

# ABORDAGEM DO PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA NO ENSINO MÉDIO COM O SUPORTE DA HIPERMÍDIA

## AN APPROACH TO THE EQUIVALENCE PRINCIPLE IN HIGH SCHOOL WITH THE SUPPORT OF HYPERMEDIA

Daniel Iria Machado<sup>1</sup>  
Roberto Nardi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) / *Campus* de Foz do Iguaçu / Centro de Engenharias e Ciências Exatas, dpedm@uol.com.br. Apoio: PDTA/FPTI-BR e Unioeste.

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista (Unesp) / *Campus* de Bauru / Departamento de Educação / Faculdade de Ciências, nardi@fc.unesp.br. Apoio: CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

### Resumo

Apresentam-se os resultados de uma pesquisa sobre a introdução do *princípio da equivalência* no Ensino Médio, com a utilização de um sistema hipermídia fundamentado na teoria da aprendizagem de Ausubel. Com base em entrevistas, observações em sala de aula, questionários e mapas conceituais elaborados pelos estudantes, concluiu-se que a proposta didática desenvolvida contribuiu para a aprendizagem significativa de alguns aspectos relacionados ao princípio da equivalência, em particular da concepção estabelecida na Relatividade Geral de que a gravitação resulta de uma curvatura do espaço-tempo pela matéria, embora tenha havido limitações na formulação explícita da identidade entre referenciais uniformemente acelerados e campos gravitacionais homogêneos. Os recursos multimídia utilizados forneceram suporte imagético durante as aulas, facilitando a visualização dos fenômenos e sua compreensão. Os estudantes expressaram a opinião de que o *software* estava bem elaborado e seu emprego no Ensino Médio poderia beneficiar o processo de ensino e aprendizagem de Física.

**Palavras-chave:** Ausubel; construtivismo; Física Moderna; hipermídia; princípio da equivalência.

### Abstract

We present the results of a research on the introduction of the *equivalence principle* in High School, with the use of a hypermedia system based on the learning theory of Ausubel. On basis of interviews, observations in classroom, questionnaires and conceptual maps prepared by the students, we concluded that the didactic proposal developed contributed to the meaningful learning of some aspects regarding the equivalence principle, in particular the conception established in General Relativity that the gravitation results from a curvature of space-time by matter, though there have been limitations in the explicit formulation of the identity between uniformly accelerated reference systems and homogeneous gravitational fields. The multimedia resources used supplied imagetic support during the classrooms, facilitating the visualization of the phenomena and its understanding. The students expressed the opinion that the software was well elaborated and its use in High School could benefit the teaching and learning process of Physics.

**Keywords:** Ausubel; constructivism; equivalence principle; hypermedia; Modern Physics.

## 1 INTRODUÇÃO

A atualização curricular com o propósito de diminuir o descompasso entre o avanço nas pesquisas científicas e a introdução na escola dos resultados mais relevantes alcançados é uma questão que demanda atenção na área de Educação para a Ciência. É algo fundamental para uma prática educacional mais sintonizada com a Sociedade atual – na qual Ciência e Tecnologia desempenham um papel central –, que possa propiciar elementos culturais para a formação de indivíduos capazes de refletir com maior profundidade sobre o mundo e nele atuar de maneira crítica.

No campo do Ensino de Física, em particular, adquirem importância os estudos a respeito da inserção na escola dos temas da Física Moderna, desenvolvida desde o final do século XIX até o presente, sobre alicerces quânticos e relativísticos.

Diante do amplo espectro de assuntos que compõem o corpo teórico e experimental da Física Moderna, depara-se com a necessidade de se realizar escolhas referentes ao conteúdo a ser tratado e quanto à metodologia a ser empregada, envolvendo os recursos para apoiar a práxis educativa e a fundamentação pedagógica da proposta.

Este trabalho concentra-se na análise do processo de ensino e aprendizagem do *princípio da equivalência* – idéia central na *Teoria da Relatividade Geral*, elaborada por Albert Einstein (1879-1955) –, com a utilização de um sistema hipermídia elaborado a partir de pressupostos construtivistas. A abordagem do princípio da equivalência pode propiciar aos estudantes do Ensino Médio uma introdução qualitativa à Relatividade Geral e contribuir para que estes desenvolvam uma nova concepção sobre a natureza da interação gravitacional e quanto ao próprio Universo, vislumbrando também alguns impactos dessas idéias sobre a Tecnologia, a Sociedade e a Cultura. Essa teoria está na base da Cosmologia Moderna, dedicada ao estudo da origem e evolução do universo, e é necessária para a realização dos atuais projetos de posicionamento global por satélite (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 1987; TIPLER; LLEWELLYN, 2001).

A investigação objetivou caracterizar a construção pelos estudantes de noções sobre o princípio da equivalência e suas principais implicações; identificar dificuldades enfrentadas na aprendizagem significativa desse assunto; e avaliar a potencialidade de uma proposta didática para promover a abordagem desse tema com o suporte da hipermídia.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sistema hipermídia denominado *Tópicos de Física Moderna*, proposto pelos autores para o ensino de noções básicas do princípio da equivalência e de outros conceitos, fundamenta-se na teoria da aprendizagem de Ausubel (1976), em diretrizes para a elaboração de sistemas hipermídia e em perspectivas da Educação para a Ciência, dentre as quais o enfoque Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) e as abordagens considerando a inserção da História da Ciência, da Filosofia da Ciência e da Física Moderna no Ensino Médio.

Na adequação dos temas de Física Moderna para o ensino na escola de nível médio, adotou-se o ponto de vista de que, em geral, é preciso evitar complicações de ordem matemática – acessíveis somente mediante estudos mais avançados – e concentrar-se na essência dos fenômenos (TERRAZZAN, 1994).

A *exploração dos limites dos modelos clássicos*, na perspectiva da aprendizagem significativa, foi outra das escolhas metodológicas efetuadas na organização do *software* hipermídia considerado no presente trabalho. Segundo Gil e Solbes (1993), quando a Física Moderna é introduzida nos currículos escolares sem fazer referência às dificuldades encontradas na Física Clássica, seja justapondo os dois paradigmas ou mesmo os misturando, podem surgir graves erros conceituais ou de interpretação. Por isso, propõem que sejam esclarecidos os limites de validade das concepções clássicas e explicitadas suas diferenças significativas em relação à Física Moderna, evitando-se uma visão simplista, a fim de permitir a construção de um entendimento mais correto da Física, em que o desenvolvimento é não-linear, com crises e mudanças paradigmáticas.

Em uma abordagem na qual se procura estimular a *aprendizagem significativa*, a idéia de partir do conhecimento clássico para então se estabelecer o moderno encontra fundamento no princípio de utilizar as noções prévias na condição de subsunçores para a construção das novas concepções. Mostrando-se aspectos comuns e distinções entre os conceitos clássicos e modernos, tem-se um modo adequado de promover a *reconciliação integrativa*, facultando a formação de um entendimento claro quanto às similitudes e diferenças entre esses conjuntos de concepções. Conforme ponderam Moreira e Greca (2003), nessa ótica não se procura substituir um conceito por outro, mas sim fazer com que uma concepção se torne mais elaborada, com maior *discriminabilidade*, por adquirir mais significados agregados a ela, evoluindo sem perder a própria identidade. Os significados estabelecidos anteriormente não são eliminados, continuam presentes na concepção que se desenvolve, embora possam permanecer em forma residual.

Consoante tal opção, os textos do material didático incluíram cotejos entre conceitos clássicos e modernos, buscando explicitar semelhanças, diferenças e limitações, e procurando facilitar o estabelecimento de pontes entre idéias já estudadas e novas concepções. Ainda com esse intuito, foram preparados textos com uma breve exposição do desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica, e contendo uma visão epistemológica introdutória sobre essa evolução, considerando-se a existência de rupturas e a competição de programas de pesquisa, como no caso da transição da Física Clássica para a Moderna.

Tais abordagens históricas e filosóficas foram também incluídas porque permitem evidenciar aspectos essenciais da *natureza da Ciência*, cujo entendimento é objetivo importante da educação científica. Diversas pesquisas mostram que, em geral, os estudantes não possuem concepções adequadas sobre as características e os valores da Ciência e quanto ao modo de produção, testagem e validação do conhecimento científico (LEDERMAN, 1992).

Além dos aspectos mencionados, tratou-se no *software* da vida e obra de Albert Einstein, uma vez que a apresentação de biografias de cientistas, com leitura e discussão em sala de aula, pode revelar características de seus métodos de investigação, sua concepção de Ciência e a relação desta com a Sociedade, além de fornecer a visão do cientista enquanto ser humano inserido num contexto social (KLOPFER, 1969). Introduziram-se, ainda, explanações sobre o papel de novas previsões teóricas para o progresso da Ciência, exemplificadas por fenômenos notáveis deduzidos com a aplicação da Teoria da Relatividade, dentre os quais o desvio de um raio de luz pela ação da gravidade – verificado nas lentes gravitacionais, por exemplo –, os buracos negros e as ondas gravitacionais.

Assumiu-se no desenvolvimento dessa proposta didática a importância de se incluir na educação conceitos científicos e tecnológicos, processos de investigação e relações entre Ciência, Tecnologia e Sociedade, abarcando o conhecimento, as aplicações, as habilidades e os valores relativos a Ciência e Tecnologia, visando tanto ao desenvolvimento do pensamento crítico quanto à participação em uma sociedade democrática (BYBEE, 1987). Desse modo, visando a relacionar o conhecimento ao mundo dos estudantes, em consonância com o movimento CTS, explorou-se no material elaborado a necessidade de se levar em conta a influência do campo gravitacional no fluxo do tempo, de acordo com o estabelecido pela Teoria da Relatividade Geral, nos projetos de posicionamento global por satélite (GPS), essenciais para a precisão em sistemas de navegação e em outras áreas.

O *software* relaciona ainda a concepção de equivalência entre massa e energia com as reações nucleares, o funcionamento das usinas nucleares, os acidentes radioativos, o Projeto Manhattan – que resultou nas primeiras bombas atômicas – e as armas nucleares. São também considerados nesse material outros temas afins, tais quais a radioatividade e a relevância de questões éticas na prática científica.

Na organização do material elaborado, recorreu-se à *hipermídia*, tecnologia da informação e comunicação resultante da união de hipertexto e multimídia. A hipermídia viabiliza a criação de seqüências de telas (*trilhas*) que podem ser percorridas numa ordem predefinida pelo professor ou exploradas conforme o aluno tenha seu interesse despertado por determinada idéia (MARCHIONINI, 1988). A estrutura de um hipertexto pode ser projetada para proporcionar

conexões (*links*) entre os conceitos que levem à formação de significados relevantes para o estudante, segundo princípios de ensino e aprendizagem construtivistas (BOLACHA; AMADOR, 2003). A utilização de imagens, animações, filmes e sons permite que a informação seja apresentada segundo múltiplas representações, reforçando as idéias contidas nos textos e ampliando as possibilidades para associações pertinentes dos conceitos na estrutura cognitiva do aluno (BABBITT; USNICK, 1993). O emprego desses signos tende também a facultar uma aprendizagem estimulante, devido à riqueza e diversidade dos elementos de mídia, mobilizando, além de aspectos cognitivos, fatores de ordem afetiva (MACHADO; SANTOS, 2004).

Com a utilização do hipertexto, foi projetada uma rede conceitual na qual os *links* buscam favorecer, ao máximo, conexões não-arbitrárias e substanciais para os estudantes, visando à aprendizagem significativa (MACHADO; NARDI, 2004). Imagens, animações e filmes foram utilizados para tornar os temas de estudo mais próximos dos estudantes e favorecer a ancoragem de conceitos na estrutura cognitiva. Foram incluídos *links* para a exposição de materiais que propiciem uma ligação entre os conhecimentos prévios do estudante e as novas idéias a serem expostas, possibilitando o acesso a *organizadores prévios* quando necessário. Foram criadas *trilhas* – seqüências de telas – em que os conceitos foram apresentados em grau crescente de especificidade, conforme o *princípio de diferenciação progressiva*. Em certos trechos do material procurou-se indicar semelhanças e diferenças entre conceitos de modo a promover a *reconciliação integrativa*. A flexibilidade dos *links* permite ao estudante retomar assuntos prévios relacionados ao item atual em estudo sempre que desejar. Em diversos textos podem ser acessados, a partir de um *link* específico, questões e problemas que pretendem estimular a reflexão do estudante, voltar sua atenção para aspectos importantes do assunto e possibilitar a discussão crítica com os colegas e o professor, de modo a promover a *consolidação* dos conceitos. Existem perguntas com diversos graus de elaboração, desde as mais simples, destinadas a destacar certos pontos relevantes do texto que o aluno deve rever e verificar se assimilou bem, até as mais problematizadoras, geradoras de debates com maior profundidade. Nessa última categoria encaixam-se as questões envolvendo informações atuais extraídas de jornais e revistas, dentre outras situações que exigem a aplicação dos conhecimentos aprendidos a novos contextos. Determinados *links* no hipertexto foram ainda estabelecidos para possibilitar o acesso a idéias complementares, segundo o interesse despertado nos estudantes, de modo a estimular a aprendizagem incidental e a ampliação da associação de idéias na estrutura cognitiva.

Os *links* do sistema hipermídia, dentre outros caminhos, favorecem o percurso das seguintes trilhas pelo hiperdocumento, às quais se relacionam objetivos pedagógicos específicos: a) *Trilha I*: Introdução ao Módulo Visão Inicial; Conceitos de Física Clássica; Conceitos de Física Moderna; b) *Trilha II*: Desenvolvimento Histórico da Teoria da Relatividade; Biografia de Albert Einstein; Metodologia dos Programas de Pesquisa; c) *Trilha III*: Introdução ao Módulo Teoria da Relatividade; Teoria da Relatividade Geral; d) *Trilha IV*: Buracos Negros; Ondas Gravitacionais. A primeira trilha visa a contribuir para a percepção do fato de que os conceitos da Física evoluem, o estabelecimento da distinção entre Física Clássica e Física Moderna e a obtenção de uma noção geral e qualitativa de diversos conceitos fundamentais da Física Moderna. A segunda trilha objetiva facultar a construção de uma visão histórica do surgimento e desenvolvimento da Teoria da Relatividade, evidenciar o lado humano do empreendimento científico – incluindo aspectos psicológicos, éticos e sociais – e favorecer a conscientização quanto ao caráter provisório e descontínuo do conhecimento científico. A terceira trilha tem a finalidade de propiciar o entendimento do princípio da equivalência e de algumas de suas implicações para a Astrofísica, a Cosmologia e a Engenharia. A quarta trilha tem o propósito de possibilitar o conhecimento de fenômenos previstos pela Relatividade Geral e evidenciar alguns dos limites na compreensão propiciada por essa teoria.

Um recurso didático empregado foi o *experimento em pensamento*, também denominado *Gedankenexperiment*, que, segundo Terrazzan (1994), pode ser útil na construção ou esclarecimento de conceitos difíceis ou de natureza controvertida. Os experimentos em pensamento são utilizados para investigar a natureza desde a antiguidade e tiveram papel essencial no desenvolvimento da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade (BROWN, 2002). Em

geral, é impossível implementar efetivamente tais experimentos, por motivos físicos, tecnológicos ou de ordem prática. Entretanto, estes permitem analisar determinadas implicações de uma teoria e explicitar características não-evidentes de um sistema. Buscou-se aproveitar no *software* examinado neste trabalho algumas das possibilidades dos experimentos em pensamento com a inclusão de uma discussão sobre o que detectariam observadores no interior de naves espaciais em duas situações distintas. Na primeira, as astronaves encontram-se numa região isolada do espaço, aceleradas a uma taxa igual a  $-\vec{g}$ . Na segunda, estas permanecem pousadas numa região de campo gravitacional uniforme de valor  $+\vec{g}$ . Em uma das naves está uma esfera inicialmente em repouso. Na outra, um raio de luz inicia sua propagação perpendicularmente ao vetor  $\vec{g}$ . Tal *Gedankenexperiment*, também apresentado no *software* por meio de uma animação (figura 1), permite debater o princípio da equivalência e ilustrar qualitativamente uma de suas implicações, o fato de que um raio de luz sofre desvio sob influência de um campo gravitacional.



Figura 1: Tela do *software* com animação relativa a um experimento mental.

### 3 METODOLOGIA

O sistema hipermídia descrito foi utilizado em um curso de introdução à Teoria da Relatividade com duração de 18 horas, organizado em dois encontros semanais de duas horas cada um, no período da tarde. Completaram o curso 5 estudantes do terceiro ano do Ensino Médio de uma escola pública. As aulas, ministradas por um dos autores, não foram vinculadas às disciplinas regulares do Ensino Médio. Os estudantes inscreveram-se para as atividades movidos principalmente pelo interesse em discutir o tema proposto, pois não receberiam uma nota por frequentá-lo. Todos planejavam prestar o exame vestibular, embora nenhum pretendesse ingressar em um curso de Física ou mesmo da área de Ciências Exatas. Na análise dos resultados da pesquisa, os alunos serão indicados pelos símbolos  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  e  $E_5$ , de modo a preservar suas identidades. Os participantes foram entrevistados antes do início do curso, com o propósito de se avaliar seus

conhecimentos prévios em relação ao assunto que seria estudado. As entrevistas iniciais evidenciaram que os estudantes não estavam familiarizados com as idéias a serem introduzidas no curso.

As aulas foram filmadas e o pesquisador manteve um diário com observações realizadas durante as atividades. No último encontro, solicitou-se a cada aluno a elaboração de um mapa conceitual sobre o princípio da equivalência, para propiciar informações sobre a forma como organizavam suas idéias. Os mapas foram preparados individualmente, com a possibilidade de consultar os textos do *software* para auxiliar na tarefa. Cada estudante forneceu explicações sobre seu mapa, as quais foram gravadas. Após o curso, os alunos responderam a um questionário com itens destinados a avaliar a assimilação de idéias sobre o princípio da equivalência e algumas de suas principais implicações. Em seguida, os estudantes foram novamente entrevistados a fim de se obter sua opinião sobre o processo de ensino e aprendizagem com a utilização da hipermídia.

Cada aluno teve um computador à sua disposição durante as aulas e foi orientado para discutir idéias com outro colega à medida que percorria as telas do programa. Tal procedimento teve a finalidade de fomentar o desenvolvimento de conteúdos atitudinais, relacionados à cooperação e ao respeito às idéias dos colegas.

As atividades foram realizadas de acordo com a seguinte seqüência didática: a) exposição inicial do professor; b) indicação de uma trilha (seqüência de textos) pelo *software*, contendo questões para reflexão e debate, para exploração pelos alunos; c) discussão do assunto em duplas de estudantes; d) discussão do assunto envolvendo a turma toda; e) registro por escrito das questões propostas; f) indicação de uma nova trilha, reiniciando a seqüência didática. Os estudantes foram também incentivados a explorar *links* do *software* segundo seu próprio interesse, além das trilhas propostas pelo professor, a fim de favorecer a expansão de sua rede de associações conceituais. Conceitos clássicos relevantes para a assimilação das idéias da Física Moderna que seriam ensinados foram discutidos qualitativamente no início do curso, visando a proporcionar pontos de ancoragem (*subsunçores*) adequados na estrutura cognitiva dos alunos, para apoiar a aprendizagem subsequente.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 RESPOSTAS AOS QUESTIONÁRIOS

O questionário aplicado após o curso apresentava questões destinadas à avaliação quanto à compreensão do significado do princípio da equivalência. As respostas obtidas mostraram dificuldades dos estudantes em explicar esse princípio, embora durante as aulas a maioria dos alunos tenha demonstrado alguma compreensão da idéia, conforme evidenciado nas discussões com o professor.

Apesar de terem sido encontrados obstáculos para formular claramente o princípio da equivalência, uma de suas implicações relevantes, a de que os efeitos gravitacionais podem ser entendidos a partir de uma curvatura do espaço-tempo, foi exposta no questionário por três dos estudantes, como se apresenta a seguir.

Em uma questão na qual se indagava acerca do modo como a interação gravitacional era entendida na Teoria da Relatividade Geral, com base em uma figura representando a interação entre uma estrela e um planeta por meio de um espaço curvo, foram obtidas as seguintes respostas:

*“[...] devido à curvatura do espaço-tempo [...] os objetos maiores puxam os menores”* (E<sub>1</sub>).

*“É que o campo gravitacional provoca uma curvatura no espaço-tempo”* (E<sub>5</sub>).

Em outro item do questionário, no qual se indagava a respeito da influência de um campo gravitacional sobre um raio de luz, a aluna E<sub>3</sub> formulou a seguinte resposta:

*“Um campo gravitacional influencia a deflexão da luz, que também é causada devido à curvatura do espaço-tempo”.*

Pelo exposto, verifica-se que estes alunos foram capazes de relacionar os efeitos gravitacionais à curvatura do espaço-tempo. No entanto, a aluna E<sub>5</sub> considera que a curvatura do espaço-tempo é produzida pelo campo gravitacional, ao invés de considerar esta deformação como manifestação do campo, indicando falta de reconciliação integrativa neste ponto. Além

disso, nenhum dos alunos explicita que a massa é a grandeza geradora da curvatura do espaço-tempo, traduzindo uma restrição no nível de diferenciação alcançado.

Apesar das limitações no grau de elaboração do conceito de campo gravitacional sob a ótica da Teoria da Relatividade Geral, as concepções exibidas pelos alunos denotam a ocorrência de aprendizagem significativa, pois foram capazes de interpretar e explicar determinados fenômenos físicos razoavelmente, utilizando suas próprias palavras.

#### 4.2 ANÁLISE DOS MAPAS CONCEITUAIS

Os mapas conceituais sobre o princípio da equivalência elaborados pelos estudantes que participaram da pesquisa serão analisados e discutidos a seguir.

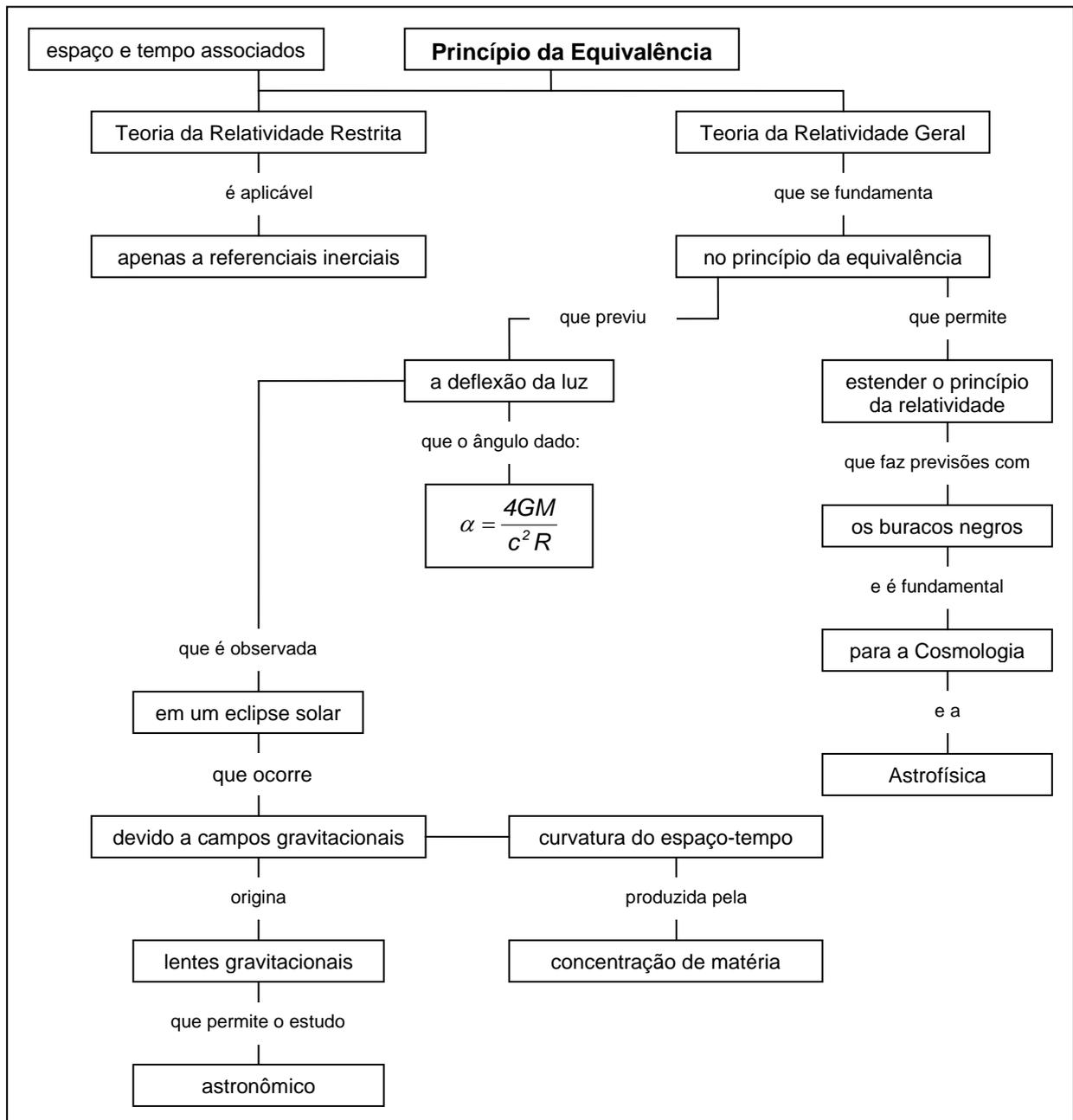


Figura 2: Mapa conceitual elaborado pela aluna E<sub>3</sub>.

### **a) Mapa do Estudante E<sub>1</sub>**

O estudante E<sub>1</sub> relaciona o princípio da equivalência ao estudo do campo gravitacional, considera que a gravidade provoca o desvio de um raio de luz e associa este fenômeno à formação das lentes gravitacionais. Observa-se aqui a diferenciação do princípio da equivalência, refletindo possível organização dos conceitos na estrutura cognitiva do aluno, que reconhece o papel do princípio no entendimento do campo gravitacional, evidencia o fato de a gravidade exercer influência sobre a trajetória de um raio de luz e consegue exemplificar tal efeito mencionando a ocorrência das lentes gravitacionais.

É relevante a ligação estabelecida entre a curvatura do espaço-tempo e a ocorrência dos efeitos gravitacionais, indicando a assimilação da interpretação da ação gravitacional com base em um espaço-tempo curvo, proposta na Teoria da Relatividade Geral. No entanto, a associação da massa à produção dessa curvatura espaço-temporal, importante por indicar a propriedade básica causadora do efeito, não aparece no mapa.

Destaca-se a idéia expressa pelo aluno de que as leis da Física são as mesmas nos diferentes referenciais, tanto inerciais quanto não-inerciais, embora não exista no mapa conceitual a diferenciação dessa idéia e conexões capazes de esclarecer seu grau de entendimento quanto a esse aspecto.

Existe ainda uma conexão indicando a aceleração de valor  $-g$  adquirida pelos corpos ao serem abandonados em um campo gravitacional, e seu vínculo com o estudo dos referenciais acelerados, com base no princípio da equivalência. Desse modo, observa-se que o aluno alcançou algum grau de percepção da relação entre referenciais acelerados e campos gravitacionais, embora não se possa inferir, apenas a partir do mapa conceitual, o grau de aprofundamento desse entendimento. Apesar de aparecer o vínculo do princípio da equivalência com o estudo de referenciais acelerados, o estudante não evidencia clareza nessa parte do mapa conceitual. Em etapa posterior à elaboração do mapa, ao explicá-lo ao professor, o aluno explicitou suas idéias. Recorreu ao exemplo do experimento mental em que uma esfera é abandonada no interior de uma espaçonave, a uma certa distância do chão, num primeiro momento com o veículo em repouso na Terra e, depois, com este acelerando para frente numa região sem influências gravitacionais, resultando em efeitos idênticos em ambos os casos.

Pode-se averiguar a existência de problemas quanto à reconciliação integrativa considerando-se a associação da Relatividade Restrita com referenciais acelerados realizada pelo aluno. Além disso, o estudante revela dificuldades na reconciliação integrativa ao associar a explicação da precessão do periélio de um planeta à Lei da Gravitação Universal de Newton, ao invés da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Entretanto, a inclusão da precessão do periélio no mapa conceitual é pertinente, pois o fenômeno relaciona-se ao princípio da equivalência, que serve de base para o desenvolvimento da Relatividade Geral.

### **b) Mapa da Estudante E<sub>2</sub>**

A estudante E<sub>2</sub> relaciona o princípio da equivalência ao estudo do campo gravitacional, associando os efeitos gravitacionais à curvatura do espaço-tempo. Isso indica algum grau de assimilação da interpretação da ação gravitacional com base em um espaço-tempo curvo, proposta na Teoria da Relatividade Geral. No entanto, a associação da massa à produção dessa curvatura espaço-temporal, importante por indicar a propriedade básica causadora do efeito, não aparece no mapa conceitual.

A aluna procura estabelecer, em dois pontos do mapa, uma relação entre a presença de um campo gravitacional e um referencial uniformemente acelerado, idéia central do princípio da equivalência. Apesar de a estudante tentar incluir um exemplo para explicar esse princípio, verifica-se uma dificuldade na construção do mapa conceitual nesse ponto, indicando uma limitação na diferenciação do conceito. Aparecem alguns elementos do exemplo analisado durante o curso, envolvendo a comparação dos efeitos observados no interior de uma nave em repouso e em outra acelerada, porém falta destacar que a nave em repouso encontra-se numa região de campo

gravitacional uniforme. A aluna também não ressalta que os efeitos observados seriam idênticos se a aceleração da nave fosse igual e contrária à propiciada pelo campo gravitacional.

A idéia de que as leis da Física são as mesmas em diferentes referenciais, importante na Teoria da Relatividade, aparece no mapa conceitual, embora não sejam estabelecidas conexões relevantes a partir desse conceito. Ao se referir num dos quadros do mapa conceitual à Teoria da Relatividade Restrita, e não à Relatividade Geral, a aluna evidencia um problema quanto à reconciliação integrativa.

### **c) Mapa da Estudante E<sub>3</sub>**

A estudante E<sub>3</sub> especifica em seu mapa conceitual (figura 2) que o princípio da equivalência fundamenta a Teoria da Relatividade Geral e o relaciona às previsões da deflexão de um raio de luz em um campo gravitacional e dos buracos negros.

A aluna conecta a idéia de deflexão da luz à equação que fornece o valor do ângulo de desvio de um raio luminoso ao passar próximo de um corpo massivo e à possibilidade de se observar o efeito durante um eclipse solar, relacionando também o fenômeno com as lentes gravitacionais. A estudante explicita que a deflexão da luz é ocasionada por um campo gravitacional, explicando o efeito com base na curvatura do espaço-tempo produzida por uma concentração de matéria. Há ainda uma ligação proposta entre a Relatividade Geral e o estudo da Cosmologia e Astrofísica, e outra estabelecida entre lentes gravitacionais e o estudo astronômico.

Desse modo, observa-se que a aluna conseguiu diferenciar em seu mapa conceitual o princípio da equivalência, fornecendo indicativo da provável organização dos conceitos em sua própria estrutura cognitiva. Pode-se inferir que a aluna assimilou, com base em abordagem introdutória e qualitativa, a noção de campo gravitacional associado a uma curvatura no espaço-tempo, gerada por uma concentração de matéria. Há evidência de aprendizagem significativa devido às inter-relações entre as diversas idéias apresentadas, incluindo exemplos de previsões da Relatividade Geral, fundamentada no princípio da equivalência, e o destaque à sua importância para a Astronomia, a Astrofísica e a Cosmologia.

No mapa conceitual, a estudante ressalta também que o princípio da equivalência permite estender o princípio da relatividade. Além disso, aparece no mapa a Teoria da Relatividade Restrita, à qual a aluna vincula uma concepção de espaço e tempo associados e salienta aplicar-se apenas a referenciais inerciais. Isso mostra que a estudante promoveu a reconciliação integrativa ao perceber as distinções entre Relatividade Restrita e Geral. Revela ainda, apesar de não ter sido expresso de modo explícito, que a Relatividade Geral pode ser empregada em referenciais não-inerciais ou acelerados.

Uma limitação do mapa conceitual, no entanto, pode ser constatada pela falta de idéias sobre a equivalência entre um referencial uniformemente acelerado e um campo gravitacional homogêneo. Tal fato pode indicar uma dificuldade de aprendizagem em relação a essa concepção.

### **d) Mapa da Estudante E<sub>4</sub>**

A estudante E<sub>4</sub> relaciona o princípio da equivalência à curvatura do espaço-tempo, estabelece a associação desse conceito com os efeitos gravitacionais e os conecta com os fenômenos de atraso de relógios pela ação da gravidade e ondas gravitacionais. O fato de as ondas gravitacionais referirem-se ao espaço-tempo é salientado. A relação do campo gravitacional com a deflexão da luz aparece em outro ponto do mapa conceitual e inclui uma ligação com os buracos negros, cuja existência prevista pela Teoria da Relatividade é destacada. O poder preditivo da teoria é também ressaltado com a inserção de um campo para previsões da Relatividade de Einstein no mapa conceitual. Um exemplo adicional de aplicação da Teoria da Relatividade é indicado vinculando-a ao estudo do movimento dos planetas.

As inter-relações realizadas indicam a assimilação de algumas noções acerca da interpretação da gravidade como expressão de uma curvatura no espaço-tempo e revelam certo grau de diferenciação conceitual, quando a aluna considera exemplos concernentes a essa

concepção. Porém, a ausência da idéia de que a curvatura do espaço-tempo é produzida por uma concentração de matéria denota uma limitação na organização conceitual apresentada. Além disso, ao mencionar a Relatividade Restrita – aplicável em referenciais inerciais apenas – em vez da Geral, em conexão com a deflexão da luz e os buracos negros, a estudante evidencia problemas na reconciliação integrativa. Embora a aluna relacione corretamente a teoria com a compreensão do movimento dos planetas, a diferenciação conceitual é reduzida nesse ponto, pois não se faz alusão à precessão do periélio de Mercúrio, não explicada pela teoria clássica rival.

Surge ainda no mapa conceitual um campo para o princípio da relatividade, posto em contato com a noção de leis físicas. Entretanto, não há clareza nesta parte, indicando desenvolvimento insuficiente das idéias quanto a esse tema particular.

Outro ponto que indica provável dificuldade na assimilação de idéias é a ausência no mapa conceitual de campos expressando a equivalência entre referenciais uniformemente acelerados e campos gravitacionais homogêneos.

#### **e) Mapa da Estudante E<sub>5</sub>**

A estudante E<sub>5</sub> relaciona o princípio da equivalência à previsão do desvio da luz por um campo gravitacional e associa o fenômeno à curvatura do espaço-tempo produzida por uma concentração de matéria, destacando a conexão entre esta curvatura e os efeitos gravitacionais. Faz também a distinção entre a Geometria Não-Euclidiana, aplicada a espaços curvos, e a Geometria Euclidiana, utilizada em espaços planos. Ressalta ainda o caráter fundamental do princípio da equivalência na Teoria da Relatividade e enfatiza seu papel no estabelecimento das propriedades do campo gravitacional, ilustrando sua ação novamente com o exemplo da deflexão da luz pela gravidade.

Desse modo, constata-se que a aluna alcançou certo grau de assimilação da interpretação da gravidade como expressão da curvatura do espaço-tempo provocada por um corpo massivo. A estudante foi capaz de estabelecer a diferenciação do conceito exemplificando-o com o fenômeno do desvio de um raio de luz pelo campo gravitacional. A distinção entre duas modalidades de Geometria, uma aplicável a espaços planos, outra a curvos, revela a ocorrência de reconciliação integrativa.

A inter-relação entre as idéias expostas no mapa conceitual e sua conexão tanto com o princípio da equivalência quanto com a Teoria da Relatividade sugere a ocorrência de aprendizagem significativa de alguns conceitos. No entanto, a estudante não expõe no mapa a equivalência entre referenciais uniformemente acelerados e campos gravitacionais homogêneos, indicando provável dificuldade na assimilação dessa concepção. Deixaram ainda de ser incluídos vários exemplos de previsões da Teoria da Relatividade, capazes de revelar maior grau de desenvolvimento conceitual.

A referência à aceleração de um raio de luz pode ser indício de que a aluna percebeu alguma relação entre campos gravitacionais e referenciais uniformemente acelerados, porém não houve menção clara à equivalência entre estes. A omissão desse conceito central pode refletir um limite no entendimento do princípio da equivalência. É possível ainda que a menção à aceleração denote o emprego de uma noção clássica, a de um movimento em trajetória curva ser acelerado.

A tentativa de interpretar novos fenômenos relacionando-os a conceitos clássicos mais familiares já havia ocorrido, no caso dessa aluna, durante um debate no quinto encontro do curso, quando indagou se a deflexão de um raio de luz que passa próximo a uma grande concentração de matéria não seria resultado de refração. Nessa ocasião, houve oportunidade para discutir as semelhanças e diferenças entre a refração e o desvio da luz por um campo gravitacional.

### **4.2.1 DISCUSSÃO**

O exame dos mapas conceituais mostra terem todos os estudantes participantes do estudo manifestado a noção de que os efeitos gravitacionais são expressos mediante uma

curvatura no espaço-tempo. Desse modo, um ponto importante da nova concepção de interação gravitacional proposta pela Teoria da Relatividade Geral foi assimilado qualitativamente, em uma abordagem introdutória. Entretanto, apenas dois alunos explicitaram que essa curvatura é produzida por uma concentração de matéria, sugerindo uma falta de diferenciação em relação a um aspecto importante do conceito.

Por outro lado, certo grau de desenvolvimento conceitual é revelado pelo fato de quatro estudantes terem mencionado o fenômeno da deflexão de um raio de luz pela ação gravitacional, devido à curvatura do espaço-tempo. Além disso, três estudantes citaram ainda pelo menos mais uma ocorrência relevante explicada a partir da nova formulação do conceito de campo gravitacional, tais quais as lentes gravitacionais, a precessão do periélio de Mercúrio, as ondas gravitacionais e o atraso de relógios por influência da gravidade.

A inter-relação entre os conceitos elaborada pelos alunos para expor a idéia de que a gravidade está associada a um espaço-tempo curvo e para exemplificar algumas de suas implicações – em graus distintos de aprofundamento, conforme o indivíduo considerado – sugere a ocorrência de aprendizagem significativa desse aspecto.

Contudo, a idéia de equivalência entre um referencial uniformemente acelerado e um campo gravitacional homogêneo foi omitida por três estudantes e apresentada de modo pouco claro por uma aluna. Tal ocorrência indica, para a maioria dos alunos, dificuldades na aprendizagem significativa do princípio da equivalência ou, pelo menos, falta de apreensão da importância central dessa formulação. Cabe ressaltar, no entanto, que um estudante, apesar de ter feito alusão a essa noção no mapa sem evidenciar muita clareza, conseguiu explicar oralmente a idéia com apoio de um experimento mental, comparando observações em um referencial acelerado e em outro situado num campo gravitacional uniforme. Isso revelou a assimilação da essência do princípio da equivalência ao menos por um aluno.

Com base nos mapas, verificou-se também que três alunos não fizeram uma distinção entre Relatividade Geral e Restrita, denotando problemas na reconciliação integrativa em relação a essas especialidades. Outra dificuldade de natureza similar sucedeu-se com um aluno que associou o princípio da equivalência à Lei da Gravitação de Newton, confundindo uma noção da Física Moderna com outra da Física Clássica.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise dos resultados obtidos na atividade para a introdução do princípio da equivalência no Ensino Médio com o apoio da hipermídia, descrita neste trabalho, possibilitou identificar certas idéias assimiladas pelos estudantes, assim como algumas possíveis dificuldades de aprendizagem. Além disso, permitiu uma avaliação quanto ao uso da hipermídia para o estudo desse princípio e a obtenção da opinião dos estudantes sobre o emprego dessa tecnologia no processo de ensino e aprendizagem do tema abordado.

Nas discussões com o professor em sala de aula, a maior parte dos alunos demonstrou compreensão do princípio da equivalência e de algumas de suas implicações. O uso de figuras e de animações para ilustrar tais idéias mostrou-se relevante para favorecer o entendimento. Colaboraram para isso, em especial, as animações e imagens envolvendo um experimento mental relativo ao princípio da equivalência e representações bidimensionais do espaço curvo. Os recursos multimídia utilizados forneceram suporte imagético durante a leitura dos textos, as explicações do professor e o debate com os alunos, contribuindo para a visualização dos fenômenos e sua compreensão. Tal constatação foi possível a partir das observações e trocas de idéias realizadas em sala de aula e da avaliação feita pelos próprios alunos ao serem entrevistados.

Entretanto, verificou-se nos questionários respondidos e nos mapas conceituais elaborados que a maioria dos estudantes não conseguiu formular com clareza o princípio da equivalência. Isso pode ser considerado um indicador de problemas na consolidação da aprendizagem,

provavelmente relacionado a um tempo de estudo insuficiente do tema avaliado, seja pelo não comparecimento em determinadas aulas, em alguns casos, ou pela pouca dedicação ao assunto após cada encontro, de modo geral.

Apesar dessa dificuldade, os debates em sala de aula, os questionários e os mapas conceituais evidenciaram a aprendizagem significativa da concepção de campo gravitacional como manifestação da curvatura do espaço-tempo, uma implicação fundamental do princípio da equivalência, e de fenômenos explicados mediante essa noção, tal qual a deflexão da luz pela gravidade. Parte dos alunos também relacionou esse efeito à presença de uma concentração de matéria.

Conclui-se que a proposta didática desenvolvida com a utilização da hiperídia contribuiu para a aprendizagem significativa de alguns aspectos relacionados ao princípio da equivalência, em particular da nova concepção de interação gravitacional proposta pela Relatividade Geral, embora tenha havido limitações na formulação explícita da identidade entre referenciais uniformemente acelerados e campos gravitacionais homogêneos. Os alunos expressaram a opinião de que o *software* estava bem elaborado e seu emprego no Ensino Médio poderia beneficiar o processo de ensino e aprendizagem de Física.

## 6 REFERÊNCIAS

- AUSUBEL, D. P. **Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo**. México: Editorial Trillas, 1976. 768 p.
- BABBITT, B. C.; USNICK, V. Hypermedia: a vehicle for connections. **Arithmetic Teacher**, [S.l.], v. 40, p. 430-432, 1993.
- BOLACHA, E.; AMADOR, F. Organização do conhecimento, construção de hiperdocumentos e ensino das ciências da Terra. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, 2003. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol8/n1/v8\\_n1\\_a2.htm](http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol8/n1/v8_n1_a2.htm)>. Acesso em: 26 abr. 2004.
- BROWN, J. R. Thought experiments. In: ZALTA, E. N. (Ed.). **The Stanford Encyclopedia of Philosophy**. Stanford: Stanford University, 2002. Disponível em: <<http://plato.stanford.edu/archives/sum2002/entries/thought-experiment/>>. Acesso em: 23 set. 2005.
- BYBEE, R. W. Science education and the science-technology-society (STS) theme. **Science Education**, [S.l.], v. 71, n. 5, p. 667-683, 1987.
- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. El espacio curvo. In: \_\_\_\_\_. **Física: volumen II: electromagnetismo y materia**. México: Addison-Wesley Iberoamericana, 1987. cap. 42.
- GIL, D.; SOLBES, J. The introduction of modern physics: overcoming a deformed vision of science. **International Journal of Science Education**, [S.l.], v. 15, n. 3, p. 255-260, 1993.
- KLOPFER, L. E. The teaching of science and the history of science. **Journal of Research in Science Teaching**, [S.l.], v. 6, p. 87-95, 1969.
- LEDERMAN, N. G. Students' and teachers' conceptions of the nature of science: a review of the research. **Journal of Research in Science Teaching**, [S.l.], v. 29, n. 4, p. 331-359, 1992.
- MACHADO, D. I.; NARDI, R. Uma proposta de software hiperídia para o ensino de física moderna e contemporânea. **Tecné, Episteme y Didaxis**, Bogotá, n. 16, p. 84-101, 2004.
- MACHADO, D. I.; SANTOS, P. L. V. A. da C. Avaliação da hiperídia no processo de ensino e aprendizagem da física: o caso da gravitação. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 1, p. 75-99, 2004.
- MARCHIONINI, G. Hypermedia and learning: freedom and chaos. **Educational Technology**, [S.l.], v. 28, n. 11, p. 8-12, 1988.
- MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.
- TERRAZZAN, E. A. **Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média**. viii, 241 f. Tese (Doutorado em Educação) – Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física moderna**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 516 p.