

MODELO DIDÁTICO ANÁLOGO DO EFEITO CASIMIR COM ONDAS DE ÁGUA (MDA-EC): POSSIBILIDADES PARA O ENSINO DE MECÂNICA QUÂNTICA NA EDUCAÇÃO DE JOVENS E ADULTOS (EJA)

Analog Didactic Model of the Casimir Effect With Water Waves (MDA-EC): Possibilities for Teaching Quantum Mechanics in Youth and Adult Education (EJA)

Carlos Henrique de Abreu Maciel¹ [fisica.cham@gmail.com]

Fernando Wellysson de Alencar Sobreira^{1,2} [fernando.sobreira@ifce.edu.br]

¹ Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará,
Av. Mister Hull, s/n - Pici, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará campus Itapipoca,
Av. da Universidade, 102 - Madalena, 62500-000, Itapipoca, CE, Brasil

Recebido: 07/01/2026

Aceito: 03/04/2025

Resumo

O estudo analisa o Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir com ondas de água (MDA-EC) no ensino de Mecânica Quântica na Educação de Jovens e Adultos (EJA) de uma escola pública cearense. Fundamentado na aprendizagem significativa de Ausubel e no ensino por analogias, o trabalho articula introdução dialogada, experimentação e discussão crítica, alinhando-se à Base Nacional Comum Curricular (BNCC). A pesquisa qualitativa utilizou registros, observações de aula e questões orientadoras em uma atividade de cem minutos sobre ondas. Os resultados indicam que os participantes reconheceram a periodicidade de sistemas oscilatórios e compreenderam a aproximação das placas como efeito de diferenças no padrão de ondas e na “pressão” interna e externa. Persistiram conflitos semânticos entre amplitude, frequência e intensidade, indicando formalização inicial. Conclui-se que o MDA-EC é um recurso acessível que favorece o engajamento e a construção de significados sobre flutuações do vácuo e efeito Casimir.

Palavras-chave: Ensino de Física; Mecânica Quântica; Efeito Casimir.

Abstract

This study analyzes the Analogue Didactic Model of the Casimir Effect with water waves (MDA-EC) for teaching Quantum Mechanics in a Youth and Adult Education (EJA) class at a public school in Ceará, Brazil. Grounded in Ausubel's meaningful learning and teaching through analogies, the work integrates dialogic introduction, experimentation, and critical discussion, aligning with the Base Nacional Comum Curricular (BNCC). The qualitative research employed written records, classroom observations, and guiding questions during a 100-minute activity on waves. Results indicate that participants recognized the periodicity of oscillatory systems and understood plate approximation as

an effect of differences in wave patterns and internal/external "pressure". Semantic conflicts persisted among amplitude, frequency, and intensity, indicating initial formalization. We conclude that the MDA-EC is an accessible tool that fosters engagement and meaning-making regarding vacuum fluctuations and the Casimir effect.

Keywords: Physics Education; Quantum Mechanics; Casimir Effect.

As flutuações quânticas do vácuo, o princípio da incerteza de Heisenberg e o efeito Casimir, consequência da energia de ponto zero, constituem conceitos fundamentais da teoria quântica de campos, nos quais o vácuo se revela um estado dinâmico de atividade, com implicações mensuráveis em escalas nanométricas. Em 1948, Hendrik Casimir previu que a força atrativa entre duas placas quadradas, medindo 1 cm de lado, perfeitamente condutoras, mas neutras, paralelas entre si e separadas por uma distância da ordem de micrômetros, é dada por $F = -\pi^2 \hbar c / 240 d^4$ (Cougo-Pinto et al., 1999). Esse fenômeno resulta no confinamento de modos eletromagnéticos entre as placas, confirmado experimentalmente dez anos depois por Sparnaay (1958) e explorado em analogias hidrodinâmicas por Denardo, Puda e Larraza (2009), que demonstram atração por restrição de ondas de água. Cougo-Pinto, Farina e Tort (1999) enfatizam sua relevância na Eletrodinâmica Quântica, com aplicações em nanotecnologia, sistemas microeletromecânicos e cosmologia, enquanto estudos educacionais de Almeida (2022), Antonio (2019) e Araújo (2018) destacam desafios na transposição didática para o Ensino Médio devido à abstração conceitual.

A relevância do tema reside na defasagem curricular da Educação Básica frente aos avanços da Física Moderna. Essa lacuna é agravada pela complexidade matemática e pela escassez de modelos experimentais acessíveis, conforme apontado por Monteiro, Nardi e Bastos Filho (2009) e Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007).

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) exige o desenvolvimento de competências investigativas, modelagem e argumentação baseada em evidências (Brasil, 2018). Com a intenção de contemplar essas demandas e mitigar obstáculos epistemológicos, trabalhos recentes têm proposto diversas inovações metodológicas, a exemplo das dissertações de Cabral (2022), Carreiro (2022) e Cruz (2021), que utilizam abordagens STEAM¹, jogos e softwares de simulações. Inserindo-se nesse mesmo cenário como uma alternativa prática, o Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (MDA-EC), baseado em ondas de água, possibilita a visualização qualitativa da diferença de pressão radiativa entre as placas. Dessa forma, o recurso promove, de maneira análoga, a transição conceitual de oscilações clássicas para flutuações quânticas.

A fundamentação conceitual do trabalho baseia-se na Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel (2003), com o apoio de subsunçores clássicos (oscilador harmônico e ondas transversais) para a introdução de noções quânticas, e no ensino por analogias de Bozelli e Nardi (2007) e Ferry e Nagem (2015), que explicitam os limites entre os domínios para evitar concepções alternativas. As sequências didáticas de Guimarães e Giordan (2011) e Carvalho (2011) estruturam a progressão investigativa, enquanto Galperin (2013) orienta as etapas de assimilação mental, desde a base orientadora de ação até a verbalização externa. Estudos como os de Forato, Pietrocola e Martins (2019) e Gurgel (2010) incorporam a historiografia da ciência, o que justifica a contextualização do efeito Casimir na Eletrodinâmica Quântica e de flutuações como a polarização do vácuo e a radiação Hawking.

Este artigo analisa as contribuições do MDA-EC para a promoção da aprendizagem significativa de conceitos introdutórios de Mecânica Quântica, em especial, as flutuações do vácuo e o efeito Casimir, em uma turma da Educação de Jovens e Adultos (EJA). A análise é conduzida à luz

¹ STEAM é o acrônimo, em inglês, de *Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*. A abordagem STEAM é uma proposta educacional interdisciplinar que integra Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática em torno de projetos e resolução de problemas reais. Em vez de ensinar cada área de forma isolada, ela articula esses campos em atividades práticas, criativas e colaborativas, com forte inspiração na cultura *maker* e na aprendizagem ativa (Lemes, 2020).

da Teoria da Aprendizagem Significativa e do ensino por analogias, em constante diálogo com as competências investigativas previstas na BNCC.

Diante dessas considerações, torna-se necessário aprofundar os fundamentos teóricos que sustentam esta proposta.

Aprendizagem significativa por meio de analogias

A aprendizagem significativa, conforme proposta por David Ausubel (2003), fundamenta-se na relação não arbitrária e substantiva entre novos conteúdos e os subsunçores² presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. No ensino de Física, especialmente para conceitos abstratos da Mecânica Quântica, como o efeito Casimir, as analogias atuam como organizadores prévios que ativam esses subsunçores, promovendo a transição do conhecimento cotidiano para o abstrato (Moreira, 2011).

As analogias constituem processos cognitivos que mapeiam relações estruturais entre domínios familiares e conceitos abstratos, facilitando a assimilação significativa (Ferry & Nagem, 2015). Na Física, elas exemplificam-se pela similaridade matemática entre a Lei de Coulomb e a Lei da Gravitação Universal, permitindo transposições conceituais entre interações eletrostáticas e gravitacionais (Jorge, 1990). O uso criterioso desses recursos evita a formação de concepções alternativas, exigindo a explicitação de seus limites para alinhar-se aos princípios ausubelianos (Hoffmann & Scheid, 2007).

Ferraz e Terrazzan (2011) classificam as analogias em nove categorias, desde simples (quase metafóricas) até as estendidas (sistemáticas, com múltiplos atributos e limites explicitados). As analogias enriquecidas mapeiam correspondências explícitas entre alvo e análogo, enquanto múltiplas utilizam vários análogos para um único conceito alvo (Ferraz & Terrazzan, 2011). Essa estruturação promove diferenciação progressiva, essencial para conceitos quânticos contraintuitivos, como o confinamento de ondas (Silva & Buss, 2019).

No ensino de Física Moderna, analogias, como a de ondas de água confinadas entre placas para representar o efeito Casimir, permitem que os alunos visualizem a redução de modos oscilatórios análogos às flutuações quânticas do vácuo (Denardo et al., 2009). Essa representação clássica fomenta inferências sobre energia do vácuo, alinhando-se à BNCC ao promover a modelagem e o raciocínio científico (Brasil, 2018). Cuidados metodológicos, como mapeamento estrutural, evitam interpretações equivocadas (Vosniadou & Ortony, 2009; Gentner & Gentner, 1983).

A integração de analogias à teoria ausubeliana revela-se como uma estratégia estruturante para superar barreiras epistemológicas na Mecânica Quântica, área em que a abstração desafia estruturas cognitivas ancoradas em experiências macroscópicas (Moreira, 2011; Ausubel, 2003). Contudo, evidências empíricas indicam que analogias não sistematizadas reforçam concepções alternativas, demandando sequências didáticas que incorporem a diferenciação progressiva e a reconciliação integrativa (Hoffmann & Scheid, 2007; Ferraz & Terrazzan, 2011). Estudos como o de Denardo et al. (2009) exemplificam o potencial hidrodinâmico para o efeito Casimir, sugerindo experimentos acessíveis que ativem subsunçores ondulatórios cotidianos, fomentando a transferência conceitual. Futuras investigações devem validar tais abordagens por meio de análises longitudinais

² Na teoria ausubeliana, subsunçores são conhecimentos preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz, claros, estáveis e diferenciados, que funcionam como pontos de ancoragem relevantes e não arbitrários para a incorporação de novas ideias (Moreira, 1997).

de retenção e transferência, alinhando-se à BNCC para uma alfabetização científica crítica (Brasil, 2018). Essa perspectiva reforça a necessidade de formação docente em mapeamento analógico estrutural, transformando desafios quânticos em oportunidades de aprendizagem criativa e significativa.

Efeito Casimir em análogos de onda de água

O efeito Casimir pode ser reinterpretado, sob uma perspectiva análoga, como um fenômeno de desequilíbrio de pressão de radiação entre regiões com e sem modos de onda permitidos. Nesse sentido, a analogia com ondas de água oferece uma visualização macroscópica e didática desse sistema. A seguir, desenvolve-se um enfoque formal e técnico, tomando o experimento de Denardo, Puda e Larraza (2009) como referência para um análogo hidrodinâmico do efeito Casimir.

O efeito Casimir e a ideia de análogo ondulatório

O efeito Casimir refere-se à força atrativa entre duas placas condutoras neutras e paralelas, imersas no vácuo, decorrente da modificação do espectro de flutuações do campo eletromagnético entre elas (Casimir, 1948). Em termos formais, a introdução das placas impõe condições de contorno que discretizam os modos permitidos no interior, produzindo um desequilíbrio entre a pressão de radiação das regiões interna e externa, resultando uma força líquida que cresce à medida que a distância entre as placas diminui (Denardo et al., 2009, p. 1095).

De maneira geral, qualquer campo ondulatório que transporte momento e possua um espectro de excitações pode, em princípio, exibir um efeito análogo ao de Casimir quando corpos introduzidos no meio restringem seus modos de oscilação. Esse raciocínio motiva a construção de análogos clássicos do efeito Casimir, nos quais ondas clássicas (acústicas, em cordas, ou de superfície em líquidos) substituem as flutuações quânticas do vácuo, mas o mecanismo de força, gerado pelo desequilíbrio da pressão de radiação, permanece essencialmente o mesmo.

No análogo hidrodinâmico proposto por Denardo et al. (2009), duas placas rígidas e paralelas são parcialmente submersas em um líquido contido em uma cuba, a qual é montada sobre uma plataforma vibratória vertical. A excitação paramétrica da plataforma, por meio de ruído filtrado em uma banda de frequências, gera ondas de superfície aleatórias na região externa e, sob determinadas condições, provoca uma forte supressão da agitação entre as placas (Figura 1).

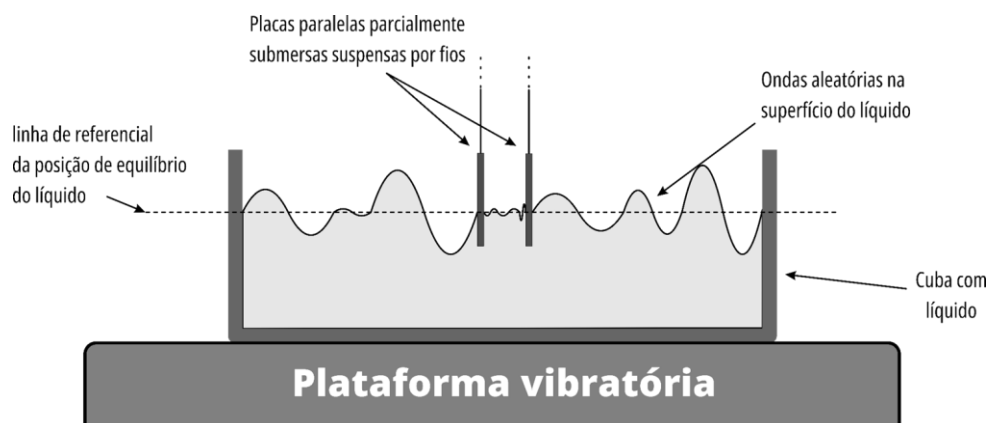


Figura 1: Diagrama Conceitual do Análogo Experimental do Efeito Casimir com ondas de água.

Quando a separação entre as placas é suficientemente pequena, o campo de ondas de superfície na região entre elas apresenta amplitude significativamente reduzida. Desse modo, a

dinâmica ondulatória nesse espaço pode ser tratada, em uma primeira aproximação, como desprezível em comparação à região externa (Denardo et al., 2009, p. 1095).

As ondas na superfície de um líquido podem ser classificadas, de forma simplificada, em ondas de gravidade³ (longos comprimentos de onda) e ondas capilares (curtos comprimentos de onda), havendo uma faixa intermediária de caráter misto, denominada gravidade-capilar (Denardo et al., 2009, p. 1097). Essa analogia pode ser organizada em três eixos conceituais principais, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: *Relações Conceituais entre o Efeito Casimir e seu Análogo de Ondas de Água.*

Eixo Conceitual	Efeito Casimir	Análogo de ondas de água
Origem da energia	Flutuações de ponto zero do campo eletromagnético (vácuo quântico).	Ondas clássicas de superfície, excitadas por uma plataforma vibratória em banda de frequência.
Mecanismo da força	Alteração do espectro de modos permitidos entre as placas, levando a um desequilíbrio de pressão de radiação entre interior e exterior.	Supressão de modos de onda entre as placas por geometria e dispersão, resultando em menor fluxo de momento no interior e consequente pressão externa dominante.
Dependência em parâmetros	Força atrativa $\propto 1/d^4$ entre placas condutoras ideais, com divergência regularizada do espectro de alta frequência.	Força aproximadamente proporcional à energia média das ondas, e, no regime de placas muito próximas comparadas ao comprimento de onda relevante, aproximadamente independente de d , já que o interior é quase desprovido de ondas.

Apesar dessas diferenças formais, a estrutura de raciocínio, a força compreendida como o desbalançamento de pressão de radiação em um meio ondulatório é diretamente análoga àquela utilizada para interpretar o efeito Casimir em termos de pressão de vácuo modificada por condições de contorno.

Do ponto de vista analógico e didático, o sistema de ondas de água oferece um modelo tangível para discutir mecanismos que, no efeito Casimir original, são abstratos e ligados a campos quânticos. A observação direta de três elementos: a geração de ondas, a forte redução da agitação entre as placas e a atração visível entre elas, permite estabelecer um mapeamento qualitativo entre: (a) “flutuações do vácuo quântico” $\leftrightarrow$ campo de ondas de superfície excitado classicamente; (b) “modos de vácuo excluídos pelas placas” $\leftrightarrow$ modos de ondas de superfície que não cabem devido à geometria das placas; e (c) “pressão de vácuo” $\leftrightarrow$ pressão de radiação de ondas de gravidade-capilar.

³ Ondas de superfície gravitacionais são como oscilações que se propagam ao longo da interface livre entre dois meios fluidos (tipicamente ar-água), em um sistema de profundidade aproximadamente constante, nas quais a gravidade e o empuxo atuam como forças restauradoras predominantes responsáveis por restabelecer o estado de equilíbrio após uma perturbação de pequena amplitude na superfície (Fernandes & Alves, 2009).

Esse tipo de analogia facilita a construção de significados em ambientes de aprendizagem avançada, permitindo que estudantes visualizem, em escala macroscópica e clássica, uma estrutura de raciocínio que posteriormente será transposta para o domínio quântico. Além disso, a possibilidade de discutir a dependência de parâmetros (amplitude, banda de frequências, propriedades do fluido, geometria) amplia o leque de investigações experimentais que podem ser conduzidas em contexto de laboratório didático ou em projetos de iniciação científica.

O modelo didático análogo do efeito Casimir (ondas de água) – MDA-EC

O MDA-EC é composto por três subconjuntos estruturais: uma plataforma vibratória, um conjunto de suporte e confinamento do bquer e um suporte superior de suspensão das placas (Figura 2). Esses elementos operam de forma integrada para produzir ondas mecânicas na superfície da água e restringir a propagação dessas ondas na região entre as placas, gerando uma força de aproximação análoga àquela observada no efeito Casimir entre placas condutoras no vácuo.

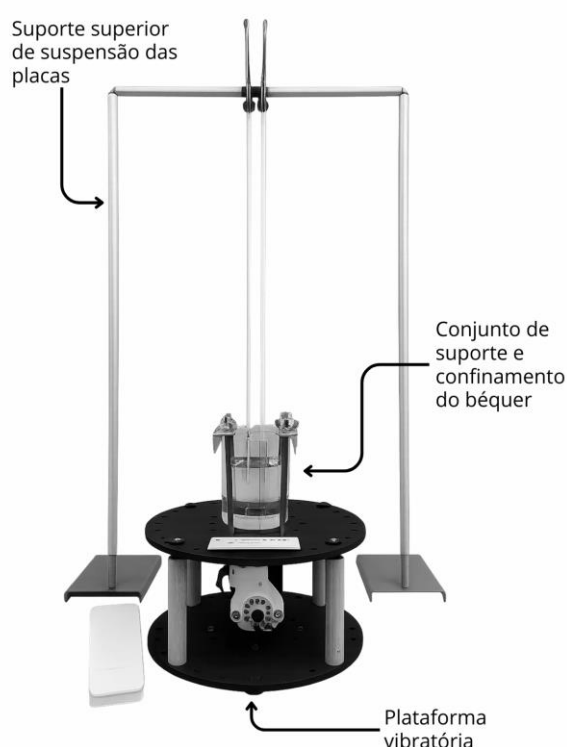


Figura 2: *Modelo Didático Análogo do Efeito Casimir (Ondas de Água) – MDA-EC.*

A base do sistema é formada por dois discos de madeira, um superior e outro inferior, montados como uma estrutura de apoio sobre quatro pilares de madeira. Entre esses discos, são alocadas molas e peças de borracha, de modo que o disco superior possa vibrar verticalmente, sem atrito excessivo e com estabilidade durante o funcionamento.

Sob o disco superior, fixa-se o motor de uma máquina de costura doméstica, ao qual se acopla uma peça desbalanceada que atua como massa excêntrica. Quando o motor é acionado, essa massa gera vibrações que se transmitem ao disco superior e, conseqüentemente, ao bquer posicionado sobre ele.

O béquer apoia-se sobre uma base de EVA, que o protege e auxilia no amortecimento de impactos, e   mantido imóvel por duas barras de alumínio apoiadas em sua borda. Essas barras são fixadas por porcas do tipo borboleta, permitindo prender o recipiente com firmeza, porém sem aplicar tensão excessiva que possa danificar o vidro.

Acima desse conjunto, monta-se uma estrutura em formato de pórtico (semelhante a uma “trave”), utilizando hastes metálicas de laboratório, na qual ficam suspensas duas pequenas placas de PVC. As placas são fixadas por fios, comportando-se como pêndulos simples lado a lado, de modo que permaneçam verticais e posicionadas no interior do béquer, com parte de sua área submersa quando o recipiente cont m  gua.

Para o início do experimento, as placas devem ser alinhadas ao centro do béquer, garantindo a simetria do sistema e minimizando os efeitos de borda. A distância inicial entre elas   ajustada para cerca de 2 cm, assegurando que o espaço de confinamento seja da mesma ordem de grandeza do comprimento das ondas de superfície que serão geradas.

Em seguida, o béquer   preenchido com água até que aproximadamente um terço da altura das placas fique submerso. Esse nível garante que elas interajam diretamente com a região de maior amplitude das ondas gravitacionais de superfície, evitando o transbordamento do líquido durante a vibra o.

Com o sistema montado, o motor   conectado   rede elétrica e controlado por um pedal, o que permite uma varia o contínua da intensidade vibratória. O acionamento deve ocorrer de forma gradual, aumentando-se progressivamente a velocidade de rota o do motor. Isso amplifica a acelera o vertical da plataforma e, conseqüentemente, a amplitude das ondas na superfície da água.

  medida que a excita o aumenta, ondas aleatórias ou quase per dicas estabelecem-se na superfície do líquido, propagando-se em todas as dire o es e interagindo com as placas submersas. Ao atingir um intervalo de intensidade adequado, torna-se observável a aproxima o espontânea das placas, que se deslocam uma em dire o   outra em resposta ao desequilíbrio de forças gerado pelas ondas.

Pr nc pio de funcionamento físico: gera o e confinamento de ondas

O movimento vibratório da plataforma induz oscila o es verticais no béquer, o que, por excita o paramétrica e acoplamento com a gravidade, excita ondas de superfície na  gua. Essas ondas transportam energia e momento linear, incidindo sobre as superfícies das placas tanto em suas faces externas quanto nas internas. Em determinadas faixas de vibra o da plataforma, a geometria do sistema (largura do recipiente, tamanho das placas e distância entre elas) favorece um maior número de modos de oscila o da água na região externa e uma forte supressão de modos no espaço entre as placas. Assim, a energia ondulatória média na região confinada torna-se significativamente menor do que no restante da superfície, estabelecendo uma assimetria no fluxo de momento.

Desequilíbrio de pressão de radia o e aproxima o das placas

Como as ondas de superfície transportam momento, a incidência dessas ondas sobre uma placa exerce uma pressão de radia o, equivalente   taxa de transferência de momento por unidade de  rea. Quando há um campo de ondas substancialmente mais intenso na região externa ao par de placas do que na interna, a pressão exercida nas faces externas supera aquela atuante nas faces internas.

Esse desequilíbrio de pressão resulta em uma força resultante atrativa entre as placas, que passam a se deslocar uma em direção à outra até atingirem um novo estado de equilíbrio dinâmico, determinado pela ação da força ondulatória (ou pela combinação entre a força ondulatória e a força restauradora gravitacional). Sob o ponto de vista analógico, essa dinâmica traduz o mesmo esquema conceitual do efeito Casimir: duas superfícies delimitam uma região na qual os modos de oscilação de um campo (no caso quântico, o campo eletromagnético no vácuo) são restritos, gerando uma diferença de pressão entre as regiões interna e externa.

Correspondência com o efeito Casimir quântico

No efeito Casimir original, duas placas condutoras neutras, colocadas no vácuo, modificam o espectro de flutuações do campo eletromagnético entre elas. Isso reduz o número de modos permitidos em comparação à região externa, gerando uma força atrativa que depende fortemente da distância entre as placas. No modelo didático, o “campo” é constituído por ondas mecânicas de superfície na água, geradas de modo clássico pela vibração da plataforma. Contudo, o mecanismo de aproximação, impulsionado pelo desequilíbrio da pressão de radiação devido ao confinamento de modos, é estruturalmente análogo.

Assim, o modelo permite visualizar, em escala macroscópica e sob condições de fácil manipulação, um fenômeno que, no contexto quântico, envolve flutuações do vácuo e campos quantizados. Dessa forma, ele se consolida como um recurso pedagógico robusto para discutir conceitos de ondas, energia e momento, bem como as analogias entre a Física Clássica e a Física Moderna.

Procedimentos metodológicos

A metodologia de aplicação do MDA-EC organiza-se em etapas que articulam introdução conceitual, a experimentação guiada e a análise crítica, mediadas por uma abordagem dialógica e investigativa. O foco central é promover a compreensão qualitativa do efeito Casimir por meio de um modelo análogo baseado em ondas de água, ao explorar a restrição de modos ondulatórios em regiões confinadas.

Objetivos da aplicação do MDA-EC

A aplicação do MDA-EC objetiva investigar a atração entre duas placas parcialmente submersas em um líquido em vibração, atuando como um recurso para discutir o princípio de restrição de modos, o qual fundamenta o efeito Casimir. De modo articulado, estabelecem-se três eixos de objetivos específicos: a compreensão conceitual, a aplicação prática e a integração interdisciplinar.

No eixo conceitual, pretende-se que os estudantes identifiquem as modificações no padrão de ondas entre as placas e compreendam, por analogia, como a limitação de modos ondulatórios em regiões confinadas pode gerar forças de interação. No eixo prático, busca-se favorecer a observação sistemática do movimento das placas e a formulação de hipóteses sobre a origem dessa atração. Por sua vez, no eixo interdisciplinar, a proposta estimula conexões entre a Física Ondulatória, a Teoria Quântica de Campos e as reflexões epistemológicas sobre o uso de modelos análogos.

Referenciais curriculares e fundamentos didáticos

A metodologia ancora-se nas competências e habilidades propostas pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC) para o Ensino Médio, especialmente na área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias. Nesse contexto, destacam-se a compreensão das ciências como construções humanas, o uso de linguagens próprias da Física para interpretar fenômenos e a habilidade de

relacionar modelos científicos a situações do cotidiano, reconhecendo os limites e as possibilidades de sua aplicação.

Do ponto de vista didático, o MDA-EC é mobilizado como um análogo físico: um sistema clássico que compartilha uma estrutura formal semelhante à de um fenômeno quântico. Isso permite a abordagem de conceitos de alta abstração por meio de experiências concretas e visualmente acessíveis. Essa escolha metodológica valoriza a mediação por analogias e a experimentação como estratégias para superar as barreiras e as dificuldades típicas no ensino de Física Moderna.

Etapas de aplicação em sala de aula

Introdução dialogada

A primeira etapa consiste em uma introdução dialogada, com duração aproximada de 10 minutos. Nela, o professor retoma com a turma a existência de forças de interação não gravitacionais e não eletrostáticas em escalas microscópicas, o que possibilita a introdução do efeito Casimir como consequência das flutuações do vácuo quântico. Nesse momento, apresenta-se o conceito de análogo físico e explicita-se que o experimento com ondas de água não reproduz o fenômeno quântico em si, mas ilustra qualitativamente o princípio de restrição de modos em domínios confinados.

A exposição é conduzida em formato dialógico, por meio de perguntas problematizadoras que convidam os estudantes a relacionar o novo conteúdo aos conhecimentos prévios sobre ondas, vibrações, forças e interações entre superfícies. Esse procedimento funciona como um organizador prévio, ativando os subsunçores necessários para a etapa experimental subsequente.

Roteiro experimental com o MDA-EC

A segunda etapa corresponde à execução do roteiro experimental, com duração aproximada de 20 minutos. O procedimento em sala organiza-se em três submomentos:

1. Preparação: o béquer é preenchido com água até submergir cerca de um terço da altura das placas. Estas são ajustadas paralelamente no centro do recipiente com pequena separação entre si.
2. Ativação da vibração: o motor é acionado. A rotação inicial é baixa, sendo aumentada gradualmente até que as ondas de superfície geradas promovam a aproximação visível entre as placas.
3. Observações dirigidas: os estudantes são orientados a observar a formação e a propagação das ondas. Eles devem comparar a intensidade e o padrão entre as regiões interna e externa às placas, além de registrar a ocorrência e a reprodutibilidade da aproximação.

Durante essa etapa, o professor atua como mediador, incentivando a descrição em linguagem própria da Física (amplitude, frequência, padrão de ondas, região confinada). Além disso, estimula os alunos a relacionarem diretamente o comportamento observado à ideia de pressão de radiação e ao desequilíbrio de modos ondulatórios entre as regiões.

Estratégias de análise e discussão dos dados

Concluída a experimentação, a metodologia prevê um momento de análise crítica e interpretação dos resultados, norteado por questões orientadoras que buscam articular observações empíricas e interpretações conceituais. As perguntas propõem que os estudantes descrevam a

movimentação das placas antes e após a vibração, comparem a oscilação das ondas nas regiões interna e externa às placas e analisem como a ativação da superfície vibratória altera o comportamento do sistema como um todo.

Nessa etapa, a discussão é conduzida de forma a explicitar a analogia com o efeito Casimir: (a) a região entre as placas, na qual o padrão de ondas é visivelmente modificado; (b) a diferença de intensidade das ondas entre as regiões interna e externa; e (c) a força resultante de aproximação como efeito de uma distribuição desigual de modos ondulatórios.

Além disso, discutem-se as semelhanças e as diferenças entre o análogo clássico (ondas de água excitadas por um motor) e o fenômeno quântico original (flutuações do vácuo e campos quantizados), com ênfase nos limites e nos alcances pedagógicos do uso de analogias na Física Moderna. Essa discussão reforça a compreensão de que os modelos didáticos não são cópias da realidade, mas ferramentas para pensar e representar fenômenos complexos.

Avaliação da aprendizagem e do engajamento

A metodologia de aplicação do MDA-EC adota uma avaliação formativa, centrada nos seguintes indicadores: a participação, a qualidade das observações, a capacidade de formular hipóteses e o uso progressivamente mais preciso da linguagem científica. Os registros escritos das respostas às questões orientadoras, os relatos orais durante a discussão e o envolvimento no manuseio do aparato experimental compõem o conjunto de evidências para a análise do percurso de aprendizagem dos estudantes.

No contexto da EJA, essa avaliação considera, ainda, a evolução atitudinal diante de conteúdos abstratos. Analisa-se em que medida a atividade experimental contribui para reduzir a apatia inicial, aumentar o interesse e favorecer uma postura mais ativa na construção de explicações para fenômenos físicos, em consonância com as competências gerais e específicas preconizadas pela BNCC.

Resultados e discussões

Descrição do espaço e período da pesquisa

A presente intervenção pedagógica foi desenvolvida na Escola de Ensino Médio em Tempo Integral Rotary Club São Miguel, instituição integrante da rede pública estadual do Ceará. Localizada no bairro São Miguel, região urbana periférica do município de Caucaia, que compõe a Região Metropolitana de Fortaleza, essa unidade escolar insere-se em um contexto geográfico marcado por dinâmicas socioculturais típicas das periferias metropolitanas. Nesse cenário, entrelaçam-se desafios socioeconômicos estruturais e demandas educacionais intensas, que repercutem diretamente no processo de ensino-aprendizagem na modalidade de Educação de Jovens e Adultos (EJA).

A atividade experimental ocorreu no primeiro bimestre letivo de 2025, durante um único encontro de cem minutos da disciplina de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, na modalidade EJA Mais Qualificação Profissional (EJA+QP)⁴. Essa experiência inseriu-se em um contexto curricular dedicado ao estudo de ondas, em conformidade com o planejamento anual da disciplina.

⁴ A EJA + Qualificação Profissional visa à reorganização da oferta da modalidade EJA, mediante a adoção de alternativas metodológicas que harmonizem os tempos pedagógicos e os espaços de aprendizagem com os interesses, as necessidades e os conhecimentos dos indivíduos nela matriculados, fomentando, assim, perspectivas de qualificação profissional (Governo do Estado do Ceará, 2017).

A intervenção foi realizada no turno da noite, em uma sala de aula com área aproximada de 49 metros quadrados, climatizada, bem iluminada e equipada com quadro branco e múltiplos pontos de energia elétrica. A configuração mobiliária compreendia carteiras individuais (cadeira e mesa) para cada aluno, além de uma mesa e cadeira exclusivas para o professor. Isso permitiu o posicionamento central do MDA-EC sobre duas mesas de alunos, otimizando a visualização periférica das equipes dispostas em formato semicircular. Essa disposição espacial, com distância máxima de observação inferior a dois metros, assegurou o acompanhamento coletivo detalhado dos fenômenos ondulatórios sem interferências visuais. A autonomia docente, incentivada pela gestão escolar, manifestou-se em suporte irrestrito à realização da atividade: a coordenação pedagógica colaborou no planejamento por meio do fornecimento de materiais disponíveis e da autorização de adaptações elétricas seguras (com o uso de extensões para a ligação da plataforma vibratória), evidenciando a abertura institucional à proposta interventiva centrada no MDA-EC.

Descrição do grupo participante da pesquisa

A atividade experimental proposta foi desenvolvida com uma turma de EJA+QP marcada por forte heterogeneidade etária, sociocultural e acadêmica. Esse contexto condicionou tanto os desafios quanto as potencialidades de aprendizagem associadas ao trabalho com conteúdos de Física Moderna e com atividades experimentais interativas.

A turma era composta por 45 estudantes com idades entre 18 e 61 anos, reunindo jovens recém-ingressos na vida adulta e indivíduos em etapas mais avançadas do ciclo vital. Muitos desses estudantes retornavam à escola após trajetórias educacionais interrompidas, o que evidencia processos de retomada tardia da escolarização básica e de reconstrução de projetos de vida mediados pela educação formal.

Essa amplitude etária gera uma convivência intergeracional que impacta a dinâmica da sala de aula, pois articula experiências de juventude, trabalho e maturidade, além de produzir diferentes expectativas em relação ao estudo e ao significado atribuído ao retorno à escola.

Do ponto de vista ocupacional, observou-se uma turma marcada por múltiplas inserções no mundo do trabalho e do cuidado: uma parcela estava empregada formalmente, outra atuava como autônoma e parte dedicava-se ao trabalho doméstico, além da presença de estudantes desempregados e de um grupo exclusivamente voltado aos estudos. Esse cenário indicou que, apesar das demandas da vida adulta e das responsabilidades familiares e laborais, a escola é percebida como um espaço concreto de reconfiguração de percursos educacionais e de ampliação de possibilidades futuras.

Em termos de desempenho acadêmico, a turma apresentava dificuldades significativas em leitura, escrita e elaboração de raciocínios abstratos, especialmente quando confrontada com conteúdos de maior densidade conceitual, como os tópicos de Física Moderna e Contemporânea. Essas fragilidades traduziam-se em desmotivação e apatia diante de práticas pedagógicas tradicionais, baseadas na exposição verbal e no uso predominante de textos escritos. Isso evidenciava uma clara necessidade de utilizar recursos pedagógicos capazes de transmitir o conhecimento sobre tópicos de Física Moderna de maneira mais atrativa.

Apesar disso, havia um grupo menor de estudantes que se mostrava mais receptivo, curioso e engajado, sobretudo quando as atividades se afastavam do formato expositivo e se aproximavam de situações concretas, experimentais e vinculadas ao cotidiano dos participantes. Esse núcleo mais ativo

funcionava como catalisador do envolvimento coletivo quando encontrava propostas metodológicas que fizessem sentido em termos práticos e simbólicos.

Do ponto de vista atitudinal, a turma manifestava, inicialmente, resistência e distanciamento em relação a conteúdos científicos mais abstratos, o que incluía, de maneira destacada, a Física Moderna. Contudo, quando envolvida em atividades experimentais e interativas, como a montagem e o uso do MDA-EC, observou-se um aumento expressivo do interesse, da participação e da curiosidade. Esse engajamento tornou-se particularmente evidente no manuseio dos materiais e do aparato experimental, momento em que até os estudantes usualmente mais apáticos passaram a se envolver, formular perguntas e interagir de maneira mais ativa com os fenômenos representados. A experiência prática atua, assim, como um gatilho para a mobilização cognitiva e emocional, ao favorecer a construção de significados em torno de conceitos que, em outras abordagens, seriam percebidos como excessivamente abstratos.

A experimentação

Os resultados obtidos com o uso do MDA-EC demonstram que os estudantes foram capazes de reconhecer, descrever e buscar explicações para a aproximação das placas em um meio vibrante, o que possibilitou a elaboração de uma narrativa coerente sobre o fenômeno a partir de suas próprias observações. As produções escritas e os registros em sala evidenciam tanto a apreensão do núcleo fenomenológico do modelo análogo quanto a presença de conflitos semânticos típicos dos estágios iniciais da aprendizagem de conceitos ondulatórios.

Observações iniciais sobre o MDA-EC

A intervenção teve início com os estudantes organizados em equipes, posicionados ao redor do MDA-EC e orientados a observar atentamente o sistema, desde o acionamento em baixa intensidade até níveis mais elevados de vibração da plataforma. À medida que a excitação aumentava, o movimento de aproximação das placas tornava-se visível. Esse fenômeno serviu de foco para as observações e para as respostas às questões orientadoras propostas na sequência.

As equipes responderam a um questionário composto por cinco perguntas sobre o fenômeno observado, expressando suas impressões em linguagem própria. Esses registros foram mantidos em sua grafia original, uma vez que constituem evidências diretas do processo de significação construído pelos discentes diante do modelo analógico.

Reconhecimento da aproximação das placas e do campo de ondas

De modo convergente, os grupos registraram que, quando a água era colocada em vibração, em suas palavras, “as placas se juntam” ou que “a pressão da água faz as placas ficarem juntas”, indicando que todos identificaram qualitativamente a aproximação como um efeito associado à excitação do meio. Essa convergência sugere que o núcleo fenomenológico do análogo foi apreendido: o acionamento da plataforma produz um padrão de ondas que se distribui de forma desigual nas regiões interna e externa às placas, o que gera uma força de atração.

Na literatura, esse comportamento é interpretado como consequência de um desequilíbrio da pressão de radiação entre as regiões interna e externa. Isso ocorre uma vez que, entre as placas, determinados modos de oscilação são suprimidos, enquanto o campo de ondas permanece aproximadamente homogêneo fora delas. Ao relacionarem espontaneamente as ideias de “pressão” ou “força” à aproximação das placas, os estudantes mobilizaram subsunçores cotidianos, os quais funcionam como pontos de ancoragem para a compreensão posterior da noção de pressão de radiação.

Percepções sobre intensidade, amplitude e frequência

As respostas referentes às diferenças entre as oscilações nas regiões interna e externa às placas revelaram percepções variadas: alguns grupos relataram que “dentro oscila menos” ou que a região interna parecia “mais calma”, enquanto outros afirmaram que “entre as placas é mais rápido” ou “oscila mais forte”. Essa heterogeneidade é compatível com a natureza do sistema. Nesse arranjo experimental, pequenas variações no espaçamento entre as placas, na profundidade de imersão e no nível de excitação podem levar tanto à supressão de modos quanto à formação de padrões quase-estacionários localmente mais intensos.

Em vários registros, observou-se que os termos “intensidade”, “frequência” e “oscilação” eram utilizados como sinônimos. Como exemplos, destacam-se as falas: “fora é mais intensa”, “a frequência externa é maior” e “a oscilação entre as placas é maior”. Esses usos indicam que os estudantes recorreram a expressões pré-formais (“mais forte”, “mais rápido”) para se referirem a grandezas diferentes, o que evidencia um estágio intermediário na construção de significado para a amplitude, a frequência e a intensidade. Tal cenário aponta para a necessidade de intervenções futuras que explicitem essas distinções conceituais, com vistas à diferenciação progressiva do vocabulário científico.

Cadeia causal qualitativa e subsunções imagéticos

Os registros demonstram que os estudantes também perceberam o papel do controle de excitação da plataforma na modificação do regime de ondas. Expressões como “as ondas aumentam” ou “fica como se a água estivesse fervendo” foram empregadas para descrever o aumento da vibração. Tais falas atuam como metáforas que aproximam o fenômeno de experiências cotidianas, auxiliando na organização de uma cadeia causal qualitativa.

Essa cadeia pode ser sintetizada, a partir das narrativas dos grupos, da seguinte forma: acionamento do motor → aumento da “agitação” da água → alteração no comportamento das ondas → aproximação das placas. Em algumas respostas, mencionou-se ainda o retorno das placas à posição inicial quando a vibração cessava. Esse fato indica que os estudantes identificavam intuitivamente a presença de forças restauradoras (peso, empuxo e tração nos fios de suspensão) atuando no sistema, mesmo sem uma formalização explícita. Essa intuição enriquece a leitura fenomenológica e estabelece uma ponte com conteúdos clássicos de equilíbrio e dinâmica.

Implicações para o uso do MDA-EC em contextos de ensino

Do ponto de vista da construção de significados, os resultados indicam que o MDA-EC favorece a emergência de explicações que conectam observações empíricas a noções de pressão, agitação do meio e modificação dos padrões de ondas. Esse cenário oferece um terreno fértil para introduzir, em etapas posteriores, a ideia de pressão de radiação e sua relação com o efeito Casimir.

Ao mesmo tempo, a confusão entre amplitude, frequência e intensidade, bem como o uso indistinto desses termos, revelam um campo de trabalho conceitual importante para investigações futuras e para o aperfeiçoamento de propostas didáticas baseadas no MDA-EC. Ainda que não tenha havido formalização quantitativa nessa experiência, as evidências qualitativas sugerem que os estudantes alcançaram uma compreensão inicial robusta do fenômeno central: a aproximação das placas mediada por diferenças no campo de ondas. Essa percepção constitui uma base narrativa e conceitual sólida para aprofundamentos teóricos subsequentes.

Considerações finais

As análises apresentadas indicam que o MDA-EC constitui um recurso pedagógico viável para introduzir, no contexto da escola pública e da modalidade EJA, noções de osciladores, ondas e flutuações do vácuo articuladas a práticas investigativas. A proposta mostrou potencial para aproximar conceitos de fronteira da Física Moderna dos estudantes com histórico de trajetórias escolares interrompidas, mobilizando tanto subsunçores cotidianos quanto estruturas conceituais mais abstratas.

Os dados qualitativos apontam avanços conceituais consistentes ao longo das atividades com o MDA-EC. Os estudantes reconheceram o caráter periódico de sistemas oscilatórios, estabeleceram qualitativamente a relação entre o comprimento do pêndulo e o tempo de oscilação, compreenderam a amplificação sonora por ressonância e diferenciaram, na analogia do plano inclinado, a incerteza de medida de uma incerteza associada à própria natureza de determinados fenômenos.

No análogo do efeito Casimir, os registros evidenciam que os participantes descreveram a aproximação das placas como resultado de diferenças no padrão de ondas associadas a variações de pressão entre as regiões interna e externa. Isso gerou uma cadeia causal qualitativa que relaciona a excitação do meio, a modificação do campo de ondas e a força de atração. Persistem confusões terminológicas entre amplitude, frequência e intensidade, mas estas se mostram compatíveis com um estágio inicial de formalização e não impedem a construção de um núcleo de significados funcional para leituras posteriores mais refinadas.

Do ponto de vista metodológico, o MDA-EC integrou a introdução dialogada, a experimentação guiada e a análise crítica, em consonância com a perspectiva de aprendizagem significativa de Ausubel e com o uso criterioso de analogias. A atividade com as ondas de água e a aproximação das placas ativou subsunçores clássicos (vibração, oscilação, pressão, “fervura” da água), os quais foram mobilizados pelos estudantes em suas explicações, indicando uma ancoragem não arbitrária dos novos significados.

Em termos curriculares, a experiência alinhou-se às competências de Ciências da Natureza previstas na BNCC, ao promover a observação orientada, a formulação de hipóteses, o uso da linguagem científica e a comunicação de resultados em um contexto de investigação escolar. O fato de o aparato ser de baixo custo, construído com materiais acessíveis e operado em sala regular, reforça sua aderência às condições típicas da rede pública e responde às lacunas apontadas na literatura quanto à escassez de modelos experimentais para o ensino de Física Moderna.

Os achados reforçam que conteúdos como as flutuações do vácuo e o efeito Casimir podem ser introduzidos de forma gradual, rigorosa e acessível no Ensino Médio quando mediados por analogias bem explicitadas e por experiências simples que tornem visível a estrutura de raciocínio subjacente. No caso do MDA-EC, a observação macroscópica de três elementos, a geração de ondas, a supressão da agitação entre as placas e a atração visível, oferece um mapeamento qualitativo robusto entre o análogo clássico e o fenômeno quântico, o que favorece a transição de oscilações clássicas para flutuações do vácuo em termos conceituais.

No contexto da EJA, a experiência mostra que o engajamento com temas de Física Moderna não depende de aparatos sofisticados, mas de propostas que dialoguem com a realidade dos estudantes, valorizem suas experiências prévias e ofereçam espaço para a construção coletiva de modelos explicativos. A cultura experimental, o trabalho em equipe e a valorização da fala dos participantes mostram-se eficazes catalisadores de curiosidade e de participação em turmas inicialmente marcadas por apatia diante de conteúdos científicos abstratos.

Considerando o conjunto de evidências, conclui-se que o MDA-EC configura-se como um instrumento didático promissor para o ensino de Mecânica Quântica na Educação Básica, especialmente em contextos socialmente vulneráveis, ao transformar desafios de abstração em oportunidades de investigação, diálogo e construção significativa do conhecimento científico.

Referências bibliográficas

- Almeida, F. S. (2022). *Sequência de ensino aprendizagem para ensinar os postulados da Mecânica Quântica no Ensino Médio* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense]. Repositório UFF. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/25934>
- Antônio, A. P. (2019). *Proposta de UEPS para inserção do conteúdo de Física Quântica através de uma atividade experimental* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense]. Repositório UFF. <https://app.uff.br/riuff/handle/1/14935>
- Araújo, C. E. F. (2018). *Aplicação de jogos no ensino de Física Moderna e Contemporânea: uma alternativa didática potencializando o aprendizado no ensino médio* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará]. Repositório Institucional UFC. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/36254>
- Ausubel, D. P. (2003). *Aquisição e retenção de conhecimentos: Uma perspectiva cognitiva* (L. Teopisto, Trad.). Plátano Editora.
- Bozelli, F. C., & Nardi, R. (26 de novembro e 2 de dezembro de 2007). *Analogias no ensino de Física: alguns exemplos em mecânica* [Trabalho Apresentado]. VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. <http://www.fep.if.usp.br/~profis/arquivos/vienpec/CR2/p615.pdf>
- Cabral, R. C. (2022). *Energia elétrica sustentável e Mecânica Quântica: uma proposta didática para o ensino médio com o uso da aprendizagem baseada em projetos e enfoque STEAM* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará]. Plataforma Sucupira. https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=12212256
- Carreiro, A. A. K. d. A. (2022). *Ensino de Computação Quântica na Nuvem* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Norte do Tocantins]. Plataforma Sucupira. https://sucupira-legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=13655660
- Carvalho, A. M. P. (2011). Ensino e aprendizagem de Ciências: referenciais teóricos e dados empíricos das sequências de ensino investigativas - (SEI). Em MD Longhini (org.), *O uno e o diverso na educação* (1ª Ed., p. 253-266). EDUFU.
- Casimir, H. B. G. (1948). On the attraction between two perfectly conducting plates. *Indag. Math.*, 10(4), 793-795.
- Cougo-Pinto, M. V., Farina, C., & Tort, A. (março de 2000). O Efeito Casimir. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(1), 122-132. https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_122.pdf
- Cruz, U. M. (2021). *Jogo Ludophysis para Explorar o Efeito Fotoelétrico no Ensino Médio por Meio de Uma UEPS* [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Cariri]. Plataforma Sucupira. <https://sucupira->

legado.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=11441005

Darroz, L. M. (28 de maio de 2018). Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel. *Revista Espaço Pedagógico*, 25(2), 576-580. <https://doi.org/10.5335/rep.v25i2.8180>

Denardo, B. C., Puda, J. J., & Larraza, A. (1 de dezembro de 2009). A water wave analog of the Casimir effect. *American Journal of Physics*, 77, 1095-1101. <https://doi.org/10.1119/1.3211416>

Fernandes, A. S., & Alves, G. M. (8 de outubro de 2009). Ondas superficiais de gravidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(2), 2306.1-2306.6. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000200007>

Ferraz, D. F., & Terrazzan, E. A. (28 de novembro de 2011). O uso de analogias como recurso didático por professores de biologia no ensino médio. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, 1(3). <https://periodicos.ufmg.br/index.php/rbpec/article/view/4164>

Ferry, A. S., & Nagem, R. L. (maio de 2015). Modelo de compreensão do raciocínio analógico por duas vias: uma contribuição para o ensino e a aprendizagem em ciências com recursos às analogias. *Latin American Journal of Science Education*, 2(1), 1-22. http://www.lajse.org/may15/12062_Ferry.pdf

Forato, T. C. M., Pietrocola, M., & Martins, R. A. (1 de janeiro de 2019). Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 28(1), 27-59. <https://doi.org/10.5007/2175-7941.2011v28n1p27>

Galperin, P. Y. (2013). Acerca da linguagem interna. *Revista AMAzônica*, 11(2), 451-461. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4730787>

Gentner, D., & Gentner, D. R. (1983). Flowing Waters or Teeming Crowds: Mental Models of Electricity. Em D. Gentner & A. L. Stevens (org.), *Mental Models* (p. 99-130). Taylor & Francis Group.

Secretaria da Educação. (16 de agosto de 2017). *EJA+ Qualificação Profissional*. Governo do Estado do Ceará. <https://www.seduc.ce.gov.br/2017/08/16/eja-qualificacao-profissional/>

Guimarães, Y. A. F., & Giordan, M. (5 a 9 de dezembro de 2011). *Instrumento para construção e validação de sequências didáticas em um curso a distância de formação continuada de professores* [Trabalho completo]. VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Campinas, São Paulo, Brasil. <http://www.nutes.ufjf.br/abrapec/viiienpec/resumos/R0875-2.pdf>

Gurgel, I. (2010). *Elementos de uma poética da ciência: fundamentos teóricos e implicações para o ensino de ciências* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital USP. <https://doi.org/10.11606/T.48.2010.tde-09092010-105921>

Hoffmann, M. B., & Scheid, N. M. J. (junho de 2007). Analogias como ferramenta didática no ensino de Biologia. *Revista Ensaio Pesquisa em Educação*, 9(1), 21-37. <https://doi.org/10.1590/1983-21172007090103>

Jorge, W. (dezembro de 1990). Analogias no ensino de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 7(3), 196-202. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/7688/15169>

Lemes, D. (17 de novembro de 2020). Educação STEAM: o que é, para que serve e como usar. *Jornal PUC-SP*. <https://j.pucsp.br/artigo/educacao-steam-o-que-e-para-que-serve-e-como-usar>

Monteiro, M. A., Nardi, R., & Bastos Filho, J. B. (2009). Dificuldades dos professores em introduzir a física moderna no ensino médio: a necessidade de superação da racionalidade técnica nos processos formativos. Em R Nardi (org.), *Ensino de ciências e matemática, I: temas sobre a formação de professores* (1, p. 145-159). Editora UNESP.
<https://static.scielo.org/scielobooks/g5q2h/pdf/nardi-9788579830044.pdf>

Moreira, M. A. (1997). Aprendizaje significativo: un concepto subyacente (M. L. R. Palmero, Trans.). Em MA Moreira, MC Caballero, & ML Rodríguez (org.), *Actas del Encuentro Internacional sobre el Aprendizaje Significativo*. Burgos, España (p. 19-44). Burgos.

Moreira, M. A. (2011). Aprendizagem Significativa: um conceito subjacente. *Aprendizagem Significativa em Revista*, 1(3), 25-46. <http://moreira.if.ufrgs.br/apsigsubport.pdf>

Oliveira, F. F., Vianna, D. M. M., & Gerbassi, R. S. S. (7 de dezembro de 2007). Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(3), 447-454. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000300016>

Silva, B. M., & Buss, C. S. (24 de maio de 2019). Organizadores Prévios para o Ensino de Física: uma aplicação para o estudo de Ondas Mecânicas. *Revista Educar Mais*, 3(1), 3-14. <https://doi.org/10.15536/reducarmais.3.2019.3-14.1375>

Sparnaay, M. J. (1958). Measurements of attractive forces between flat plates. *Physica*, 24, 751-764. [https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(58\)80090-7](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(58)80090-7)

Vosniadou, S., & Ortony, A. (22 de outubro de 2009). *Similarity and analogical reasoning*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529863>