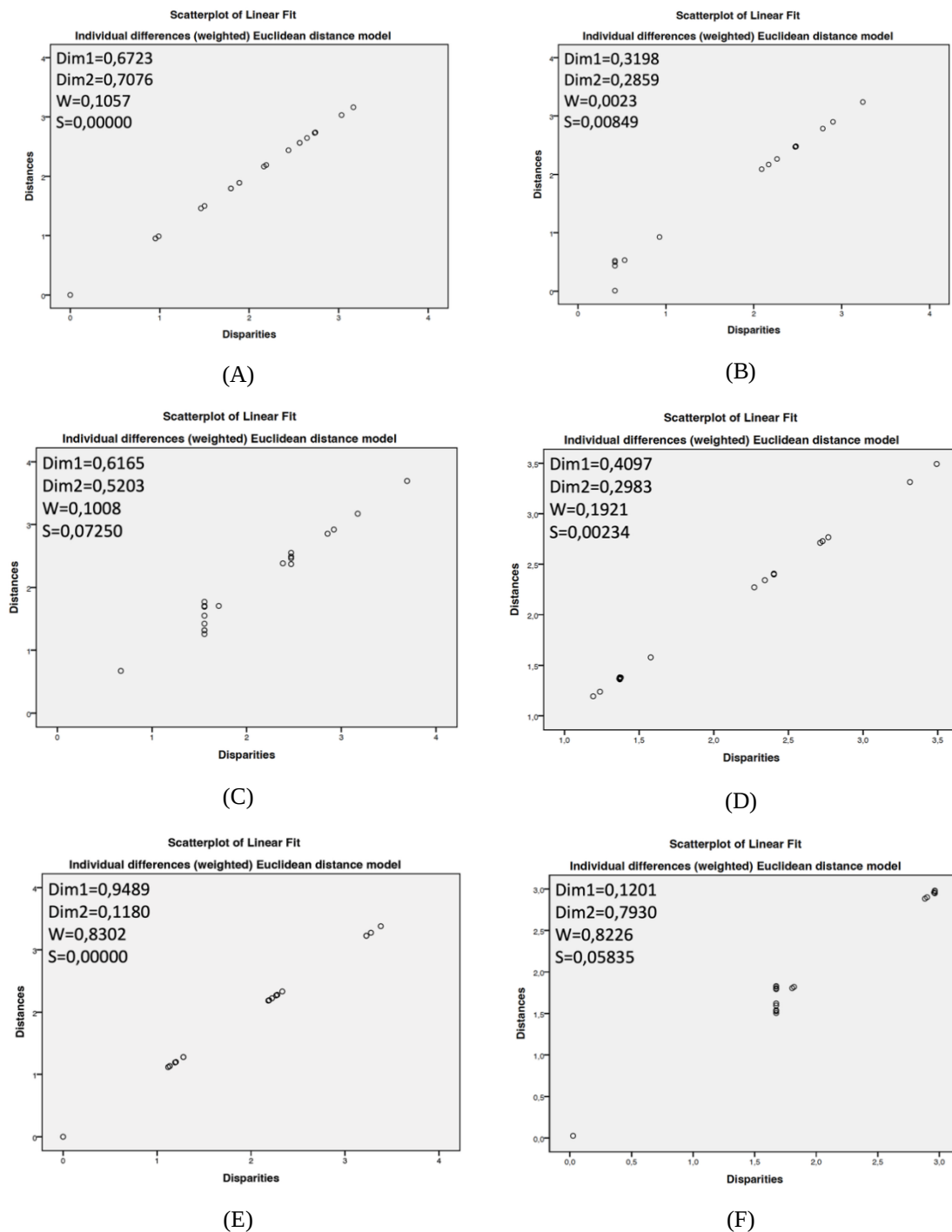


Figura 20 – Curvas de monotonicidade dos alunos selecionados. (A): TANC1, aluno 1; (B): TANC1, aluno 5; (C): TANC3, aluno 1; (D): TANC3, aluno 5; (E): TANC5, aluno 1; (F): TANC5, aluno 5. Os parâmetros estatísticos estão nos excertos das figuras.

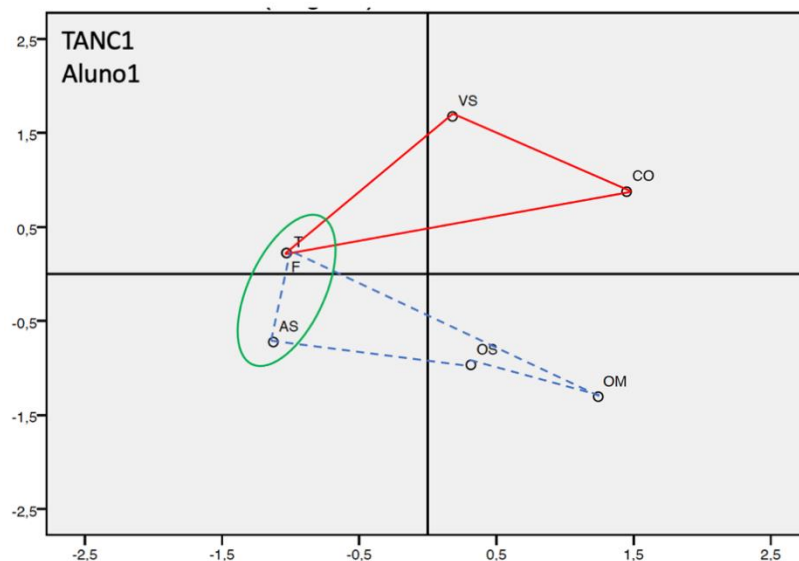


Figura 21 –TANC1: Mapa do aluno 1. Dim1=0,6723; Dim2=0,7076; W=0,1057.

No TANC3 (Figura 22), o aluno 1 desacoplou os grupos. Vejamos as razões para isso. Não temos como negar ou aceitar o efeito semântico na associação de OM, OS e CO. Por outro lado, há uma razão lógica para esses conceitos estarem próximos no mapa. Nós temos dois tipos de onda e uma propriedade comum. O grupo {F, VS, CO} aparece com os conceitos no sentido padrão (horário), mas o grupo {T, OS, AS, OM} aparece como {T, OM, OS, AS}, que é incongruente com grupo padrão. É provável que essa distribuição, parcialmente incongruente com a padrão, tenha provocado o alto Stress. Todavia, apesar dessa incongruência, os grupos formados correspondem à estrutura do conteúdo ensinado.

No TANC5, o aluno 1 apresentou uma perspectiva completamente diferente das anteriores. Antes, seus pesos dimensionais eram similares, mas no TANC5 eles são bem diferentes: dim1=0,9489 e dim2=0,1180. A Figura 23 sugere a separação dos conceitos guiada por uma componente semântica relacionada com a palavra onda. Todos os conceitos que têm onda na designação ficaram nos quadrantes superiores, excetuando CO, por causa da sua forte relação com F. Portanto, a dimensão 1 tem a ver com um efeito semântico relacionado com a palavra onda. É provável que neste caso, o efeito semântico supere os critérios científicos na associação dos conceitos.

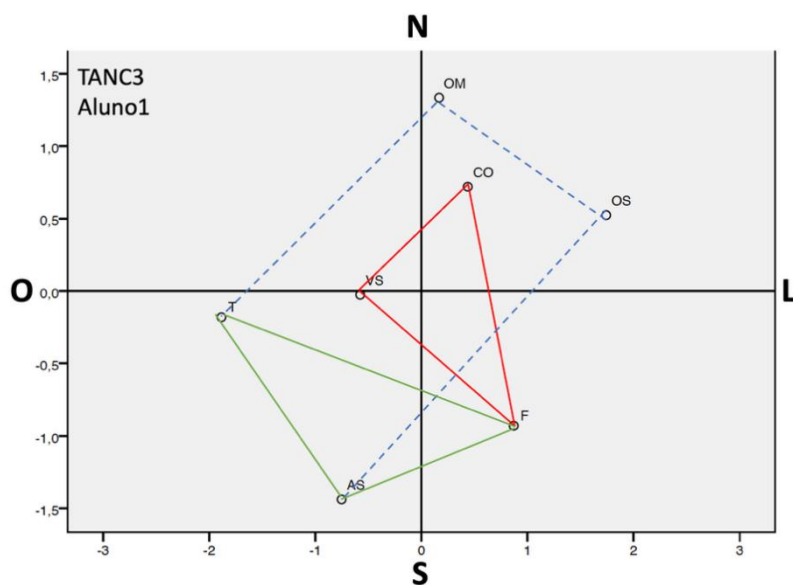


Figura 22 –TANC3: Mapa do aluno 1. Dim1=0,6165; Dim2=0,5203; W=0,1008

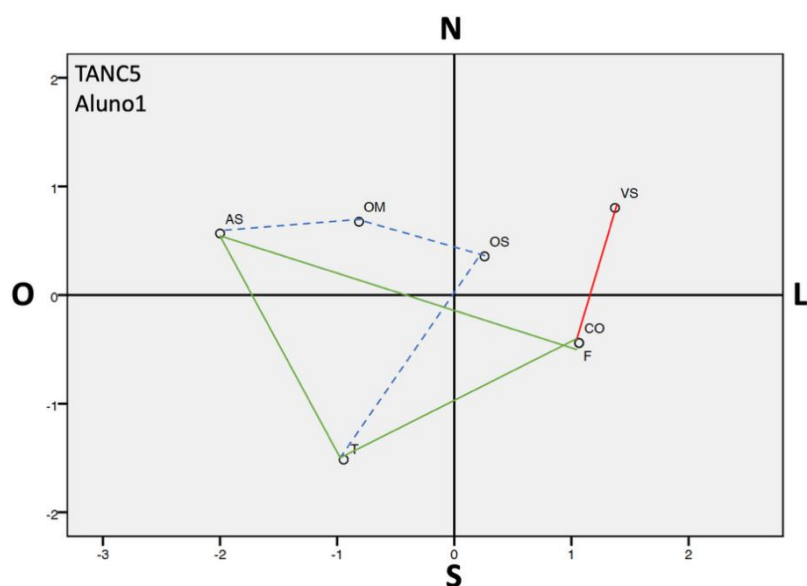


Figura 23 –TANC5: Mapa do aluno 1. Dim1=0,9489; Dim2=0,1180; W=0,8302

4.1.2.2 – Grupo 2: aluno 5

O TANC1 do aluno 5 (Figura 24) exibe completa superposição dos três grupos, o que em princípio significa baixa discriminação conceitual. Nota-se uma forte componente semântica. Ou seja, os conceitos são associados foneticamente. É por isso que OS, AS e VS estão tão próximos. A associação de OM aos outros conceitos é bastante fraca. Os grupos {F, VS, CO} e {F, AS, T} aparecem com os ordenamentos

padrões, mas o grupo {T, OS, AS, OM} aparece como {T, OM, AS, OS} ou {T, OM, OS, AS}, uma vez que os conceitos OS e AS estão superpostos.

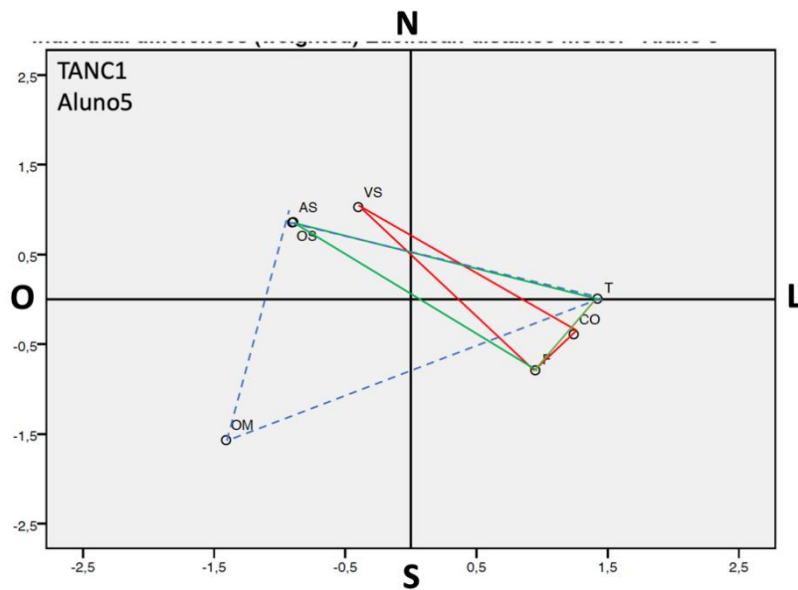


Figura 24 –TANC1: Mapa do aluno 5. Dim1=0,3198; Dim2=0,2859; W=0023

No TANC3, do aluno 5 (Figura 25), os grupos {F, VS, CO} e {F, AS, T} aparecem com os ordenamentos padrões, mas o grupo {T, OS, AS, OM} aparece como {T, AS, OM, OS}. No TANC5 (Figura 26), o aluno 5 coloca os três grupos com os ordenamentos padrões.

Esperávamos que a diferença entre dim1 e dim2 no TANC5 do aluno 5 fosse suficiente para apresentar algum padrão lógico no mapa, em função da diferença, como aconteceu com o aluno 1 no TANC5 (Figura 23). Aparentemente, a razão $\text{dim1/dim2}=0,1201/0,7930$ não é suficiente para mostrar esse efeito visualmente. Então, resolvemos investigar outros mapas com pesos destoantes, que não estavam em nossa seleção. No TANC2, investigamos os alunos 9 ($\text{dim1/dim2}=0,03/0,97$) e 11 ($\text{dim1/dim2}=0,03/0,83$), e no TANC3 investigamos o aluno 7 ($\text{dim1/dim2}=0,86/0,08$). Os resultados estão nas figuras 27, 28 e 29.

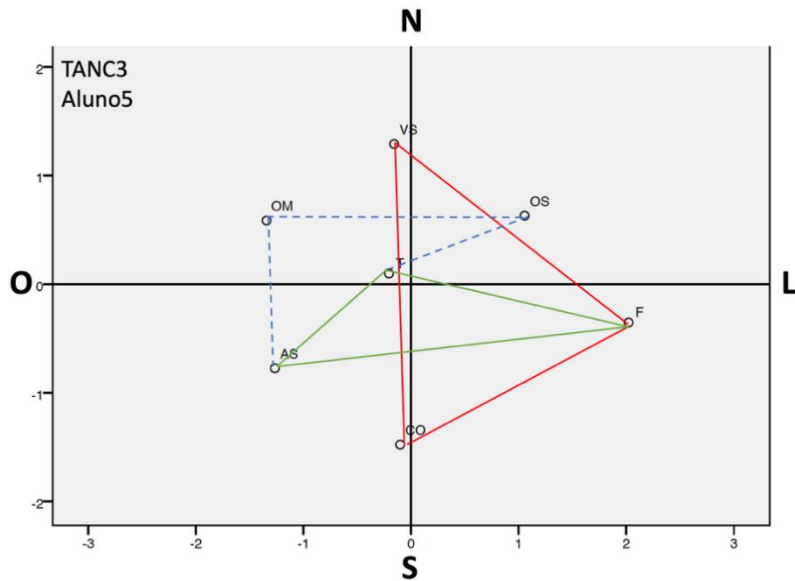


Figura 25 –TANC3: Mapa do aluno 5. Dim1=0,4097; Dim2=0,2983; W=0,1921

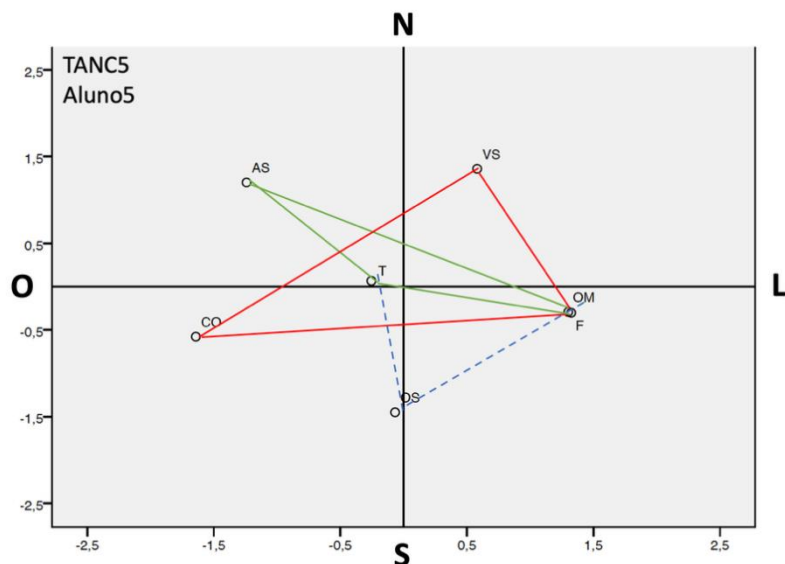


Figura 26 –TANC5: Mapa do aluno 5. Dim1=0,1201; Dim2=0,7930; W=0,8226

Nas figuras 26, 27 e 28 todos correspondem a dim1 pequeno e dim2 grande. Não se percebe uma estratificação dos conceitos ao longo de nenhuma das dimensões. Então, qual é o feito das diferenças entre dim1 e dim2? Observando-se mais atentamente, percebe-se que os conceitos que têm na sua designação alguma referência a onda, formam um círculo externo. Talvez seja um efeito semântico, e não conceitual. No interior desse círculo ficam os dois conceitos “neutros”, timbre e frequência. Portanto, podemos imaginar que a dimensão 2 também está associada ao efeito semântico.

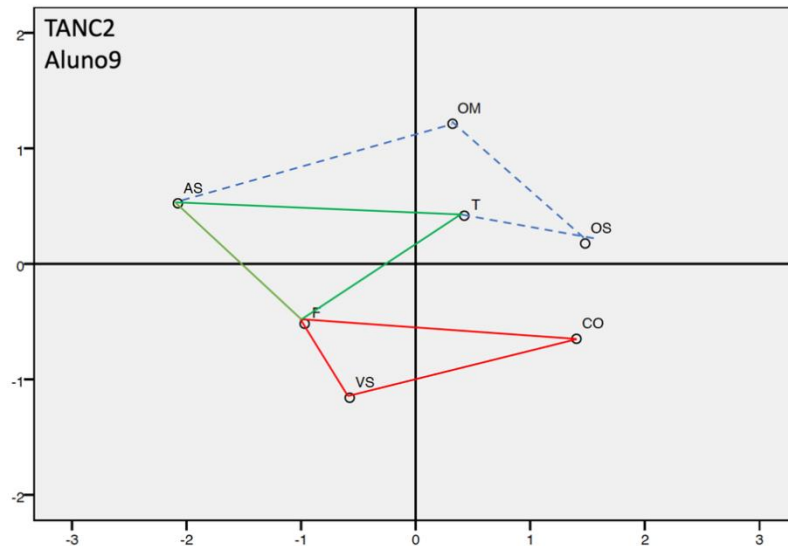


Figura 27 –TANC2: Mapa do aluno 9. Dim1=0,0032; Dim2=0,9717

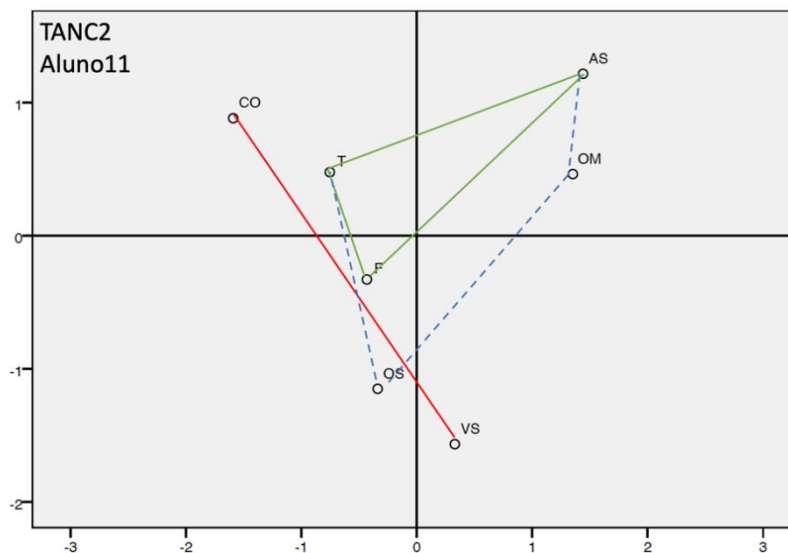


Figura 28 –TANC2: Mapa do aluno 11. Dim1=0,0285; Dim2=0,8307

Por outro lado, quando o peso da dimensão é muito maior do que o peso da dimensão 2, os conceitos associados ao som ficam separados dos outros conceitos, como ilustra a Figura 23, referente ao mapa do aluno 1, no TANC5. Também nesse caso, parece que a associação tem a ver com a componente semântica e com as relações científicas entre os conceitos. Para verificar se isso ocorre em mapas similares, analisamos o mapa do aluno 7 no TANC3 (Figura 29). Aparentemente o efeito não se confirma, mas levando-se consideração que a solução de EMD é invariante por uma rotação, podemos obter uma solução similar àquela apresentada na Figura 23,

simplesmente fazendo uma rotação de 45 graus nos eixos coordenados, como ilustra a Figura 30.

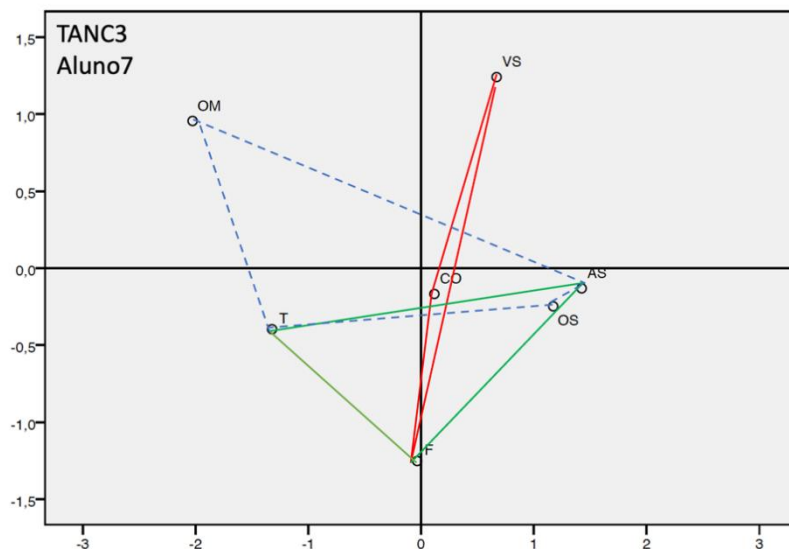


Figura 29 –TANC3: Mapa do aluno 7. Dim1=0,8776; Dim2=0,0755

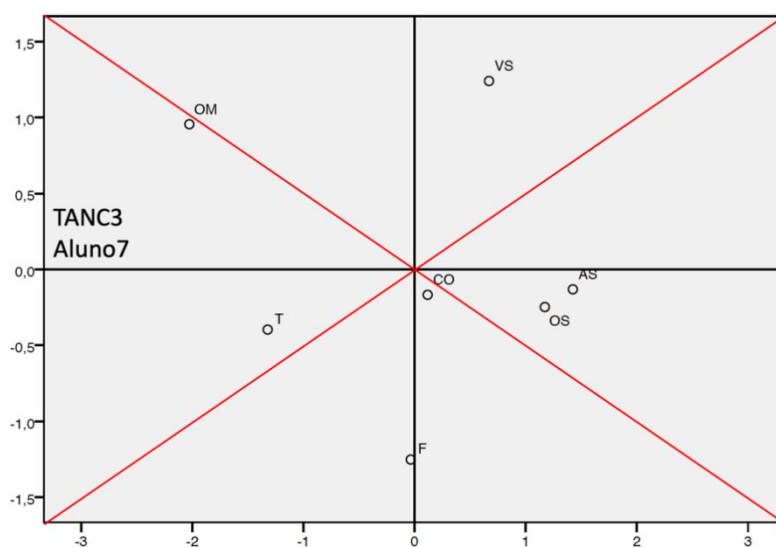


Figura 30–TANC3: Mapa do aluno 7 com eixos cartesianos (vermelhos) a 45 graus dos eixos originais

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Física, como ciência que busca compreender, descrever e prever os fenômenos naturais é imprescindível para a formação de indivíduos capazes de interagir criticamente com a sociedade atual, cada vez mais dependente da tecnologia. Entretanto, o ensino de conteúdos complexos como os conteúdos de Ondulatória ainda apresentam desafios significativos, principalmente quando se limita ao ensino formal que priorizam a memorização de fórmulas e a resolução mecânica de exercícios.

Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo geral investigar de que modo a aprendizagem em Física Ondulatória impacta a estrutura cognitiva dos estudantes. Para isso, foi utilizado o Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC) como instrumento de análise, possibilitando identificar e monitorar as mudanças nos mapas conceituais dos alunos e evidenciar como suas concepções iniciais foram reorganizadas em direção a uma compreensão mais estruturada e significativa dos conceitos de ondulatória.

Inicialmente, a aplicação do pré-teste (TANC1) permitiu a identificação das concepções alternativas iniciais dos alunos, revelando que muitos estudantes apresentavam concepções alternativas e associações frágeis ou inexistentes entre conceitos centrais da ondulatória. Essa configuração indicava uma organização cognitiva dispersa e desarticulada, que dificultava a construção de conhecimentos científicos sólidos.

Diante desse diagnóstico inicial, a utilização de organizadores prévios cuidadosamente elaborados, integrando exposições qualitativas sem fórmulas e analogias com situações do cotidiano foi essencial para ativar conhecimentos prévios dos estudantes estabelecer uma base conceitual sólida, favorecendo a ancoragem dos novos conteúdos abordados nos blocos de Oscilação, Ondas Mecânicas e Acústica. Essa etapa promoveu um ambiente de aprendizagem no qual os estudantes puderam integrar os novos conhecimentos às suas concepções prévias de maneira significativa e não arbitrária, por meio de discussões que conectavam os conceitos de física ondulatória a situações do dia a dia, favorecendo a construção de entendimentos mais sólidos e coerentes com os princípios científicos.

As etapas subsequentes da sequência didática, introdução gradual de aspectos matemáticos, exercícios contextualizados e avaliações formativas intermediárias, possibilitaram que os estudantes construíssem progressivamente os conceitos de forma

integrada. Cada reaplicação do TANC, prevista nas avaliações intermediárias e na avaliação final (pós-teste), permitiu monitorar, de forma inédita, a evolução temporal das estruturas cognitivas dos estudantes ao longo do processo de aprendizagem. O TANC foi aplicado em cinco momentos distintos: antes da intervenção, após o estudo de oscilação, após ondas, após acústica e ao término da sequência didática, possibilitando observar como a organização conceitual dos estudantes se modificou progressivamente ao longo do processo de aprendizagem.

A análise das matrizes de similaridade, processadas por meio do Escalonamento Multidimensional (EMD), permitiu gerar mapas conceituais que representaram visualmente a organização cognitiva dos estudantes. Ao longo dos testes, constatou-se a progressiva convergência dos mapas para estruturas mais coerentes e próximas do padrão científico, evidenciada pela diminuição dos valores de Stress (S) e pelo menor número de iterações necessárias para alcançar o ajuste ideal. Essa evolução aponta para a assimilação efetiva dos conceitos, indicando que a abordagem didática adotada promoveu reorganizações cognitivas alinhadas à aprendizagem significativa.

Além disso, a análise do índice de estranheza (Weirdness, W) permitiu monitorar individualmente a evolução de cada estudante em relação ao grupo, destacando, por exemplo, que mesmo alunos com dificuldades iniciais ou necessidades educacionais especiais, como o estudante diagnosticado com TEA e TDAH, conseguiram reorganizar suas concepções, aproximando seus mapas dos padrões referenciais. Tais resultados reforçam a importância, para o docente, de ter ferramentas diagnósticas e formativas que revelem trajetórias de aprendizagem individuais, subsidiando intervenções pedagógicas mais eficazes.

Para estabelecermos um parâmetro de comparação na análise dos resultados obtidos com as respostas dos estudantes, utilizamos três mapas obtidos a partir de fontes independentes, os quais denominamos mapas-referenciais. O primeiro mapa-referencial foi construído a partir das medidas de similaridade fornecidas por quatro professores: um professor do Ensino Médio, mestrando do MNPEF e docente de ondulatória, além de três doutores em Física atuantes como professores universitários de Física Geral. O segundo mapa-referencial (foi obtido a partir das medidas de similaridade geradas pelo modelo ChatGPT. Por fim, o terceiro mapa-referencial foi gerado a partir de uma matriz de similaridade contendo números aleatórios, distribuídos na mesma escala de 1 a 9 utilizada no TANC, servindo como um controle para avaliar a sensibilidade do método em detectar padrões de organização conceitual.

A comparação entre os mapas dos alunos e os mapas-referenciais reforçou a validade e a sensibilidade do método adotado. Enquanto os mapas dos especialistas e do modelo ChatGPT apresentaram padrões coerentes, os mapas construídos a partir de matrizes aleatórias evidenciaram superposição e desorganização entre conceitos, demonstrando que o TANC e o EMD são capazes de discriminar claramente diferentes níveis de organização conceitual.

Esses dados evidenciam que a metodologia adotada constitui estratégia poderosa para diagnosticar concepções iniciais, acompanhar a evolução da estrutura cognitiva e promover a aprendizagem significativa em conteúdos desafiadores como a ondulatória. Além disso, o estudo contribui para a pesquisa em ensino de Física ao oferecer evidências empíricas de que práticas pedagógicas que utilizam organizadores prévios, atividades interativas e recursos de avaliação conceitual podem favorecer a construção de conhecimentos de forma mais coerente, hierarquizada e alinhada ao entendimento científico.

Portanto, conclui-se que os objetivos da dissertação foram alcançados, uma vez que foi possível identificar concepções iniciais, aplicar organizadores prévios, elaborar e aplicar testes de associação conceitual, e analisar a estrutura conceitual dos alunos de forma detalhada e sistemática. Para futuras pesquisas deseja-se ampliar essa abordagem para outros conteúdos e contextos educacionais, investigando como diferentes fatores, como perfil socioeconômico, recursos tecnológicos disponíveis e metodologias complementares, podem potencializar ainda mais os benefícios observados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AFLALO, Y.; KIMMEL, R. Spectral multidimensional scaling. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.110, n.45, p. 18052–18057, 2013.

ALMEIDA, B. O. de; ALVES, L. R. G. Lives, educação e covid-19: estratégias de interação na pandemia. **Interfaces científicas-educação**, v. 10, n. 1, p. 149-163, 2020.

ANDRADE, Marina. **O Papel do Educador no Desenvolvimento Cognitivo e Motor Através do Brincar**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2023.

ANTUNES, C. **Jogos para a estimulação das múltiplas inteligências**. 3. ed. Petrópolis: Vozes, 2023.

AUSUBEL, D. P. **The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

AUSUBEL, D. P. The use of advance organizers in the learning and retention of meaningful verbal material. **Journal of Educational Psychology**, v. 51, n. 5, p. 267–272, 1960.

AUSUBEL, D. P. **In defense of verbal learning**. **Educational Theory**, [s.l.], v. 11, p. 15-25, 1961.

AUSUBEL, D. P.; FITZGERALD, D. Organizers, general background, and contextual material in meaningful verbal learning. **Journal of Educational Psychology**, v 52, n. 6, p. 267–272, 1961.

BÄSER, M.; GEBAN, Ö. Effectiveness of conceptual change instruction on understanding of heat and temperature concepts. **Research in Science & Technological Education**, v. 25, n. 1, p. 115–133, 2007.

BESSA, V. H. **Teorias da aprendizagem**. 5. ed. Curitiba: IESDE, 2023.

BRICKER, P. D. Listener evaluation of simulated telephone calling signals. **Bell System Technical Journal**, v.50, n.5, p.1559–1578, 1971.

CARROLL, J. D.; ARABIE, P. Multidimensional scaling. Measurement, judgment and decision making. *New York: Academic Press*. p. 179–250, 1998.

CARROLL, J. D.; CHANG, J.-J. Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an n-way generalization of “Eckart-Young” decomposition. **Psychometrika**, v. 35, n. 3, p. 283–319, 1970.

CHAMPAGNE, A. B.; KLOPPER, L. E.; ANDERSON, J. H. Factors influencing the learning of classical mechanics. **American Journal of Physics**, v. 48, n. 12, p. 1074–1079, 1980.

CHEN, C. Mapping associations. **Mapping Scientific Frontiers: The Quest for Knowledge Visualization**. London: Springer London. p. 85–141, 2013.

CHYUNG, S. YOUN. et al. Evidence-based survey design: The use of a midpoint on the Likert scale. *Performance Improvement*, v. 56, n. 10, p. 1523, 2017.

CLANCY, S. J. The topology of Slavic case: Semantic maps and multidimensional scaling. **Glossos**, v.7, n.1, p.1–28, 2006.

CLEMENT, J. Students’ preconceptions in introductory mechanics. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 1, p. 66–71, 1982.

COUSIN, G. Case study research. **Journal of Geography in Higher Education**, v. 29, n. 3, p. 421–427, 2005.

COSTA, I. **Novas tecnologias e aprendizagem**. ed.3. Editora Wak. Rio de Janeiro, 2021.

AQUINO, E. M. de. **Abordagem ausubeliana para o ensino de eletricidade, usando o jogo “Em busca do Prêmio Nobel” nas versões digital e cartas**. 217 f. Dissertação

(Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2025.

DOS SANTOS, C. A. **Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos**. 264 f. UFRGS, Porto Alegre, 1978.

DOS SANTOS, C. A.; MOREIRA, M. A. Aplicação da Análise Multidimensional ao Mapeamento Cognitivo de Conceitos Físicos. **Revista Brasileira de Física**, v. 9, p. 849–858, 1979.

DOS SANTOS, C. A.; MOREIRA, M. A. **Escalonamento multidimensional e análise de agrupamentos hierárquicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1991.

DOS SANTOS, C.A.; MOREIRA, M. A. Análise multidimensional da associação numérica de conceitos em termodinâmica. **Ciência e Cultura**, v. 32, n. 8, p. 1024–1032, 1980.

DOS SANTOS, C.A.; **Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos**. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

DUIT, R.; TREAGUST, D. F. Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. **International Journal of Science Education**, v. 25, n. 6, p. 671–688, 2003.

FARIAS, G. B. de; BELLUZZO, R. C. B. Competência em Informação: perspectiva didática pedagógica. **Informação & Informação**, Londrina, v.22, n.3, 2021.

FELIX, H. R. T. et al. Efeitos de aprendizagem na associação de conceitos: um estudo com escalonamento multidimensional. **Revista do Professor de Física**, v. 8, n. 1, p. 269–290, 2024.

FÉLIX, H. R. T. **Física, música e arduino: promovendo aprendizagem significativa no ensino de acústica**. 176 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2024.

FERREIRO, E. **Reflexões sobre alfabetização**. 35. ed. São Paulo: Cortez, 2023.

FERREIRO, E. **Alfabetização em processo**. ed.8. Editora Cortez. São Paulo, 2022.

FONSECA, V. **Desenvolvimento psicomotor e aprendizagem**. ed.5. Editora Artmed. Porto Alegre, 2023.

GATTI, B. A. **Abordagens quantitativas e a pesquisa educacional**. Seminário do Instituto de Matemática e Estatística da USP, São Paulo, 2012.

GIGUÈRE, G. Collecting and analyzing data in multidimensional scaling experiments: A guide for psychologists using SPSS. **Tutorials in Quantitative Methods for Psychology**, v. 2, n. 1, p. 26–37, 2006.

GLINER, G. S. A Note on a Statistical Paradigm for the Evaluation of Cognitive Structure in Physics Instruction. **Applied Psychological Measurement**, v. 5, n. 4, p. 493–502, 1981.

HILGER, T. R.; MOREIRA, M. A. A study of social representations of quantum physics held by high school students through numerical and written word association tests. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciências**, v. 8, n. 1, p. 52–61, 2013.

IRESON, G. A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. **European Journal of Physics**, v.20, n.3, p.193, 1999.

Kong, Y. The Role of Experiential Learning on Students' Motivation and Classroom Engagement. **Frontiers in Psychology**, v. 12, p.1-4., 2021.

KENSKI, Vani Moreira. **Educação e Tecnologias: O novo ritmo da informação**. ed.5. Editora Papirus. Campinas, 2022.

KLEINKE, R. de C. M. **Aprendizagem significativa: a pedagogia por projetos no processo de alfabetização**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023.

LEITZMAN, D. F.; RUTT, D. P.; AUSTIN, D. R. Using multidimensional scaling for curricular goal analysis. **Instructional Science**, v.9, n.2, p.145–162, 1980.

LIBARKIN, J. C.; KURDZIEL, J. P. Research methodologies in science education: The qualitative-quantitative debate. **Journal of geoscience education**, V. 50, n.1, p. 78-86, 2002.

LIMA, L. **A aprendizagem significativa do conceito de função na formação inicial do professor de matemática**. Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Educação. UECE-CE, 2023.

MATTHEWS, G. P.; BROOK, V. G.; KHAN-GANDAPUR, T. H. Cognitive structure determinations as a tool in science teaching: Part 1: A new method of creating concept maps. **European Journal of Science Education**, v.6, n.2, p.169–177, 1984.

MERCADO, L. P. L. **Novas tecnologias na educação: reflexões sobre a prática**. ed.5. Editora Edufal. Maceió, 2022.

MORAIS, A. G. D. **Como eu ensino: sistema de escrita alfabética**. ed.3. Editora Melhoramentos. São Paulo, 2022.

MORAIS, N. S.; SOBRAL, F. Challenges of misinformation and fake news: a case study with higher education students. **Millenium – Journal of Education, Technologies and Health**, v. 2, n. 5, p. 85–93, 2020.

MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa: um conceito subjacente. **Revista Brasileira de Educação**, v. 16, n.48, p. 491–502, 2011.

MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. *Concepções alternativas e mudança conceitual: uma revisão bibliográfica*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 17, n.1, p. 25–43, 2000.

NOVAK, J. D. Concept mapping: A useful tool for science education. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 27, n. 10, p. 937–949, 1990.

NOVAK, J. D.; GOWIN, B. **Aprender a aprender**. ed.10. Editora Plátano. Lisboa, 2023.

PRESTON, C. C.; COLMAN, A. M. Optimal number of response categories in rating scales: reliability, validity, discriminating power, and respondent preferences. **Acta Psychologica**, v. 104, p. 115, 2000.

PAIVA, J. C. M.; SILVA, A. M.; PINTO, A. C. Q. Uma proposta de abordagem do conceito de campo elétrico fundamentada na teoria da aprendizagem significativa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n 1, p. 1302, 2016.

PATRICK, H.; KAPLAN, A.; RYAN, A. M. Positive classroom motivational environments: Convergence between mastery goal structure and classroom social climate. **Journal of educational psychology**, v.103, n 2, p.367, 2011.

PELIZZARI, Adriana; et al. Teoria da aprendizagem significativa segundo Ausubel. **Revista PEC**, Curitiba, v.2, n.1, 2022.

PIRES, Felipe *et al.* A teoria da aprendizagem significativa e o jogo. **Revista Educação em Questão**, Natal, v. 58, n. 57, p. 1-21. 2020.

RAMOS, Eduardo. **Jogos Cooperativos e o Desenvolvimento Motor e Cognitivo na Educação Infantil**. Curitiba: Editora UFPR, 2022.

RIBEIRO, T. N. **O ensino de razões trigonométricas no triângulo retângulo a partir de situações aplicadas à Física: um estudo baseado nas unidades de ensino potencialmente significativas (UEPS)**. Tese de doutoramento, Universidade Anhanguera de São Paulo, 2022.

SANTOS, Fernanda. **Brincadeiras ao Ar Livre: Desenvolvimento Sensorial, Motor e Cognitivo na Educação Infantil**. Campinas: Editora Unicamp, 2021.

SANTOS, J. C.; DICKMAN, A. G. Experimentos reais e virtuais: proposta para o ensino de eletricidade no nível médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.41, n.1, e20180161, 2019.

SOARES, Magda. **Alfabetização e letramento**. ed.11. Editora Contexto. São Paulo, 2021.

TAKANE, Y.; YOUNG, F. W.; J. DE LEEUW. Nonmetric individual differences multidimensional scaling: An alternating least squares method with optimal scaling features. **Psychometrika**, v. 42, n. 1, p. 7–67, 1977.

THRO, M. P. Relationships Between Associative and Content Structure of Physics Concepts. **Journal of Educational Psychology**, v. 70, n. 6, p. 971–978, 1978.

UNICEF. *Digital misinformation/disinformation and children*. Florence: UNICEF Office of Research – Innocenti. Disponível em: <https://www.unicef.org/innocenti/media/856/file/UNICEF-Global-Insight-Digital-Mis-Disinformation-and-Children-2021.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2025.

VÁLIO, A. B. M. *et al.* **Ser Protagonista**. São Paulo: SM Educação, v.2, 2024.

VIANA, D.; et al. Desenvolvimento e Aplicação de Serious Games para Ensino de Cinética Química. **Research, Society and Development**, v.9, n.7, 2020.

VILCHES, M. A. *Topologia geral. Notas de aula*. Rio de Janeiro: Departamento de Análise-IME-UERJ, 2012. Disponível em: <<https://portalidea.com.br/cursos/basico-em-topologia-apostila01.pdf>>.

VILLANI, A.; PACCA, J. L. A.; HOSOUME, Y. Concepção espontânea sobre movimento. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 57–65, 1985.

YOUNG, F. W.; TAKANE, Y.; LEWYCKYJ, R. ALSCAL: A nonmetric multidimensional scaling program with several individual-differences options. **Behavior Research Methods & Instrumentation**, v. 10, n. 3, p. 451–453, 1978

**APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL: SEQUÊNCIA DIDÁTICA
DIAGNÓSTICA PARA O ENSINO DE ONDULATÓRIA COM USO DO TANC**



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS NATURAIS, MATEMÁTICA E
ESTATÍSTICA
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA- POLO 9

PRODUTO EDUCACIONAL

SEQUÊNCIA DIDÁTICA DIAGNÓSTICA PARA O ENSINO DE
ONDULATÓRIA COM USO DO TANC

AUTORES:

José Vânio Paula Silva

Erlania Lima de Oliveira

Carlos Alberto dos Santos

MOSSORÓ - RN

2025

APRESENTAÇÃO

Este produto educacional é parte integrante da dissertação intitulada Mapeamento da Estrutura Cognitiva em Ondulatória: Um Estudo com o Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC), desenvolvida no âmbito do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo 9 – CCEN/UFERSA, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

O presente material teve como objetivo principal de contribuir para o aprimoramento do ensino de Física Ondulatória no Ensino Médio, por meio da implementação de uma sequência didática diagnóstica e formativa, apoiada em instrumentos específicos de avaliação conceitual. O diferencial da proposta está na integração de momentos avaliativos sistemáticos com o uso do Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC) como instrumento diagnóstico e formativo, voltado à identificação e reorganização das estruturas conceituais dos estudantes.

A proposta adota uma abordagem progressiva dos conteúdos de ondulatória, estruturados em três blocos temáticos interdependentes: Oscilações, Ondas Mecânicas e Acústica. Em cada etapa, os estudantes são avaliados por meio de TANCs, que mapeiam o grau de coerência e articulação entre os conceitos-chave abordados.

A aplicação do TANC permite que o professor identifique concepções alternativas iniciais e acompanhe a evolução das estruturas cognitivas ao longo do processo de ensino. Isso reforça a importância da avaliação diagnóstica e formativa no ensino de Ciências, que se torna aqui não apenas um instrumento de verificação, mas um recurso de intervenção pedagógica fundamentada, contribuindo para uma aprendizagem mais significativa e duradoura.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	ii
1 INTRODUÇÃO	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1 Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC).....	5
2.2 Análise dos Testes de Associação Numérica de Conceitos (TANC) com Escalonamento Multidimensional (EMD)	6
2.3 Aspectos estatísticos da EMD	8
2.4 Interpretação Topológica dos Mapas Conceituais	11
3 ESTRUTURA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA POR BLOCOS	14
3.1 Apresentação do instrumento TANC.....	14
3.2 TANC 1 (pré-teste)	15
3.3 Bloco 1 – Oscilações Objetivos de Aprendizagem:	16
3.4 Bloco 2 – Ondas Mecânicas Objetivos de Aprendizagem:	17
3.5 Bloco 3 – Acústica Objetivos de Aprendizagem:	17
3.6 Avaliação Formativa Final (TANC 5)	18
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	19
5 REFERÊNCIAS.....	20

1 INTRODUÇÃO

O ensino de Física, especialmente no campo da ondulatória, que engloba oscilações, ondas e acústica, apresenta desafios reconhecidos por professores e pesquisadores. A natureza abstrata desses conceitos, a dificuldade de visualização de fenômenos não perceptíveis a olho nu e a exigência de modelos matemáticos, como funções trigonométricas, tornam essa temática uma das mais complexas no Ensino Médio. Esses obstáculos contribuem para interpretações equivocadas e para a fragmentação do conhecimento, comprometendo tanto a compreensão teórica quanto a aplicação prática dos conteúdos.

Nesse cenário, torna-se fundamental investigar como os estudantes organizam cognitivamente esses conceitos ao longo do processo de ensino e quais estratégias pedagógicas favorecem a construção de uma rede conceitual mais estruturada. A avaliação da aprendizagem, portanto, não deve se restringir à mensuração do desempenho em exercícios, pois este envolve múltiplas competências (interpretação, cálculo, raciocínio lógico) que dificultam a análise direta das relações conceituais.

Compreender a evolução da estrutura cognitiva durante uma intervenção didática é essencial para identificar lacunas, potencializar avanços e planejar práticas pedagógicas mais eficazes. Para isso, esta pesquisa propõe acompanhar o desenvolvimento conceitual dos estudantes ao longo do ensino de ondulatória, utilizando instrumentos que permitam observar mudanças qualitativas e quantitativas na organização das ideias.

Portanto, a contribuição deste trabalho reside em propor e validar um procedimento inovador para monitorar a evolução cognitiva dos estudantes durante o ensino de ondulatória, fornecendo subsídios para práticas pedagógicas mais eficazes e para pesquisas que busquem compreender os mecanismos de construção do conhecimento em Ciências. Essa compreensão é estratégica para promover aprendizagens mais consistentes, duradouras e alinhadas ao desenvolvimento de competências científicas, objetivo central do Ensino de Física contemporâneo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC)

O Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC) constitui uma ferramenta quantitativa que possibilita uma representação mais precisa da organização conceitual dos estudantes, sobretudo no domínio da Física Ondulatória. Implementada inicialmente no Brasil por Dos Santos (1978), “o TANC tem como objetivo mensurar a intensidade das associações cognitivas percebidas entre pares de conceitos”.

Essa abordagem opera diretamente sobre a memória associativa dos estudantes, pois requer apenas que julguem o grau de proximidade entre conceitos, sem demandar outras habilidades procedimentais típicas da resolução de problemas. A partir desses julgamentos, os dados do TANC podem ser analisados por meio do Escalonamento Multidimensional (MDS), técnica estatística que produz mapas visuais capazes de revelar padrões de organização conceitual antes e depois da intervenção didática.

No campo da Física, o TANC consolidou-se como uma ferramenta eficaz para investigar a estrutura dos conhecimentos em diversos tópicos. No Brasil, os estudos pioneiros de Dos Santos e Moreira (1979; 1980) aplicaram a Análise Multidimensional e o Escalonamento Multidimensional à associação numérica de conceitos, tanto de forma ampla quanto especificamente em termodinâmica, revelando como as concepções dos estudantes se distribuem e se articulam no espaço conceitual. Esses trabalhos evidenciam que o mapeamento multidimensional permite identificar núcleos conceituais, zonas de sobreposição e lacunas de compreensão, fornecendo subsídios robustos para o planejamento de intervenções didáticas alinhadas às representações prévias dos estudantes.

Em pesquisas mais recentes, o mesmo autor e colaboradores empregaram o TANC em dissertações do MNPEF-UFERSA, tanto em trabalhos sobre eletricidade (DE AQUINO, E. M., 2025) quanto em ondulatória (FELIX, H. R. T. et al., 2024; FÉLIX, H. R. T., 2024). Nesse último contexto, Félix et al. (2024) aplicaram o TANC antes e depois de uma intervenção em acústica que utilizou placas Arduino como recurso experimental, analisando as mudanças conceituais dos alunos por meio do Escalonamento Multidimensional (EMD). O princípio do TANC fundamenta-se na ideia de estrutura cognitiva, como colocada por Ausubel e Fitzgerald, citados por Félix (2024).

Por estrutura cognitiva entende-se a organização, estabilidade e clareza de conhecimento de um indivíduo em um determinado campo do conhecimento (...). No sentido mais geral e de longo prazo, as variáveis da estrutura cognitiva referem-se à influência de propriedades organizacionais significativas na aquisição de conhecimento nesta área disciplinar (...). No sentido mais específico e de curto prazo, as variáveis de estrutura cognitiva referem-se aos efeitos das propriedades organizacionais apenas dos conceitos imediatamente (ou próximos) relevantes dentro de um determinado campo de assunto sobre a aprendizagem e retenção de pequenas unidades do referido assunto (FÉLIX, 2024).

Embora os procedimentos analíticos reportados por Félix sejam integralmente utilizados nesta dissertação, há uma diferença importante que deve ser salientada. Enquanto nos estudos anteriores o TANC foi aplicado apenas antes e depois do produto educacional, aqui o teste foi aplicado em diferentes momentos para possibilitar a investigação da evolução temporal da estrutura cognitiva em função do processo de aprendizagem, conforme detalhado no capítulo 4.

O TANC é capaz de revelar nuances sutis na organização conceitual dos alunos, mensurando até que ponto eles percebem determinados conceitos como próximos ou distantes. Esse diagnóstico permite identificar agrupamentos cognitivos e verificar a coerência interna da estrutura conceitual de cada estudante. Por exemplo, após a introdução dos tópicos “frequência”, “amplitude”, “velocidade de propagação”, “comprimento de onda” e “ressonância”, o docente fornece aos alunos uma tabela contendo todos os pares possíveis desses termos. Cada par recebe, então, uma nota de 0 a 5, indicando o grau de relação percebido. Com esses dados, utiliza-se um software estatístico para gerar um mapa conceitual baseado em similaridades, que pode ser comparado antes e depois da sequência didática, evidenciando a reorganização cognitiva provocada pelo ensino.

No contexto desta dissertação, o uso do TANC será fundamental para comparar a estrutura conceitual dos estudantes em diferentes momentos do processo de ensino de Física Ondulatória, permitindo avaliar, de forma empírica, o impacto da aprendizagem significativa na reconfiguração das conexões entre os conceitos. O teste, com as instruções dados aos alunos.

2.2 Análise dos Testes de Associação Numérica de Conceitos (TANC) com Escalonamento Multidimensional (EMD)

O emprego de técnicas de Escalonamento Multidimensional (EMD) no tratamento dos dados do TANC remonta aos trabalhos pioneiros de C. A. dos Santos (1978), que introduziu simultaneamente, no Brasil, tanto os testes de associação numérica quanto os algoritmos de *Multidimensional Scaling* (MDS). Esses métodos, posteriormente consolidados na literatura sob o termo Escalonamento Multidimensional (DOS SANTOS; MOREIRA, 1991). A literatura a respeito desse assunto é imensa, mas nossa leitura para se restringiu à dissertação mencionada, aos trabalhos elaborados aqui no MNPEF-UFERSA (DE AQUINO, E. M., 2025; FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024; FÉLIX, H. R. T., 2024) e a alguns poucos artigos não mencionados por essas referências.

O TANC gera uma matriz de similaridades entre pares de conceitos. Embora essa matriz forneça os dados brutos do julgamento dos estudantes, sua leitura direta não permite visualizar, de maneira clara, a estrutura global dessas relações. É nesse ponto que o EMD se torna fundamental: trata-se de uma técnica estatística que converte as medidas de similaridade em uma representação espacial bidimensional. O resultado é um mapa cognitivo, em que cada ponto representa um conceito e a distância entre eles expressa o grau de proximidade ou afastamento percebido pelos estudantes.

A técnica de EMD foi desenvolvida para solucionar um problema geométrico clássico: como reconstruir um mapa a partir das distâncias entre seus pontos. De forma análoga, ela busca representar, em um espaço geométrico, as distâncias psicológicas ou cognitivas entre conceitos. Assim, quanto maior a semelhança percebida entre dois conceitos, menor será a distância entre eles no mapa resultante.

Existem diversos algoritmos de EMD, que podem ser classificados em duas categorias principais:

- Métricos, que utilizam os valores absolutos das medidas de proximidade (similaridade ou dissimilaridade);
- Não-métricos, que consideram apenas o ordenamento dessas medidas, estabelecendo uma relação monotônica entre similaridades e distâncias.

O presente trabalho utiliza o modelo não-métrico, implementado no pacote estatístico SPSS por meio dos algoritmos ALSCAL/INDSCAL (CARROLL; CHANG, 1970; TAKANE; YOUNG; DE LEEUW, 1977; YOUNG; TAKANE; LEWYCKYJ, 1978), amplamente empregados em pesquisas recentes na área do ensino de Ciências.

O princípio fundamental do EMD consiste em encontrar a configuração geométrica que melhor se ajusta às medidas de proximidade (similaridade ou dissimilaridade). Esse ajuste é obtido por meio da minimização de uma função estatística denominada *Stress*, que expressa o grau de discrepância entre as distâncias calculadas e as medidas originais de similaridade. O algoritmo busca a configuração que produza o menor valor de *Stress*, assegurando uma relação monotônica entre as similaridades e as distâncias representadas, procedimento análogo ao método dos mínimos quadrados, utilizado em ajustes de dados experimentais.

Por meio de algoritmos sofisticados (DOS SANTOS, 1978; DE AQUINO, E. M., 2025; FÉLIX, H. R. T., 2024), o EMD transforma as medidas de similaridade em coordenadas espaciais cuja dimensão é definida pelo usuário, sendo a representação bidimensional a mais comum na literatura. Essa conversão permite identificar padrões de agrupamento conceitual, núcleos de significação e lacunas cognitivas, fornecendo subsídios valiosos para a compreensão da organização interna do conhecimento dos estudantes e das transformações provocadas por intervenções pedagógicas.

De modo ilustrativo, o processo pode ser comparado à reconstrução de um mapa geográfico: conhecendo-se apenas as distâncias entre as cidades, é possível reconstruir a disposição espacial dos pontos. Da mesma forma, o EMD, a partir das distâncias cognitivas obtidas pelo TANC, reconstrói um mapa mental que representa as relações conceituais estabelecidas pelos estudantes.

2.3 Aspectos estatísticos da EMD

Existem duas modalidades de algoritmos EMD: algoritmos métricos e não-métricos. Ambos utilizam o método de ajustes de dados bem conhecido nas ciências experimentais como *método do qui quadrado*, χ^2 . O algoritmo ajusta os dados experimentais a uma determinada curva, de modo a função χ^2 seja mínima. Na EMD, essa função é conhecida como *Stress*, S , sendo assim definida (DE AQUINO, E. M., 2025):

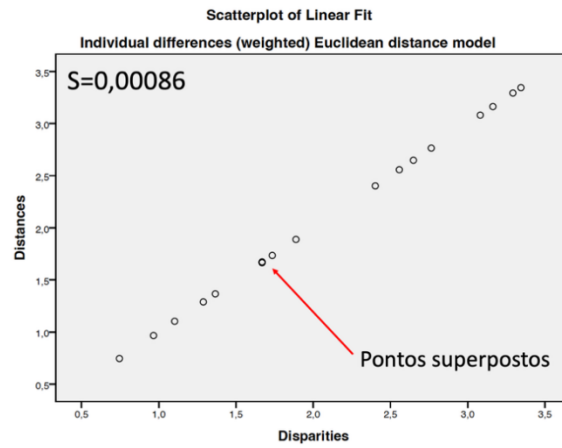
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i < j} (d_{ij} - \hat{d}_{ij})^2}{\sum_{i < j} d_{ij}^2}}, \quad (2.1)$$

onde d_{ij} são as distâncias ajustadas, e, nos algoritmos métricos, $\hat{d}_{ij}$ são as medidas de similaridade. O algoritmo funciona exatamente como no caso das ciências experimentais, como a física. Nos algoritmos não-métricos, como o que usamos aqui, que são, do ponto de vista computacional, mais potentes do que os métricos, as medidas de similaridade não são diretamente usadas no processo de ajuste. Não há necessidade dos valores exatos dessas medidas. Basta saber o ordenamento dessas medidas. Não há necessidade de saber os valores das similaridades entre os conceitos A-B e C-D, basta saber qual é o maior valor. Daí vem o nome da técnica: escalonamento.

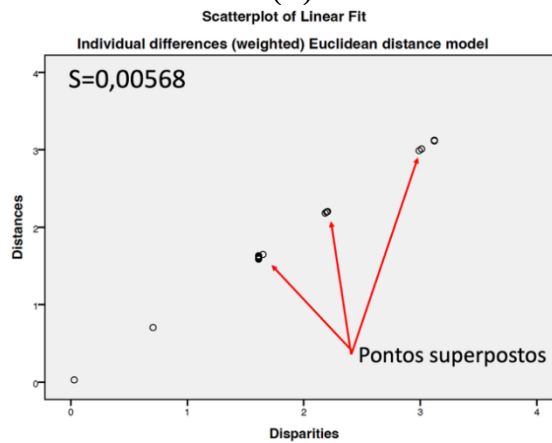
Nos algoritmos não-métricos, $\hat{d}_{ij}$, denominados disparidades, são números monotonicamente relacionados com as medidas de similaridade, s_{ij} . Ou seja, se $s_{ij} < s_{kl}$, então $\hat{d}_{ij} < \hat{d}_{kl}$. Portanto, o algoritmo transforma a matriz com as similaridades em uma matriz com as disparidades e ajusta os dados de modo que seja mínimo o valor de S (equação 2.1w). O algoritmo faz isso, tendo em conta a necessidade de minimizar S e de não violar a desigualdade triangular. Ou seja, dados três pontos, i, j e k, suas disparidades devem satisfazer essa relação:

$$\hat{d}_{jk} < \hat{d}_{ij} + \hat{d}_{ik}. \quad (2.2)$$

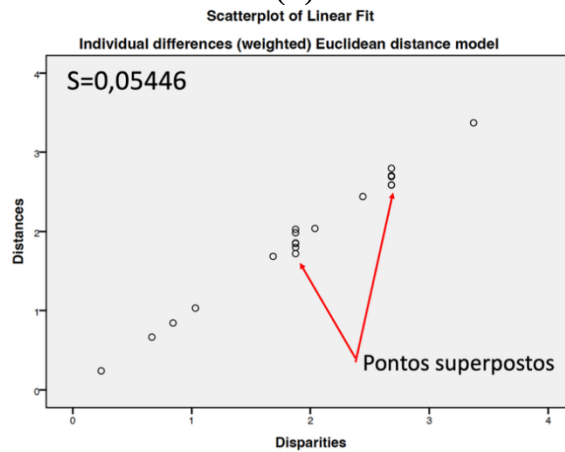
Raramente isso é possível para todos os conjuntos de três pontos. Há duas relações de monotônicas. Uma entre $\hat{d}_{ij}$ e s_{ij} , e outra, depois do ajuste, entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$. O algoritmo ALSCAL que usamos, apresenta essa última na saída dos resultados. A violação da desigualdade triangular se manifesta no valor de S e na monotonicidade entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$. Ou seja, quanto pior a monotonicidade, maior o valor de S, e pior é o ajuste. Dito de outro modo, quanto menor o valor de S, mais linear é a curva d_{ij} versus $\hat{d}_{ij}$, conforme ilustra a Figura 1.1z. Os dados apresentados nessa figura foram extraídos dos resultados obtidos no pós-teste. Foram selecionados três mapas. O primeiro com $S=0,00086$, o segundo com $S=0,00568$, e o terceiro com $S=0,05446$. Vê-se claramente que quanto menor for o valor de S, ou seja, quanto melhor for o ajuste, mais linear é a relação monotônica entre d_{ij} e $\hat{d}_{ij}$.



(A)



(B)



(C)

Figura 1 – (A) Mapa com $S=0,00086$; (B) Mapa com $S=0,00568$; (C) Mapa com $S=0,05446$.

Os valores de S e as linearidades nas curvas de monotonicidade podem se usados para classificar os mapas conforme a qualidade dos dados iniciais. Quando as medidas de similaridade apresentam consistência organizacional, o ajuste aproxima-se da perfeição, com baixos valores de S e alta linearidade na curva de monotonicidade.

2.4 Interpretação Topológica dos Mapas Conceituais

Existem na literatura duas formas básicas de interpretar os resultados obtidos com o TANC. Na primeira, relatada em poucos casos, os investigadores tentam interpretar o significado de cada dimensão. Quando os estímulos têm propriedades físicas e sensoriais bem definidas, isso é mais fácil, mas quando os estímulos estão associados a propriedades cognitivas complexas, como é o caso de conceitos científicos, a associação de significados a cada dimensão é praticamente impossível. No caso de conceitos científicos, não conhecemos na literatura nenhum trabalho com identificação das dimensões. O que há são artigos apresentando a análise com a formação de grupos de conceitos (DOS SANTOS, 1978; DOS SANTOS; MOREIRA, 1979; GLINER, 1981; IRESON, G., 1999; PATRICK, H.; KAPLAN, A.; RYAN, A. M., 2011; THRO, M. P., 1978). Félix e colaboradores acrescentaram à metodologia da formação de grupos, uma metáfora topológica para analisar os resultados (FELIX, H. R. T. *et al.*, 2024). Em vez de dim1 versus dim2, são usados os pontos cardinais, Norte, Sul, Leste e Oeste, como ilustra a Figura 2.

Dado um espaço geométrico como esse ilustrado na Figura 2, é natural que se pense nos aspectos topológicos desse espaço. Não é por acaso que alguns autores têm trabalhado com essa ideia, do ponto de vista formal cuja natureza complexa está acima do escopo da presente dissertação (AFLALO, Y.; KIMMEL, R., 2013; CARROLL, J. D.; ARABIE, P., 1998; CHEN, C., 2013; CLANCY, S. J., 2006). Adota-se aqui a ideia de Félix e colaboradores, que tem algo a ver com uma definição encontrada em notas de aula da UERJ (VILCHES, M. A., 2012).

A Topologia utiliza os mesmos objetos que a Geometria, com a seguinte diferença: não interessa a distância, os ângulos nem a configuração dos pontos. Na Topologia, objetos que possam transformar-se em outros, através de funções contínuas reversíveis, são equivalentes e indistinguíveis (VILCHES, 2012).

Dessa definição, Félix e colaboradores passaram a usar a ideia de congruência entre polígonos formados por determinados conceitos nos mapas conceituais. A figura 2 foi elaborada para ilustrar o procedimento analítico. Como já foi dito, em vez de usar os eixos dimensionais, como geralmente reportado na literatura, foram utilizados os pontos cardinais como referência, porque a análise desta pesquisa envolve dilatação e contração

dos lados dos polígonos e rotações desses polígonos. Essas operações são mais simplesmente referidas em termos dos pontos cardinais do que dos eixos dimensionais.

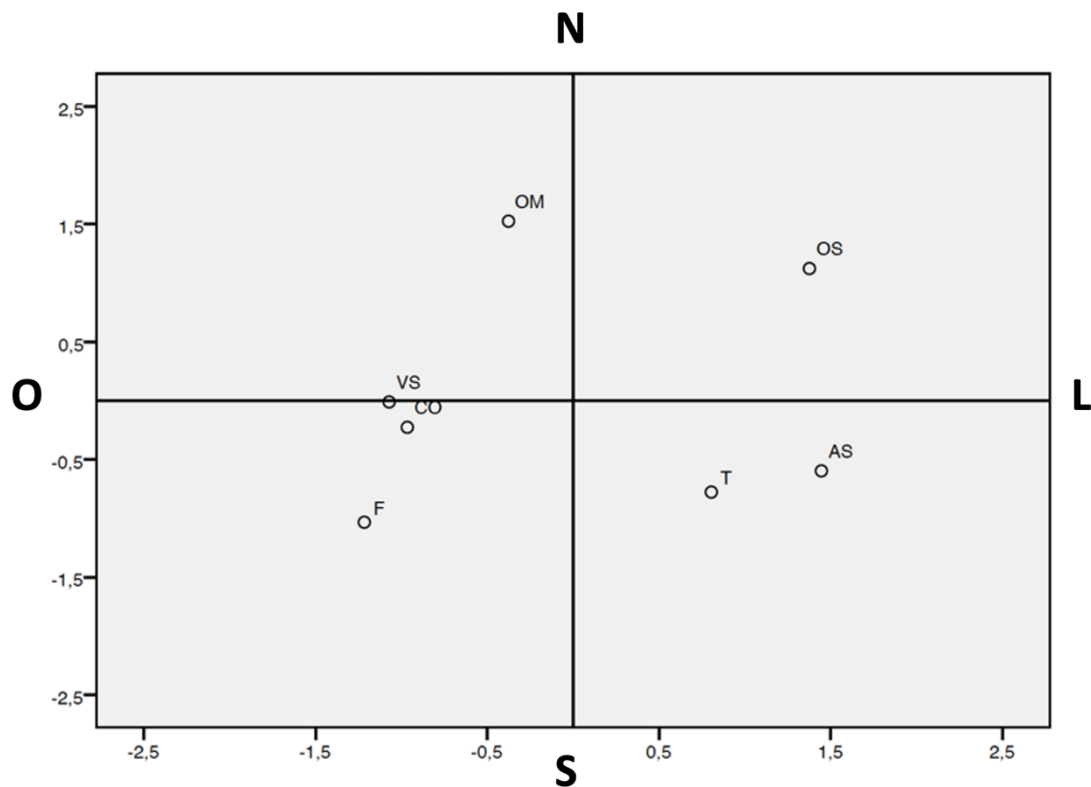


Figura 2 – Mapa conceitual.

O grupo destacado na Figura 3, pode ser denominado $\{T, OM, OS, AS\}$, ou qualquer denominação com as letras comutadas no sentido horário: $\{OM, OS, AS, T\}$, $\{OS, AS, T, OM\}$ e $\{AS, T, OM, OS\}$. Qualquer uma dessas denominações representam o mesmo grupo, mas ao longo desta dissertação sempre usaremos a primeira denominação, $\{T, OM, OS, AS\}$. E para apresentar a análise topológica, os grupos foram denominados da seguinte forma: $\{T-AS\}^a$, $\{T-AS\}^b$, $\{T-AS\}^c$ e $\{T-AS\}^d$.

Todos os grupos apresentados na Figura 3 são topologicamente congruentes. O grupo $\{T-AS\}^b$ transforma-se em $\{T-AS\}^a$, por intermédio de três operações: rotação no sentido horário, alterações nas distâncias T-OM e OS-OM. De modo análogo é fácil mostrar a congruência entre $\{T-AS\}^a$ e $\{T-AS\}^d$. O grupo $\{T-AS\}^d$ também é congruente com $\{T-AS\}^a$, uma vez que resulta de uma rotação de 180 graus desse último grupo.

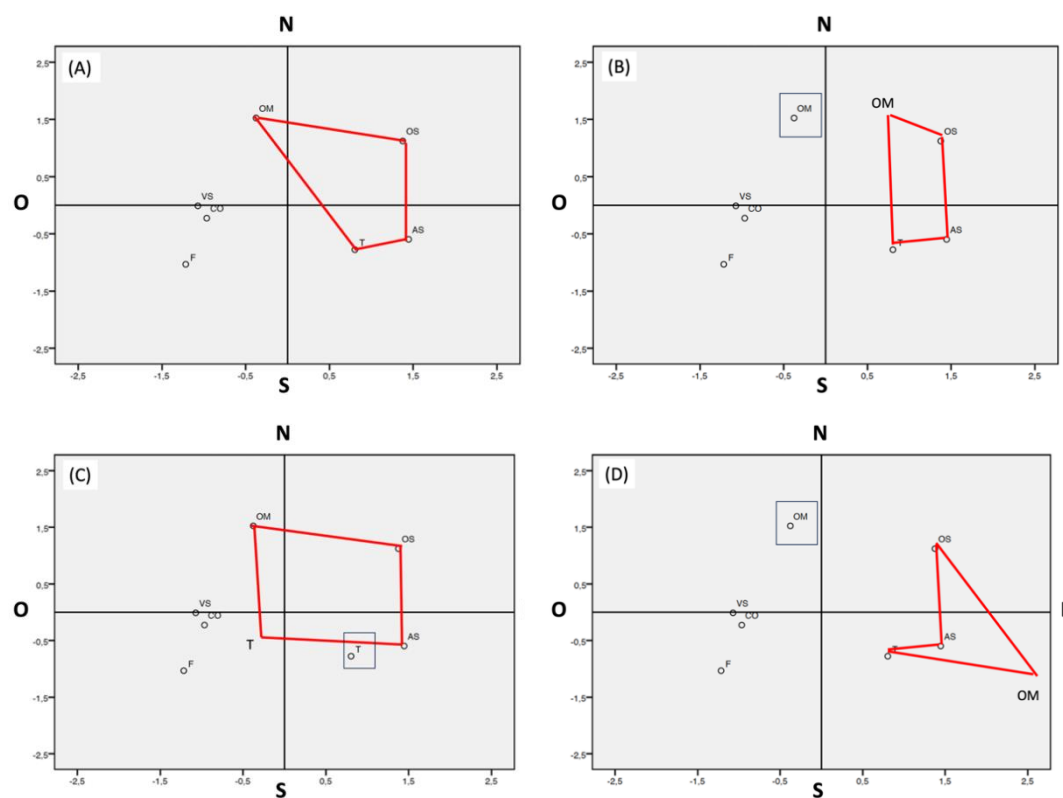


Figura 3 – Mapas conceituais obtidos a partir de um TANC

3 ESTRUTURA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA POR BLOCOS

A sequência didática foi estruturada em três blocos temáticos interdependentes, concebidos para abranger conceitos fundamentais da Física Ondulatória de forma articulada e progressiva. Essa organização busca garantir uma transição gradual entre diferentes níveis de representação, do qualitativo ao matemático, por meio da combinação de atividades investigativas, análise gráfica e formalização teórica, promovendo uma aprendizagem mais sólida e integrada.

Com intuito de monitorar a evolução conceitual dos estudantes ao longo da intervenção, foi aplicado o mesmo instrumento avaliativo (TANC) em cinco momentos distintos, distribuídos ao longo da sequência. A primeira aplicação (TANC 1) ocorre antes do início dos blocos, com caráter diagnóstico, visando identificar concepções prévias e mapear possíveis dificuldades conceituais, servindo como subsídio para ajustes na abordagem didática.

As demais aplicações foram realizadas ao término de cada bloco (TANC 2, 3 e 4) e, por fim, uma aplicação final (TANC 5), permitindo comparar a estrutura conceitual inicial e final dos alunos. Essa estratégia tornou possível acompanhar a evolução temporal da organização cognitiva de forma contínua, evidenciando como os conceitos foram sendo progressivamente integrados. Cada bloco da sequência contemplou três componentes estruturais:

- Objetivos de aprendizagem;
- Conteúdos abordados;
- TANC correspondente (pós-bloco).

3.1 Apresentação do instrumento TANC

Considerando que o TANC constitui o eixo avaliativo central desta proposta e tem papel essencial no diagnóstico e acompanhamento da aprendizagem conceitual, apresenta-se a seguir a versão integral do instrumento, acompanhada das instruções originais fornecidas aos estudantes. A exposição detalhada do TANC nesta seção tem como propósito garantir transparência metodológica, além de viabilizar a replicação desta sequência didática por outros docentes e pesquisadores interessados.

O TANC solicita que os participantes atribuam valores de 1 a 9 para indicar o grau de relação percebido entre pares de conceitos de ondulatória: quanto menor o número,

maior a proximidade conceitual; quanto maior, mais distante a relação. Cada par recebe apenas um julgamento, marcado na coluna correspondente ao valor escolhido.

Por outro lado, caso o participante julgue que um conceito do par não tem nada a ver com o outro, deve-se marcar X na coluna 9. Estas são as duas situações extremas. Os números entre 1 e 9 refletem situações intermediárias: quanto mais próximo de 1 for a marcação, maior é o relacionamento percebido entre os conceitos, e quanto mais perto de 9, menor esse relacionamento. Observação: Não há limite de tempo para este teste.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Onda sonora - Onda mecânica									
Timbre – Onda mecânica									
Frequência - Onda sonora									
Onda mecânica – Frequência									
Comprimento de onda – Frequência									
Onda sonora - Comprimento de onda									
Frequência - Amplitude do som									
Comprimento de onda - Onda mecânica									
Velocidade do som - Comprimento de onda									
Timbre – Frequência									
Frequência - Velocidade do som									
Velocidade do som - Onda sonora									
Onda mecânica - Velocidade do som									
Amplitude do som - Velocidade do som									
Amplitude do som - Comprimento de onda									
Amplitude do som - Onda sonora									
Amplitude do som - Onda mecânica									
Onda sonora – Timbre									
Comprimento de onda – Timbre									
Timbre – Velocidade do som									
Amplitude do som – Timbre									

3.2 TANC 1 (pré-teste)

Após a apresentação do instrumento, procedeu-se à primeira aplicação do TANC (TANC 1), realizada antes do início da abordagem dos conteúdos temáticos. Essa etapa teve caráter diagnóstico, com o propósito de identificar as concepções iniciais e possíveis concepções alternativas dos estudantes a respeito dos conceitos fundamentais da ondulatória.

A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível compreender o ponto de partida cognitivo da turma, o que permitiu organizar a sequência didática de forma mais coerente com as necessidades reais dos alunos, ajustando estratégias, recursos e metodologias para favorecer o aprendizado significativo desde o início da intervenção.

3.3 Bloco 1 – Oscilações Objetivos de Aprendizagem:

- Compreender o conceito de oscilação como repetição periódica em torno de um ponto de equilíbrio;
- Identificar parâmetros como período, frequência e amplitude em representações gráficas.

Conteúdos Abordados:

Neste primeiro bloco, aborda-se o Movimento Harmônico Simples (MHS), definindo a oscilação como um movimento periódico em torno de uma posição de equilíbrio. Os estudantes foram introduzidos à representação gráfica do MHS, analisando gráficos de deslocamento em função do tempo e identificando parâmetros fundamentais, como período (T), frequência (f) e amplitude.

Em seguida, foram discutidas as equações que descrevem posição, velocidade e aceleração, destacando como essas grandezas se relacionam entre si ao longo do movimento. Essa abordagem buscou promover a compreensão integrada entre representação gráfica e expressão matemática.

Instrumento Avaliativo:

Reaplicação do teste após o estudo de oscilações (TANC 2).

3.4 Bloco 2 – Ondas Mecânicas Objetivos de Aprendizagem:

- Diferenciar pulsos isolados de ondas periódicas;
- Reconhecer e classificar ondas transversais, longitudinais e eletromagnéticas;
- Aplicar os conceitos de amplitude, comprimento de onda, frequência, período e velocidade;

Conteúdos Abordados:

Inicia-se a discussão pela natureza das ondas mecânicas, utilizando exemplos visuais, como a imagem de ondas na superfície da água, para ilustrar a diferença entre um pulso isolado e uma onda periódica (sequência organizada de pulsos).

Posteriormente, realiza-se a classificação das ondas em transversais e longitudinais, diferenciando-as das ondas eletromagnéticas, que não dependem de um meio material para se propagar. Em seguida, foram apresentados os parâmetros fundamentais das ondas, como crista e vale, amplitude (A), frequência (f), comprimento de onda (λ) e velocidade de propagação (v), relacionando-os às expressões matemáticas que os descrevem.

Por fim, foram explorados os principais fenômenos ondulatórios: reflexão, refração e difração, discutindo suas implicações em contextos reais.

Instrumentos Avaliativos:

Reaplicação do teste após o estudo das ondas mecânicas (TANC 3).

3.5 Bloco 3 – Acústica Objetivos de Aprendizagem:

- Entender a natureza mecânica das ondas sonoras e sua dependência de um meio de propagação;
- Relacionar propriedades físicas do som com suas qualidades fisiológicas;
- Reconhecer fenômenos acústicos no cotidiano.

Conteúdos Abordados:

A abordagem da acústica iniciou-se destacando que o som é uma onda mecânica, cuja propagação depende da presença de um meio material. Foi enfatizado que, no vá-

cuo, o som não se propaga, já que não há partículas para transmitir a vibração. Discutiu-se ainda que, durante a propagação, as moléculas do meio oscilam localmente, sem que haja transporte de matéria junto com a onda.

Em seguida, introduziu-se o conceito de infrassom e ultrassom, relacionando-os às faixas de frequência e a aplicações tecnológicas (como exames de imagem). Também se abordou a variação da velocidade do som em diferentes meios, além de fenômenos como reflexão (responsável pelos ecos e reverberações) e refração (desvio do som ao atravessar meios com diferentes propriedades físicas).

Por fim, foram discutidas as qualidades fisiológicas do som: altura, timbre e intensidade, ressaltando como cada uma delas influencia a percepção auditiva.

Instrumentos Avaliativos:

Reaplicação do teste após o estudo da acústica (TANC 4).

3.6 Avaliação Formativa Final (TANC 5)

Ao término da sequência didática, o teste foi reaplicado uma quinta vez (TANC 5), com o objetivo de comparar a estrutura conceitual final dos alunos com a inicial, analisando a evolução cognitiva ocorrida ao longo da intervenção. Essa análise foi conduzida por meio do Escalonamento Multidimensional (EMD), permitindo visualizar padrões de organização e agrupamentos conceituais formados durante o processo de ensino-aprendizagem.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este produto educacional oferece aos professores de Física um procedimento inovador para monitorar a evolução cognitiva dos estudantes durante o ensino de ondulatória, fornecendo subsídios para práticas pedagógicas mais eficazes e para pesquisas que busquem compreender os mecanismos de construção do conhecimento em Ciências. A sequência didática está estruturada em três blocos (Oscilações, Ondas Mecânicas e Acústica), organizada de forma progressiva para facilitar a compreensão dos conceitos fundamentais de ondulatória no Ensino Médio.

A proposta foi planejada para enfrentar dificuldades comuns, como a abstração conceitual, a interpretação gráfica e o uso de modelos matemáticos, utilizando estratégias que priorizam organização lógica, linguagem clara e contextualização.

O grande diferencial deste material é a aplicação do Teste de Associação Numérica de Conceitos (TANC) em cinco momentos da sequência, permitindo acompanhar a evolução da estrutura cognitiva dos estudantes de maneira contínua e objetiva.

5 REFERÊNCIAS

AFLALO, Y.; KIMMEL, R. Spectral multidimensional scaling. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.110, n.45, p. 18052–18057, 2013.

CARROLL, J. D.; ARABIE, P. Multidimensional scaling. Measurement, judgment and decision making. *New York: Academic Press*. p. 179–250, 1998.

CHEN, C. Mapping associations. **Mapping Scientific Frontiers: The Quest for Knowledge Visualization**. London: Springer London. p. 85–141, 2013.

CLANCY, S. J. The topology of Slavic case: Semantic maps and multidimensional scaling. **Glossos**, v.7, n.1, p.1–28, 2006.

DE AQUINO, E. M. **Abordagem ausubeliana para o ensino de eletricidade, usando o jogo “em busca do prêmio nobel” NAS VERSÕES DIGITAL E CARTAS***. 2025. 217 f. Dissertação de Mestrado MNPEF – UFERSA, Mossoró, 2025.

DOS SANTOS, C. A. **Aplicação da análise multidimensional e da análise de agrupamentos hierárquicos ao mapeamento cognitivo de conceitos físicos**. 1978. 264 f. UFRGS, Porto Alegre, 1978.

DOS SANTOS, C. A.; MOREIRA, M. A. Aplicação da Análise Multidimensional ao Mapeamento Cognitivo de Conceitos Físicos. **Revista Brasileira de Física**, v. 9, p. 849–858, 1979.

DOS SANTOS, C. A.; MOREIRA, M. A. **Escalonamento multidimensional e análise de agrupamentos hierárquicos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1991.

DOS SANTOS, C.A.; MOREIRA, M. A. Análise multidimensional da associação numérica de conceitos em termodinâmica. **Ciência e Cultura**, v. 32, n. 8, 1980.

FÉLIX, H. R. T. *et al.* Efeitos de aprendizagem na associação de conceitos: um estudo com escalonamento multidimensional. **Revista do Professor de Física**, v. 8, n. 1, p. 269–

290, 2024.

FÉLIX, H. R. T. **Física, música e arduino: promovendo aprendizagem significativa no ensino de acústica**. 176 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2024.

GLINER, G. S. A Note on a Statistical Paradigm for the Evaluation of Cognitive Structure in Physics Instruction. **Applied Psychological Measurement**, v. 5, n. 4, p. 493–502, 1981.

HILGER, T. R.; MOREIRA, M. A. A study of social representations of quantum physics held by high school students through numerical and written word association tests. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, v. 8, n. 1, p. 52–61, 2013.

IRESON, G. A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena. **European Journal of Physics**, v.20, n.3, p.193, 1999.

PATRICK, H.; KAPLAN, A.; RYAN, A. M. Positive classroom motivational environments: Convergence between mastery goal structure and classroom social climate. **Journal of educational psychology**, v.103, n 2, p.367, 2011.

THRO, M. P. Relationships Between Associative and Content Structure of Physics Concepts. **Journal of Educational Psychology**, v. 70, n. 6, p. 971–978, 1978.

VILCHES, M. A. Topologia geral. Notas de aula. Rio de Janeiro: Departamento de Análise-IME-UERJ, 2012. Disponível em: <<https://portalidea.com.br/cursos/basico-em-topologia-apostila01.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.