

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Programa de Pós Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física

A Noção de Referencial:

uma Interação Cognitiva entre a Mecânica Newtoniana e a Relativística

Lisete Funari Dias

Dissertação realizada sob a orientação do Prof. Dr. Trieste Freire Ricci, apresentada ao Instituto de Física da UFRGS, em preenchimento parcial dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Porto Alegre

2010

Dedico este trabalho:

À minha família, ao Professor Ayala, pelo apoio,
e a Deus, pela força de vontade e saúde.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Álvaro L. Ayala, da UFPEL, pelas sugestões sobre o tema e na concepção do material didático, especialmente das animações e do roteiro de atividades. Além disso, agradeço-lhe também pelo apoio na primeira aplicação desta proposta para uma de suas turmas de Licenciatura em Física.

Ao departamento de Física da UFPEL, pela possibilidade e incentivo à aplicação deste trabalho na Universidade.

Ao professor Dr. Luiz Fernando Mackedanz e à professora Eliane Capelleto, da FURG, por mais uma possibilidade de aplicação deste trabalho em uma das turmas da Licenciatura em Física.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, do IF-UFRGS, por tudo que aprendi com eles.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo na longa caminhada que tivemos.

Ao meu marido Juarez e à minha filha Carolina, pelo incentivo total durante este percurso.

Ao professor orientador Dr. Trieste F. Ricci, pela sua dedicação, pela paciência na correção dos textos, assim como em todo este trabalho.

SUMÁRIO:

INTRODUÇÃO.....	8
1. REVISÃO DA LITERATURA	11
1.1. Pesquisa referente à noção de referencial nas mecânicas newtoniana e relativística.....	11
1.2. Pesquisa referente a metodologias para o ensino de física moderna e formação de professores.....	14
1.3. Pesquisa referente às novas tecnologias no Ensino de Física e relacionadas ao uso de animações.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1. Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel.....	21
2.2. Epistemologia de Gaston Bachelard.....	25
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. Planejamento do curso.....	32
3.2. A elaboração do material instrucional.....	34
3.2.1. O texto.....	34
3.2.2. Os testes.....	35
3.2.3. As animações.....	36
3.3. Descrição do curso – Roteiro das atividades.....	40
4. APLICAÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL EM SALA DE AULA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	46
4.1. As turmas de Licenciatura em Física.....	46
4.2. As atividades e resultados.....	46
4.2.1. Atividade 1. Introdução.....	47
4.2.1.1 Análise e discussão dos resultados dos testes 1.1 e 1.2.....	48
4.2.2. Atividade 2- A Relatividade Galileana/Newtoniana.....	52
4.2.2.1 Texto sobre a Mecânica Galileana/Newtoniana.....	52
4.2.2.2. Discussão de conceitos da relatividade Galileana e testes 1.1. e 1.2 com o uso de animações.....	53
4.2.2.3. Aplicação do pré- teste 1.3.....	59
4.2.2.4- Análise e discussão dos resultados do teste 1.3.....	60
4.2.3. Atividade 3- A Mecânica Relativística.....	61
4.2.3.1. Texto sobre a Teoria da Relatividade Restrita.....	61
4.2.3.2. Discussão dos postulados e teste 1.3. com uso de animações.....	68
4.2.3.3. Aplicação do pós-teste 2.1.....	71

4.2.3.4. Análise e discussão dos resultados sobre o pós- teste 2.1.....	73
4.2.4. Atividade 4 - O conceito de referencial na TRR e os efeitos de contração de comprimento e dilatação do tempo.....	75
4.2.4.1. Discussão do pós- teste 2.1 e descrição do movimento com uso de animações.....	75
4.2.4.2. Texto sobre a noção de referencial e a construção das noções de contração do comprimento e de dilatação temporal.....	78
4.2.4.3. Apresentação do exemplo “o trem relativístico e o relógio de luz” com uso de animações	80
4.2.5. Atividade 5- A relatividade da sincronização de relógios.....	83
4.2.5.1. Texto sobre a relatividade da sincronização de relógios.....	83
4.2.5.2. Discussão da Relatividade da sincronização com uso de animações.....	86
4.2.5.3. Aplicação de pré-testes 5.1 e 5.2.....	92
4.2.5.4. Análise e discussão dos resultados dos pré- testes 5.1 e 5.2.....	94
4.2.6. Atividade 6- A relatividade da simultaneidade.....	96
4.2.6.1. Texto sobre a relatividade da simultaneidade.....	96
4.2.6.2. Discussão sobre os métodos para determinação da simultaneidade de eventos.....	97
4.2.6.3. Apresentação da relatividade da simultaneidade de eventos através de animações.....	97
4.2.6.4. Discussão dos testes 5.1 e 5.2, com uso de animações.....	101
4.2.6.5. Aplicação do pós-teste 5.3.....	104
4.2.6.6. Análise e discussão dos resultados dos testes 5.3.....	105
4.2.6.7. O perfil conceitual de referencial dos alunos.....	106
4.2.7. Atividade 7 - Revisão geral e apresentação do perfil conceitual de referencial.....	111
4.3. Avaliação do curso pelos alunos.....	112
CONCLUSÃO.....	114
REFERÊNCIAS.....	117
APÊNDICE I Produto educacional- CD ROM.....	120

RESUMO

Neste trabalho, propomos um conjunto de estratégias para enfrentar os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da cinemática na Teoria da Relatividade Restrita. Tais estratégias são baseadas na proposta da noção de perfil conceitual de referencial (Ayala & Frezza, 2007) e visam promover uma interação cognitiva entre a Mecânica Newtoniana e Relativística. O perfil conceitual (Mortimer, 1995-2000) é um modelo para compreender a evolução conceitual em sala de aula. Para tais objetivos, foi desenvolvido um conjunto de ações em uma seqüência de aplicações de pré-testes e pós-testes com a finalidade de explicitar a concepção dos alunos sobre o aspecto a ser investigado e avaliar a evolução conceitual destes. A diferenciação entre as concepções dos alunos e aquelas cientificamente aceitas deu-se através da interpretação das concepções apresentadas, de discussões teóricas acerca do tema e da apresentação de animações construídas com o *software Modellus*. O público-alvo deste trabalho é formado por alunos de Licenciatura em Física, e o objetivo do mesmo é contribuir para a formação destes estudantes, futuros professores de Física.

Palavras-chave: Referencial, Mecânica Galileana /Newtoniana, Teoria da Relatividade Restrita, Perfil Conceitual, Novas Tecnologias de Ensino de Física, Formação de professores

ABSTRACT

In this work, we propose a set of strategies to face the epistemological obstacles to learning the kinematics in the Restricted Theory of Relativity. Such strategies are based on the proposal of the notion of conceptual profile of reference (Ayala & Frezza, 2007) and promote an interaction between cognitive Newtonian Mechanics and Relativistic Mechanics. The conceptual profile (Mortimer, 1995-2000) is a model for understanding the conceptual evolution of students in classroom. For these goals, we developed a set of actions in a sequence of applications of pre-tests and post-tests in order to explain the conception of students on the aspect to be investigated, and to assess your conceptual evolution. The differentiation between the students' conceptions and scientifically acceptable ones came through the interpretation of the concepts presented, theoretical discussions about the topic and the presentation of animations built with the software Modellus. The target of this work is formed by graduation students in Physics in order to contribute to your formation as future physics teachers.

Keywords: Reference Systems, Galilean/Newtonian Mechanics, Theory of Restricted Relativity, Conceptual Profile, New Technologies in Physics Teaching, Teacher Training.

INTRODUÇÃO

Sabemos que uma das principais dificuldades para a inserção da Física Moderna e Contemporânea (FM&C), nas escolas de Nível Médio, é a falta de preparo dos professores. Por essa razão, o público-alvo deste trabalho é formado por alunos de Licenciatura em Física e o tema está relacionado à noção de Referencial na Mecânica Newtoniana (MN) e na Mecânica Relativística (MR). Portanto, o principal objetivo deste trabalho é contribuir para a formação destes alunos que serão futuros professores de física.

Antes do planejamento e da decisão sobre o tema a ser abordado, foi verificada a possibilidade de aplicação das atividades a alunos de Licenciatura da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em turmas da disciplina de Instrumentação de Ensino de Física I. Recebida a autorização do Departamento de Física da Instituição e do professor responsável pela disciplina, partimos para a elaboração do material que foi apresentado em sala de aula durante sete encontros com 2 horas/aula cada um, no semestre de 2009/1. Mais tarde, foi possível repetir a aplicação para alunos de Licenciatura em Física da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), na disciplina de Atividades de Ensino de Física III, no semestre de 2009/2.

A escolha do tema está relacionada à dificuldade dos estudantes na compreensão dos conceitos envolvidos na cinemática da Teoria da Relatividade Restrita (TRR). Entre eles, está o conceito de sistema de referência ou, simplesmente, referencial, e, em consequência, o conceito de observador. As mesmas dificuldades são detectadas também no aprendizado da MN. A história da ciência revela que o homem sempre buscou explicações para os movimentos dos corpos, e, no que se refere ao conceito de referencial, as polêmicas decorrentes estavam relacionadas aos movimentos absolutos ou relativos. Foi Galileu (século XVII) quem forneceu uma explicação matemática, consistente com a realidade observada, e, hoje aceita cientificamente. Esta realidade está relacionada às diferentes trajetórias e velocidades, observadas e medidas por diversos observadores, fixos em referenciais inerciais em movimento retilíneo e uniforme, uns com relação aos outros. Esta explicação, porém, só ficou completa com a formulação da TRR por Einstein em 1905 (*Ann. d. Phys.*, vol. 17, 1905). Resultados de pesquisas referenciadas na revisão bibliográfica do capítulo 2, sobre este tema, mostram que, em pleno século XXI, as noções de referencial e movimento, para muitos estudantes, incluindo os de graduação, são pré-galileanas, tanto no aprendizado sobre os movimentos não-

relativísticos, explicados com a mecânica newtoniana, quanto aos movimentos relativísticos explicados apenas no âmbito da TRR. Ainda mais, a noção de referencial na MN pode ser obstáculo à aprendizagem da TRR, conforme constatação apresentada em várias referências, a exemplo de Ayala & Frezza (2007). Estas razões nos levaram a concluir que, apesar de conservar o mesmo nome, o conceito de referencial precisa ser muito bem definido para cada uma das duas teorias mecânicas separadamente. A abordagem correta do conceito de referencial é de suma importância na introdução da TRR, principalmente para os alunos de Licenciatura em Física, pois eles serão responsáveis, futuramente, pelo ensino desses conteúdos em sala de aula.

Com a finalidade de verificar trabalhos que pudessem servir de referência para o que estamos propondo, na revisão bibliográfica realizada, sintetizada no capítulo 1, encontramos alguns artigos relacionados ao conceito de referencial tanto na MN quanto na TRR. Alguns resultados de pesquisa relacionada ao uso da noção de perfil conceitual, para construção de estratégias didáticas e, à utilização de novas tecnologias no ensino de Física, também são citados. A partir da proposta da noção de perfil conceitual de referencial (Ayala & Frezza, 2007), foram desenvolvidas estratégias que visam a uma interação cognitiva entre as duas teorias. Para análise da evolução do perfil conceitual de cada aluno, nos baseamos nesta proposta, que divide o perfil conceitual correspondente à noção de referencial em região de senso comum, região newtoniana e região relativística, utilizando a noção de perfil conceitual (Mortimer, 1995-2000), uma adaptação do perfil epistemológico de Gaston Bachelard (1971). Para a construção do material didático, incluindo os pré e pós-testes, utilizados na análise da evolução do perfil conceitual, tomamos como base a teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel e a epistemologia de Bachelard. A justificativa para a utilização desta base teórica será apresentada no capítulo 2.

No capítulo 3, apresentamos com detalhes a concepção, planejamento e elaboração do material instrucional para ser aplicado em sala de aula. Este capítulo contém, como parte da metodologia de aplicação, um roteiro das atividades a serem desenvolvidas com os alunos. Para isso, foi necessário um longo estudo sobre a cinemática na MN e relativística. Além desta parte conceitual, a utilização do *software Modellus*, para a criação das animações, também exigiu muita dedicação. Este software é livre e foi desenvolvido pelo Professor Vitor Duarte Teodoro da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para atingir os objetivos específicos, que estão relacionados à aprendizagem da TRR, o material instrucional ficou constituído por um texto que aborda os tópicos envolvidos no conceito de referencial nas duas teorias, os pré e os pós-testes (com o objetivo de explicitar as concepções prévias dos estudantes e verificar a evolução conceitual) e as animações construídas com o *software Modellus*, com a função de ilustrar o conceito. As animações, apresentadas em CD ROM, que se encontra no Apêndice I, devem servir como mediadoras da aprendizagem, pois o estudo de conceitos da TRR faz uso de situações imaginárias e difíceis de ser compreendidas pelos estudantes, mesmo os de graduação. Estas são complementadas com descrições cientificamente aceitas para cada situação, em seu respectivo referencial. Essas, juntamente com o relato das atividades desenvolvidas, devem ser de utilidade para outros professores e deverão constituir o produto educacional exigido por este Programa de Pós-Graduação.

No capítulo 4, apresentamos a aplicação do material instrucional em sala de aula, a descrição de todas as atividades desenvolvidas, os resultados e a análise dos pré e pós-testes. A descrição dos conceitos envolvidos e a discussão dos testes foram feitas com o uso das animações e da respectiva descrição científica. A classificação das concepções apresentadas pelos alunos e a análise da evolução conceitual seguem o modelo de perfil conceitual sobre referenciais, apresentada em Ayala & Frezza (2007), ou seja, a divisão em regiões de senso comum, newtoniana e relativística. A explicação dessa classificação é feita no item 4.2 deste capítulo que antecede a análise dos resultados dos testes respondidos pelos alunos.

Consideramos também importante, para a formação dos futuros professores de Física, a discussão da estratégia didática utilizada. Para isto, elaboramos a última atividade (7) de forma que lhes fosse explicada a proposta de perfil conceitual, assim como, exemplos de pesquisas e de referências utilizadas neste trabalho.

1. REVISÃO DA LITERATURA

Com o objetivo de identificar trabalhos relacionados com o ensino da TRR e/ou o conceito de referencial, foi realizada uma revisão bibliográfica, durante o segundo semestre de 2008. Para essa pesquisa, primeiramente, fizemos uma busca no catálogo de teses e dissertações da Capes, digitando algumas palavras-chaves relacionadas com o tema, compreendendo o período dos últimos 10 anos. Entre o período de 2003 a 2005, foram encontradas seis dissertações relacionadas à Teoria da Relatividade no Ensino Médio. Em uma pesquisa envolvendo artigos, teses e dissertações publicados em *web sites*, a busca foi por trabalhos que relatassem pesquisas feitas em torno do mesmo tema. Da mesma forma, as metodologias de ensino-aprendizagem e uso de simulações computacionais ou animações que envolvessem o tema. Essa pesquisa compreendeu o mesmo período.

Uma leitura e uma análise de trabalhos encontrados foram feitas com bastante atenção, pois elas seriam importantes no desenvolvimento de nosso projeto de trabalho. No que se refere ao tema de referenciais, existem relatos de diagnósticos dos problemas enfrentados por estudantes, mas nenhum envolvendo uma metodologia de ensino-aprendizagem. A ordem de pesquisa foi feita a partir da proposta para construção do perfil conceitual de referencial (Ayala & Frezza, 2007) e se estendeu a outras referências relacionadas, assim como ao estudo da bibliografia envolvendo os conceitos da cinemática da TRR. Por uma questão de organização, dividimos as pesquisas de interesse em três partes.

1.1. Pesquisa referente à noção de referencial nas mecânicas newtoniana e relativística

O artigo “*A construção de um perfil conceitual de referencial na aprendizagem da teoria da relatividade*” (Ayala & Frezza, 2007) propõe a noção de perfil conceitual de referencial, para enfrentar os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da TRR. Ayala relata sua experiência como ministrante da disciplina introdutória à TRR para alunos de licenciatura em Física da Universidade Federal de Pelotas.

A atenção dada à noção de referencial tem origem na percepção da dificuldade dos alunos de descrever, para um par de eventos, os efeitos de dilatação do tempo, contração da distância e a relatividade da simultaneidade do ponto de vista de observadores em diferentes referenciais. (AYALA & FREZZA, 2007, p. 3)

Baseado neste fato, o autor iniciou uma investigação exploratória com estes alunos, analisando e interpretando suas concepções nas questões de avaliações da disciplina. Como exemplo de questão, ele cita:

A partir de colisões de partículas de raios cósmicos ocorre a produção de múons na atmosfera, a uma altura de 9.000 m. Considerando que estes possuem velocidade de, aproximadamente, $0,998c$ e tempo de vida igual a 2×10^{-6} s, metade dos múons poderiam deslocar-se apenas 600 m e não poderiam atingir a superfície da Terra. No entanto, estes múons são detectados na superfície. Explique esta situação a partir: (a) de um referencial onde a Terra está em repouso; (b) de um referencial onde o múon está em repouso. (op. cit, p. 3.)

Nas respostas para a questão, predomina a dificuldade de distinguir e de descrever corretamente eventos em dois referenciais inerciais em movimento, um com relação ao outro. Ou seja, nenhum aluno apresenta a noção de que, na Terra, são necessários dois relógios (dois observadores) para determinar o tempo de vida do múon, enquanto no referencial deste, apenas um. Essa situação pode ser mais bem explicada considerando-se que, se os múons estão estacionários em seu próprio referencial, o intervalo de tempo entre sua produção (evento 1) e seu decaimento (evento 2) pode ser medido por um único relógio também estacionário (tempo próprio) neste referencial. Neste caso, dizemos que os eventos 1 e 2 ocorrem no mesmo ponto do referencial do múon. Entretanto, se este estiver se movendo em relação a um laboratório fixo na Terra, serão necessários dois relógios para a medida do intervalo de tempo entre os dois eventos. Esta medida será maior do que a do tempo próprio (tempo dilatado, Halliday, Resnick & Walker, 2007). Ainda com relação às concepções dos estudantes, o autor as classifica como de “senso comum”. Elas revelam a presença da noção de referencial absoluto da cinemática pré-galileana usada, espontaneamente, pelos estudantes no início do aprendizado da MN. Os autores do artigo também fazem referência aos resultados obtidos por Scherr, Shaffer & Vokos (2001) ao examinar as noções, de relatividade da simultaneidade e de referencial, possuídas por estudantes de graduação e de pós-graduação da *Universidade de Washington*.

Dois dos artigos citados por Ayala & Frezza foram lidos na íntegra: “*Student understanding of time special relativity simultaneity and reference frames*” Scherr, Shaffer & Vokos (2001) e “*The challenge of changing deeply held student beliefs about the relativity of simultaneity*” Scherr, Shaffer & Vokos (2002). Estes autores relatam uma pesquisa feita com os alunos envolvendo a aplicação de pré-testes e de pós-testes sobre a noção da simultaneidade na TRR. Eles comparam e identificam as concepções existentes neste grupo de alunos, concluindo que “*existe uma tendência de tomar o observador como dependente apenas de sua*

experiência sensorial pessoal” (Scherr, Shaffer & Vokos, 2001, apud Ayala 2007, p. 5). Alguns desses testes foram úteis no desenvolvimento deste trabalho.

O artigo “*Spontaneous reasoning of graduate students*“ Villani & Pacca (1987) apresenta uma pesquisa sobre concepções de estudantes de graduação e de pós-graduação sobre a velocidade da luz. Os autores classificam as respostas de testes e as formas de raciocínio em regiões de senso comum, newtoniana e relativística. Um destes testes também foi utilizado em nosso trabalho, como o pós-teste 2.1.

Os autores do artigo “*Alternative conceptions in Galilean relativity: frames of reference*” (Panse, Ramadas & Kumar, 1994) pesquisaram concepções de 111 estudantes de pós-graduação em Física em um projeto piloto em universidades da Índia, sobre o conceito de referencial na mecânica galileana. Foram aplicados testes de respostas livres com entrevistas clínicas e, em cada resposta, foram destacadas frases que indicavam as noções de referencial apresentadas por estes alunos. Eles organizaram e classificaram as frases em sete categorias. Abaixo apresentamos essas categorias, que representam as concepções alternativas destes estudantes, as quais foram usadas na metodologia de nosso trabalho para identificar as concepções de nossos alunos:

1. Sistemas de referência são tratados como objetos concretos;
2. Limitar a extensão do sistema de referência ao tamanho do objeto físico ao qual o sistema está fixo;
3. Tratar objetos pequenos localizados sobre objetos maiores como “parte do sistema de referência” do objeto maior;
4. Associar eventos ou fenômenos físicos específicos a referenciais específicos;
5. Classificar os movimentos em “reais” e “aparentes”;
6. Associar a descrição física à visualização do fenômeno;
7. Pseudorelativismo (a descrição de um mesmo movimento varia de acordo com a direção do olhar de cada observador)

Os artigos relacionados foram úteis para a elaboração do material instrucional que estamos propondo, porém precisamos de mais subsídios, tais como metodologias de ensino-aprendizagem, incluindo a formação do professor, e o uso de animações para descrever os fenômenos envolvidos.

1.2. Pesquisa referente a metodologias para o ensino de física moderna e formação de professores

Esta pesquisa envolveu trabalhos relacionados às metodologias de ensino-aprendizagem, cujos temas estivessem relacionados com o que propomos. Grande parte dos trabalhos encontrados se refere à inserção da FM&C no Ensino Médio, apresentando assim, propostas de atividades a estes alunos. Porém nosso interesse estava relacionado à formação de professores. Alguns enfatizam o fato de que o estudo das tecnologias desenvolve no aluno competências e habilidades que lhe permitirão obter uma visão crítica da natureza da ciência e do conhecimento científico. Sendo assim, é visível a preocupação com a inserção da FM&C no Ensino Médio, mas isso dependerá do preparo adequado dos professores.

A dissertação sob título “*Aprendizagem do conceito de relatividade da simultaneidade, através do uso de um aparato experimental*” (Melo, 2008) apresenta um trabalho desenvolvido com alunos de Licenciatura em Física, que utiliza uma metodologia, diferente da que utilizamos, para investigar as concepções prévias e a conseqüente construção do conceito da relatividade da simultaneidade. Os comentários do autor são consistentes com as idéias de nosso trabalho, ou seja, a aplicação de atividade a licenciandos com a finalidade de prepará-los para atuarem no ensino médio.

Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o processo de construção do conceito de Relatividade da Simultaneidade, através do uso de um aparato experimental, com alunos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. Para tanto, foi escolhida a Teoria dos Construtos Pessoais como pressuposto teórico-metodológico, e foi desenvolvido um aparato experimental, envolvendo um circuito eletrônico para controlar uma matriz de LED (Diodo Emissor de Luz), que permitisse analogias com o comportamento de um feixe de luz ao interagir com distintos obstáculos. Os resultados indicaram que o modelo experimental desenvolvido foi determinante no sentido de promover conflitos cognitivos, que levaram os alunos a reverem suas concepções iniciais e, conseqüentemente, reestruturá-las, considerando alguns aspectos, como: tempo, distância, constância da velocidade da luz e eventos que ocorrem ao mesmo tempo, essenciais para a compreensão do conceito proposto; a Relatividade da Simultaneidade. (MELO, 2008, p.8)

O artigo “*Uma Releitura Metodológica para o Ensino de Relatividade Restrita*” (Karan, Cruz e Coimbra, 2006), relata a possibilidade de inserção da teoria da TRR, associada a conteúdos clássicos, nos três anos de nível médio. O autor salienta a importância da formação do professor para este nível:

Isto implica em atualizar sua formação tanto na questão do conteúdo e das metodologias alternativas, quanto na discussão de posturas epistemológicas, apontando para a recuperação de concepções de interdisciplinaridade, da educação

multifocada e pluridimensionada, de modo que se analise a efetivação da diversidade de metodologias em ensino de Ciências”. (KARAN, CRUZ e COIMBRA, 2006, p.10)

A dissertação de mestrado “*Física moderna e contemporânea: com a palavra professores do ensino médio*”, apresenta uma sondagem feita com professores de Física das escolas estaduais de Curitiba e concluiu que:

[...]os professores se sentem inseguros para ensinar sobre Física Moderna e Contemporânea por não terem conhecimento suficiente sobre a temática, apontando para sua formação inadequada tanto nos cursos de Licenciatura quanto nas oportunidades de formação continuada, contrastando com o indicado nos trabalhos de pesquisa que mostram que os alunos têm maturidade para aprender sobre essa temática e indicam que para que a mudança de fato ocorra em sala de aula é preciso dar condições e subsídios para que os professores tenham conhecimento sobre os assuntos, sintam-se confiantes para ensinar e possam assim contribuir para a renovação curricular de Física solicitada nos documentos oficiais. (AGOSTIN, 2008, p.ii)

Com base na proposta da noção de perfil conceitual de referencial, de Ayala & Frezza (2007), foi feita uma leitura do artigo de Mortimer (1995) “*Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?*” Neste artigo o autor critica os pressupostos psicológicos e filosóficos das estratégias de ensino para mudança conceitual e propõe a noção de perfil conceitual como alternativa para a construção de estratégias de ensino e de análise da evolução conceitual. Segundo Mortimer, o perfil conceitual é uma noção relacionada ao ensino-aprendizagem de conceitos científicos, e parte do princípio de que um conceito pode ter uma diversidade de significados - dependendo do contexto. Na obra “*Linguagem e Formação de Conceitos no Ensino de Ciências*” (Mortimer, 2000), o autor apresenta e descreve a metodologia completa aplicada a alunos de oitava série do ensino fundamental, envolvendo o conceito de “atomismo”. Ele utiliza a noção de perfil epistemológico de Bachelard como base para estabelecer algumas zonas do perfil de um determinado conceito. Neste trabalho, o autor faz referência à analogia entre o mundo microscópico e o macroscópico como um obstáculo epistemológico para a aprendizagem do conceito de átomo. Segundo a perspectiva de perfil conceitual de átomo, ele propõe um perfil constituído pelas regiões: negação do atomismo, atomismo substancialista e atomismo clássico. Este modelo é adotado por Ayala & Frezza para o conceito de referencial, cujos obstáculos epistemológicos estão relacionados ao significado diferente que o conceito tem nas duas teorias.

Também foi feita uma busca na *web* por trabalhos que utilizaram a noção de perfil conceitual a fim de saber quais conceitos já foram estudados, e em que áreas. Alguns deles

foram abordados e usados na química, tais como energia, reações químicas, átomo, estados físicos da matéria, calor, espontaneidade, transformação. Outros foram usados na física, tais como energia, periodicidade, radiação, massa, força, luz e visão. O conceito de energia também foi usado na Bioquímica, e os conceitos de função e fração, na Matemática.

Concluimos que o modelo desenvolvido por Mortimer, e adaptado ao conceito de referencial por Ayala & Frezza, se mostra adequado para desenvolver estratégias didáticas com os alunos de licenciatura em Física. Este modelo deverá ser útil, também, para a aprendizagem dos demais conceitos envolvidos na TRR. Além disso, achamos oportuno que os estudantes participem desta estratégia de ensino, pois possivelmente poderão usá-la como futuros professores.

1.3. Pesquisa referente às novas tecnologias no Ensino de Física e relacionadas ao uso de animações

Inicialmente, foi feita uma busca na *web* por animações, simulações ou vídeos existentes que envolvessem, principalmente, os conceitos da TRR, pois estas situações envolvem experimentos de pensamento e, portanto, difíceis de serem entendidas pelos estudantes. Algumas idéias surgiram de animações em *flash* envolvendo sincronização, simultaneidade, dilatação do tempo e contração do comprimento, encontradas no *site Píon Ligado na Física* (<http://pion.sbfisica.org.br/pdc/>).

Posteriormente, a busca também se estendeu por artigos que envolvessem pesquisas no uso de simulações, animações ou hipermídia, em sala de aula, e que apresentassem argumentos que justificassem seu uso, assim como relatos dos benefícios.

O artigo “*Simulações Computacionais no Ensino de Relatividade Restrita*” (Felipe, Barroso & Porto, 2005), apresenta a elaboração de um curso para professores, incluindo 7 atividades com textos e algumas animações em *flash* interativas. Entre as animações, encontramos algumas envolvendo sistemas de referência e transformações de Galileu. A expectativa dos autores é de que as simulações proporcionem um mecanismo auxiliar na aprendizagem e que permita ao estudante visualizar os conceitos que não lhe são familiares, uma vez que percebem as dificuldades enfrentadas pelos professores. O material foi disponibilizado para professores em cursos de formação continuada em uma página da internet, www.if.ufrj.br/~marta/cederj/relatividade.

Outro artigo, “*Uso de Simuladores, Imagens e Animações como Ferramentas Auxiliares no Ensino/Aprendizagem de Óptica*” (Heckler, Saraiva & Oliveira, 2007) apresenta os resultados da implementação de um material didático hipermédia contendo texto, animações, figuras e simuladores. Os autores fazem uma referência ao uso das animações e simulações. Para eles, estas são consideradas como soluções para problemas enfrentados por professores na tentativa de explicar fenômenos abstratos. Além disso, são situações difíceis de representar por uma única figura e, neste aspecto, as animações permitem a visualização da evolução temporal do fenômeno, possibilitando ainda ao aluno a repetição sempre que desejar. Após a implementação, os autores concluíram que:

Conseguimos, através do material desenvolvido, apresentar os conteúdos de óptica de uma forma mais atraente e ilustrativa do que os simples exercícios propostos ou as meras descrições de fenômenos efetuadas na maioria das aulas tradicionais, propiciando assim o maior envolvimento dos alunos nas aulas de física. O uso de animações e simulações permitiu a abordagem de um número maior de fenômenos num intervalo de tempo menor e proporcionar uma realimentação imediata ao aluno. Ao analisarmos as opiniões de nossos alunos, percebemos que estes materiais vão ao encontro da realidade da grande maioria deles, proporcionando um ambiente de estímulo, motivação e envolvimento no processo de ensino/aprendizagem, fazendo com que os alunos participem ativamente da aquisição de informações e construção do conhecimento. E, um ponto muito positivo percebido com tais ferramentas, é que despertou um maior interesse pelas aulas de física na visão de 95% dos alunos. (HECKLER, SARAIVA & OLIVEIRA, 2007, p.273)

Em nossa pesquisa, nos deparamos com um contexto diferente, de justificar o uso de animações no ensino de ciências, sendo que esta foi feita por um profissional do *design*. No artigo “*Narrativa Visual: Arte e Ciência, unidas para representar um Novo Mundo*” (Zelada, 2002), o autor se refere à visualização de gráficos e de animações como elementos que estimulam a intuição, envolvendo a mente em um processo intenso de raciocínio e favorecendo a capacidade de compreensão. A nova maneira de representar conceitos é complementada pelo autor:

Mais do que uma simples junção no computador de imagens em movimento, textos e interatividade, tem-se uma representação da natureza situada na difusa zona de fronteira entre arte e ciência na forma de imagens, simulações e emulações. (ZELADA, 2002)

Um importante aspecto a ser discutido pode ser encontrado no artigo “*Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no ensino de Física*” (Medeiros, 2002). O autor aponta as considerações que devem ser feitas no uso destas ferramentas de ensino, de forma que fique claro para os estudantes que as simulações representam modelos, simplificações e idealizações da realidade, ou seja, de um mundo de fato complexo. Da mesma forma, é

preocupante o fato de poder haver confusão do real com o virtual, por motivo de aparências ilusórias e, o autor se refere ao conceito de modelo como:

Desta forma, uma parte crucial da aprendizagem da Física é fazer com que os nossos estudantes compreendam e apreciem o conceito de um modelo, o que eles significam, para que foram construídos, seus pressupostos simplificadores e seus limitados contextos de validade. (MEDEIROS, 2002, p.82)

Quanto às limitações, ele cita o fato de pesquisadores admitirem que equívocos na confecção de algum material deste tipo podem conduzir a pensamentos incorretos quanto à compreensão da natureza.

O autor prossegue comentando também sobre as possibilidades e vantagens do uso das simulações e, neste aspecto, concorda que o ensino de Física não é tarefa fácil, para muitos professores, por envolver um alto índice de abstração. Por este motivo, o autor fez uso do concreto, utilizando-se de imagens como complemento aos textos, à linguagem oral e à matemática. Os livros didáticos, por sua vez, fazem uso de fotografias estroboscópicas para ilustrar determinadas situações.

Através desta pesquisa bibliográfica, pode-se constatar que o trabalho que estamos propondo é original quanto ao tema e à metodologia escolhida e, frente aos problemas relatados com respeito à formação de professores, é também oportuno para ser aplicado a estudantes de licenciatura em Física.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica deste trabalho fundamenta-se na noção de perfil conceitual para o conceito de referencial (Ayala & Frezza, 2007), e também, na teoria de aprendizagem de Ausubel e na epistemologia de Bachelard.

Apesar da epistemologia de Bachelard não ter sido utilizada nos estudos que envolvem a mudança conceitual, os trabalhos de Mortimer (1995, 2000), onde ele propõe o modelo da noção de “perfil conceitual”, fundamentam-se naquela. O autor justifica o uso deste modelo no lugar da noção de perfil epistemológico (Bachelard, 1971, *apud* Mortimer, 2000) com a intenção de possibilitar a análise da evolução de idéias em sala de aula. O autor é a favor de que as concepções de senso comum não devam ser abandonadas, mas que devem conviver com as concepções científicas. Entretanto, cada aluno deve adquirir consciência de seu próprio perfil, o que favorece de maneira considerável o processo de ensino-aprendizagem. No que se refere à noção de perfil conceitual, Mortimer tem influenciado uma série de trabalhos para o estudo de diversos conceitos, em várias áreas científicas. Entre estes, está nosso trabalho, que utiliza a noção de perfil conceitual para o conceito de referencial com o objetivo de promover o aprendizado da TRR, como originalmente proposto em Ayala & Frezza (2007). Nesta perspectiva teórica, sabemos que a noção de sistema de referência é fundamental para a criação de modelos físicos, e que ela não envolve uma descrição única. Segundo os autores, o perfil conceitual de referencial é caracterizado por três regiões ontológica e epistemologicamente diferenciadas: a região do senso comum, a região da MN e a região da TRR. (AYALA & FREZZA, 2007)

Entre algumas características da região do senso comum, podemos destacar: a noção de movimento e referencial absolutos; a de que os movimentos são adquiridos e mantidos pela ação de alguma força; a de que um movimento é real ou aparente, dependendo do referencial adotado; que os movimentos não podem ser combinados, isto é, são absolutos. Na região da física newtoniana, os movimentos associados a um determinado sistema de referência, representado geralmente por eixos cartesianos ortogonais, são descritos a partir das posições e velocidades relativas dos corpos, podendo ser somados. Portanto, nesta região, o tempo e o espaço são absolutos, sendo que o espaço é identificado com o espaço da geometria euclidiana. Entretanto, no que se refere à TRR, a noção de referencial é completamente diferente do que acabamos de descrever. O espaço e o tempo não são mais considerados absolutos. A noção de evento, algum fenômeno físico ao qual podemos associar uma posição no espaço-tempo, passa

a ser de fundamental importância. Na TRR, os sistemas de referência também são formados por eixos cartesianos, porém acompanhados por um número infinito, em princípio, de observadores/sensores/medidores, cada qual munido de um relógio e de uma régua rígida, dispostos em cada ponto do espaço. Além disso, devido ao fato de que a velocidade da luz é independente da velocidade da fonte (como implica o segundo postulada da TRR), só é possível estabelecer um padrão único de tempo para um dado referencial. Desta forma, observadores em distintos referenciais, não concordarão quanto à ordem temporal dos eventos e quanto as suas medidas no espaço-tempo. (op. cit.)

Levando em consideração a análise das três regiões apontadas por Ayala & Frezza, as concepções alternativas descritas por Villani & Pacca (1987) e Scherr, Shaffer & Vokos (2000, 2001), entre outros, concluímos que estas situações podem ser consideradas obstáculos epistemológicos (Bachelard, 1971) à compreensão da TRR. Utilizando a noção de perfil conceitual de referencial e a Teoria da Aprendizagem Significativa, podemos entender o surgimento destes obstáculos. Nesse sentido, Ausubel (1968, 1978, 1980, *apud* Moreira, 1999) ressalta que novas idéias podem ser aprendidas e assimiladas, porém sempre ancoradas no conhecimento prévio que o aluno já traz consigo no início do aprendizado. Uma das condições para a *aprendizagem significativa* é que haja uma interação entre a nova informação e algum aspecto específico da estrutura de conhecimento existente, ou seja, parte da necessidade dos chamados *subsunçores*, que devem estar presentes na estrutura cognitiva do aprendiz. No entanto os resultados apresentados em (Ayala & Frezza, 2007) mostram que a maioria dos alunos, mesmo aqueles que já cursaram disciplinas introdutórias a TRR, não desenvolveram a região relativística do seu perfil de referencial, ou em outras palavras, não desenvolveram os subsunçores necessários para realizar a ancoragem dos conceitos relativísticos. Sendo assim, os obstáculos epistemológicos podem ter origem na tentativa de ancorar os novos conceitos da TRR em noções oriundas da MN ou mesmo da região do senso comum. (op. cit.)

Além dos obstáculos epistemológicos citados por Ayala & Frezza, procuramos descrever os principais conceitos da epistemologia de Bachelard buscando fundamentação sobre outros possíveis obstáculos ao aprendizado desta teoria. Nesse sentido, essa busca foi por obstáculos que pudessem ser produzidos pelo próprio material instrucional.

No que se refere à teoria de Ausubel, sabemos que esta nos permite verificar como o aluno pode compreender determinado conceito e de que maneira ocorre o processo de transformação, organização e fixação do mesmo. Para que ocorra tal processo, uma das

condições é que o material instrucional utilizado deve ser *potencialmente significativo*, e neste sentido, o tipo de material desenvolvido e usado com os alunos envolvidos neste trabalho seguiu essa idéia. Fazem parte deste material, modelos produzidos por modelagem computacional (*software Modellus*), que apesar de servirem somente de ilustração para discussão dos conceitos, serão disponibilizados para o aluno após a discussão em sala de aula. Desta forma, o aluno pode ter acesso aos modelos, podendo, assim, explorá-los segundo sua própria vontade e em seu ritmo pessoal, e verificar que eles possuem significado lógico. Entretanto, além dessa condição, é necessário que o aluno, ao explorar os modelos, faça uma reflexão sobre eles levando em conta a teoria científica que embasa sua construção. Consideramos que o uso de modelos segue a base construtivista desta teoria de aprendizagem. No entanto, além do material ser potencialmente significativo, o aluno deve estar disposto a aprender, constituindo assim, as duas condições necessárias para se obter uma aprendizagem significativa.

A partir daí, procuramos destacar os conceitos mais importantes da teoria de Ausubel e da epistemologia de Bachelard.

2.1. Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel

Na década de 1960, David Ausubel (1918-2003) propôs a sua Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), onde considera a aprendizagem de significados ou de conceitos como a mais relevante para os seres humanos.

Moreira (1999), autor do livro “*Teorias de aprendizagem*”, apresenta, entre outras, esta teoria de aprendizagem, a qual está baseada na aprendizagem cognitiva e no construtivismo. Por sua vez, esta aprendizagem está relacionada ao conjunto de informações que são armazenadas de forma organizada na mente do aprendiz, formando, assim, sua estrutura cognitiva.

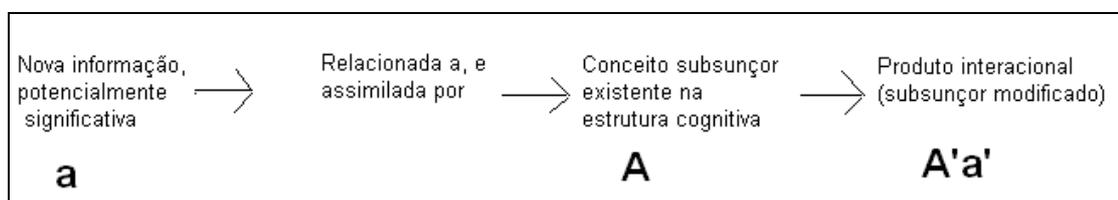
O processo da *aprendizagem significativa* parte da necessidade de *subsunções* relevantes já existentes na estrutura cognitiva, quer por recepção ou por descoberta. Segundo esta teoria, a aprendizagem é significativa se a nova informação for armazenada na estrutura cognitiva de forma não- arbitrária e não-literal. A aprendizagem significativa contrasta com a aprendizagem mecânica (automática), a qual quase não tem ou tem pouca ligação com conceitos existentes; ou seja, o conhecimento adquirido é completamente novo e armazenado

de forma arbitrária, sem interação com a informação já anteriormente armazenada. Na inexistência de subsunçores na estrutura cognitiva do aluno, os chamados *organizadores prévios* têm esta função, os quais devem ser *materiais potencialmente significativos*. Tais conceitos são os mais relevantes da teoria de Ausubel e são considerados facilitadores de uma aprendizagem significativa. Eles devem estar vinculados a pontos específicos do que se deseja ensinar, relacionando o que o aluno já sabe com o que ele deveria saber. Da mesma forma, os subsunçores devem cumprir seu papel na função cognitiva, fator que tem muita influência no processo de aprendizagem. (MOREIRA, 1999)

Os testes de compreensão escolhidos para serem aplicados neste trabalho devem possibilitar, de acordo com Ausubel, a evidência de uma aprendizagem significativa. Para que possa ser verificada esta possibilidade, entendemos que esses testes devam ser formulados de maneira diferenciada dos testes preliminares. (op.cit.)

Ausubel apresenta três tipos distintos de aprendizagem significativa: a *aprendizagem representacional*, que envolve significados de símbolos que representam objetos, eventos ou conceitos; a *aprendizagem de conceitos*, que é representacional e envolve símbolos particulares que representam conceitos e abstrações; e a *aprendizagem proposicional*, que implica aprender palavras combinadas em uma sentença, a qual representa um conceito. (op.cit.)

O conceito utilizado por Ausubel para explicar o processo de aquisição e organização dos significados é a *assimilação*. Utilizaremos um esquema elaborado por Ausubel para explicar a aprendizagem e a sua retenção: (op. cit.)



Moreira explica que esta síntese representa o processo de assimilação, tendo este um papel importante como facilitador de retenção de a'. Antes disso, o produto A'a', por certo intervalo de tempo, fica separado em A' e a', e é por essa razão, que favorece a retenção de a'. No entanto, a tendência reducionista da organização cognitiva do aprendiz faz com que seja mais simples reter idéias mais gerais do que aquelas produzidas por assimilação. É neste processo que Ausubel introduz a *assimilação obliteradora*, constituindo-se no segundo estágio

de assimilação da aprendizagem significativa. É neste estágio que A'a' se reduzem a A', considerado por ele o fator mais estável do produto A'a', pois as idéias-âncora (subsunçores) não se apresentam mais de forma individual e, portanto, A' constitui-se em um subsunçor modificado.

Outros conceitos relevantes para entender o processo de aprendizagem dizem respeito às aprendizagens *subordinada*, *superordenada* e *combinatória*. Resumidamente, procuramos descrever estes conceitos segundo a visão de Moreira e, nesse sentido, ele explica que para Ausubel, uma aprendizagem *subordinada* pode ser identificada quando há uma interação da estrutura cognitiva pré-existente com o novo material apresentado, porém o novo conhecimento relaciona-se de maneira inclusiva ao conhecimento anterior. O termo *superordenada* está relacionado ao fato de um conceito ou proposição ser potencialmente significativo, ou seja, passa a abranger vários conceitos, proposições e idéias já existentes, enquanto o termo, *combinatória*, é usado quando a aprendizagem de conceitos ou proposições tem uma relação de subordinação com conteúdos de forma ampla, ou seja, devem estar relacionados à estrutura cognitiva como um todo. Como principais princípios da teoria da aprendizagem significativa, os conceitos de *diferenciação progressiva e reconciliação integrativa* também devem ser discutidos. O primeiro está relacionado à aprendizagem significativa subordinada, e pode ser identificado quando um novo conceito, aprendido por subordinação, sofre uma interação e ancora-se no subsunçor, fazendo com que este se modifique. Em outras palavras, diz respeito a que conteúdo deve ser ensinado. Este deve ser organizado de tal forma que as idéias mais gerais sejam apresentadas antes, devendo ser progressivamente diferenciadas. O segundo princípio está relacionado à programação do conteúdo a ser ensinado, que deve ser feita de modo a relacionar diferentes idéias, apontando similaridades e diferenças entre elas. Como consequência da aprendizagem superordenada, as novas informações adquiridas e os elementos já existentes se organizam para constituir novos significados, e essa recombinação recebe, por Ausubel, a denominação de *reconciliação integrativa*.

No processo instrucional, o autor ressalta que Ausubel considera como principal fator da aprendizagem significativa a influência dos conteúdos na estrutura cognitiva do aprendiz. Esta influência pode ocorrer de duas maneiras: (1) *substantivamente*, devido à apresentação de conceitos ao estudante com maior abrangência; e (2) *programaticamente*, pela apresentação de

métodos adequados na organização dos conteúdos do ensino. Moreira explica com as palavras do próprio Ausubel:

Uma vez que o problema organizacional substantivo (identificação dos conceitos organizadores básicos de uma dada disciplina) está resolvido, a atenção pode ser dirigida para os problemas organizacionais programáticos envolvidos na apresentação e organização seqüencial das unidades componentes. Aqui hipotetiza-se que vários princípios relativos à programação eficiente do conteúdo são aplicáveis, independentemente da área de conhecimento. (AUSUBEL, 1978, *apud* MOREIRA, 1999, p.161)

Discutimos anteriormente dois dos princípios fundamentais da teoria de Ausubel. No entanto, outros também são considerados importantes: os conceitos de *organização seqüencial* e de *consolidação*. Sobre estes, a teoria de Ausubel nos leva a concluir que a introdução de novos materiais depende do entendimento prévio de algum tópico relacionado, ou seja, de haver uma dependência seqüencial natural em cada disciplina. Os conceitos a ela relacionados devem obedecer a uma estrutura organizada em certa ordem, não esquecendo jamais que as idéias-âncora relevantes são fundamentais para a aprendizagem significativa e a retenção. (op. cit.)

Para a facilitação da aprendizagem significativa, o papel do professor é considerado fundamental em vários pontos. Podemos citar quatro deles:

1. Identificar e organizar os conceitos em uma ordem hierárquica de modo que avance dos menos relevantes para os mais relevantes;
2. Identificar que subsunçores estão relacionados, e quais são relevantes à aprendizagem do conteúdo;
3. Diagnosticar aquilo que o aluno já sabe e identificar que conceitos já estão presentes na sua estrutura cognitiva;
4. Ensinar e utilizar recursos que facilitem a formação da estrutura conceitual do conteúdo a ser aprendido. Considerar a estrutura cognitiva do aluno no início da instrução e, se a mesma não for adequada, elaborar os organizadores prévios se faz necessário.

Moreira nos dá uma visão mais geral sobre as pesquisas realizadas envolvendo os organizadores prévios, e apresenta o termo pseudo-organizador prévio. Tais pesquisas concluem que estes materiais não são, de fato, tão facilitadores se o aprendiz não tem conhecimentos prévios e/ou não está disposto a aprender. Nesta perspectiva, como os alunos envolvidos neste trabalho são estudantes do curso de licenciatura em física e serão futuros professores, contamos com ambos os requisitos. (op. cit.)

Os conceitos envolvidos nesta teoria de aprendizagem constituem um suporte forte tanto para o desenvolvimento do material didático quanto para sua aplicação. A preocupação em sua fase de construção consistiu em torná-lo um material potencialmente significativo, colaborando para uma aprendizagem significativa dos conceitos envolvidos. Nesta perspectiva, para os conceitos abordados na noção de referencial na MN e na TRR, a teoria de Ausubel mostra-se adequada para a organização da estrutura cognitiva do aluno. Entretanto, existe ainda outra preocupação, relacionada aos conceitos envolvidos, pois ao mesmo tempo em que a MN é considerada um subsunçor para o aprendizado da TRR, ela pode também se constituir em um obstáculo, porque o conceito de referencial deve ser solidamente diferenciado nestas duas teorias. Por esta razão, nos valem também da epistemologia de Bachelard para poder identificar, compreender e tentar ultrapassar tais obstáculos.

2.2. Epistemologia de Gaston Bachelard

Gaston Bachelard (1884-1962), filósofo francês, tinha origem campesina e teve a oportunidade de passar, na virada do século XIX para o século XX, da região do campo para uma Paris industrializada. Foi um filósofo de múltiplas filosofias, marcado por mudanças bruscas em sua trajetória. Por essa razão tem como principal característica uma relação dialética entre as várias visões de mundo.

No artigo “*Bachelard o Filósofo da Desilusão*”, Lopes (1996) descreve as trajetórias deste filósofo e que nos levam a conhecer a origem de suas características pluralistas:

[...] Trabalhou, assim que se fez bacharel, na administração dos Correios e Telégrafos, com o cuidado administrativo de pesar as cartas, vivência que lhe conferiu o traço empirista de seu perfil epistemológico para o conceito de massa, como destaca em *A Filosofia do Não*. Após ver frustrado, pela Primeira Guerra, seu interesse de se tornar engenheiro, ingressou no magistério secundário. Trabalhou, então, como professor de ciências e de filosofia em sua terra natal (Bar-sur-Aube). Aos quarenta e quatro anos publicou suas primeiras teses: *Ensaio sobre o conhecimento aproximado* e *Estudo sobre a evolução de um problema de física, a propagação térmica nos sólidos* (ainda não publicados em português). Em 1930, ingressou na Faculdade de Letras de Dijon e em 1940, na Sorbonne. Essa multiplicidade de projetos em sua vida profissional tem seu paralelismo com a pluralidade de suas idéias filosóficas e com a vivacidade de um pensamento resistente às classificações e aos rótulos. Quando se pensa em entendê-lo como idealista, por sua crítica incisiva ao realismo, tem-se que retificar o pensamento, ao se compreender sua análise sobre o papel constitutivo da técnica frente à razão. Quando se pensa, então, ser ele um materialista, surpreendemo-nos com seu eixo de construção do conhecimento: do racional ao real. Como ele mesmo afirmou, de certa forma respondendo aos que tentavam defini-lo como racionalista: *Racionalista? Tentamos tornar-nos isso, não apenas no conjunto de nossa cultura, mas nos detalhes de nossos pensamentos, na ordem pormenorizada de nossas imagens familiares.* (LOPES, 1996, p.248)

No entanto, Lopes ressalta que Bachelard manteve-se igualmente crítico em relação ao materialismo e ao idealismo, construindo uma epistemologia com bases históricas. Dessa forma, o filósofo considera que só é possível uma reflexão crítica sobre a produção dos conceitos se nos apoiarmos sobre a história das ciências. Canguilhem (1994, *apud* Lopes, 1996, p.250), um dos filósofos seguidores da filosofia de Bachelard, se refere à história das ciências, filosoficamente questionada, como de suma importância para o surgimento de uma epistemologia. Nesse sentido, o autor, compara o chamado “o outro lado”, “a ciência da ciência” ou a epistemologia tradicional, dos empiristas lógicos, de Popper e Lakatos, com a epistemologia histórica. Dessa forma:

A epistemologia histórica nos faz questionar a possibilidade de definirmos de forma definitiva e universal o que é ciência. Nesta perspectiva, ciência é um objeto construído socialmente, cujos critérios de cientificidade são coletivos e setoriais às diferentes ciências. (LOPES, 1996, p.251)

A filosofia de Bachelard nos proporciona duas ferramentas de análise de um determinado tema científico, que são: o *espectro epistemológico* e o *perfil epistemológico*.

O *espectro epistemológico* é apresentado em “*Bachelard Epistemologie - textes choisis*”, que foi traduzido, do francês para o português, com o título de “*Epistemologia*” (1971, *apud* Moreira, 2005, p.1). Trata-se de uma das ferramentas de análise de conceitos científicos que permite desdobrar, em uma ordem linear, diversas filosofias em torno de um trabalho de produção do conhecimento científico. Esta ferramenta pode ser representada resumidamente da seguinte maneira:

Partindo do racionalismo aplicado e do materialismo técnico, podem-se seguir dois caminhos: o caminho do formalismo, indo ao até o convencionalismo e deste ao idealismo (ingênuo); ou, então, o caminho do positivismo, deste ao empirismo e indo até o realismo (ingênuo). Dessa forma, Bachelard define a filosofia da Ciência como pluralista e aberta, pois seus princípios não são intocáveis e suas verdades não são totais e acabadas. Na ciência, principalmente, ele defende uma relação *dialética entre o racionalismo e o realismo*.

O *perfil epistemológico* é caracterizado por noções pessoais, pois depende da cultura pessoal de quem pretende estudar os conceitos envolvidos. Sendo assim, cada indivíduo deve traçar um perfil epistemológico diferente para cada conceito científico. Além disso, o perfil confronta-se com rupturas históricas com as quais o conhecimento científico deparou-se até chegar ao que conhecemos hoje. Um exemplo de perfil epistemológico de noção pessoal de

massa é apresentado em Bachelard (1971, *apud* Moreira, 2005, p.4). Esta ferramenta permite avaliar a ação de diversas filosofias na construção do conhecimento científico de um estudante, sendo apresentada em níveis ou bandas, conforme maior ou menor ocorrência de uma postura filosófica. Ela pode ser útil para explicar o funcionamento deste instrumento de análise e também de compreensão do modelo de perfil conceitual. Bachelard (1984, *apud* Mortimer, 2000, p.74) explica cada uma das bandas deste perfil, apresentando como exemplo, a noção de perfil de massa, representado na figura 1.

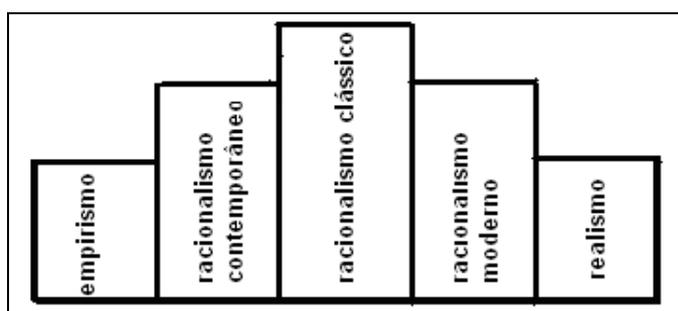


Figura 1- Perfil epistemológico de massa

Assim, em um mesmo nível e, em mesma ordem de frequência crescente, estão o realismo ingênuo e o empirismo claro. O realismo ingênuo representa o senso comum e o empirismo claro e positivista está relacionado a uma determinação objetiva e precisa (utilização de balança). Em mesmo nível, mas em maior frequência do que os primeiros estão o racionalismo moderno, que apresenta a massa sob uma visão relativística, e, o racionalismo contemporâneo, que se refere à mecânica quântica de Dirac. A seguir, o nível predominante é o racionalismo clássico da mecânica racional, assim denominado por ser analisado com as regras lógicas da aritmética ($m = F/a$). Por este motivo, o filósofo nos chama a atenção para o fato de que somente uma postura filosófica não pode explicar tudo, sendo necessário agrupar outras para obter o conhecimento completo. (MOREIRA, 2005)

Lopes (1996) destaca a importância das obras de Bachelard para professores e pesquisadores em ensino de ciências. Entre estas, estão os livros dedicados à Física (*La actividad racionalista de la física contemporánea*) e à Química (*Le pluralisme cohérent de la chimie moderne* - ainda não traduzido em português - e *Le matérialisme rationnel*). A trajetória do filósofo como professor, especialmente na escola secundária, fez com que ele se ocupasse com o ensino.

Um dos conceitos importantes propostos por Bachelard consiste na concepção do *Novo espírito científico*, que tem como objetivo enfrentar os obstáculos epistemológicos - entre os

quais o senso comum - que impedem o progresso da ciência. Em uma obra de 1938, *La formation de l'esprit scientifique*, Bachelard se refere à necessidade dos professores conhecerem as idéias prévias dos alunos (anteriores ao processo de ensino) e afirma que muitas delas estão relacionadas aos obstáculos pedagógicos, que fazem com que o professor não “entenda porque o aluno não compreende”. É neste aspecto que nosso trabalho se aproxima da visão de Bachelard. (op.cit.)

Na obra “*A Filosofia da Desilusão*” Bachelard considera o erro e sua posterior retificação como de fundamental importância para a construção do conhecimento científico. Ou seja, as verdades só têm sentido após terem gerado uma polêmica e uma conseqüente retificação dos erros. Neste sentido, em um processo racional crescente de afastar os erros e alargar o conhecimento, ocorre o progresso científico. Lopes comenta a respeito:

Em outras palavras, a ciência é o processo de produção da verdade, é o trabalho dos cientistas - os trabalhadores da prova - no processo de reorganização da experiência em um esquema racional.
[...] Mas a lógica da verdade atual da ciência não é a lógica da verdade de sempre: as verdades são sempre provisórias (op. cit., p.253)

Bachelard se situa como o filósofo da desilusão (1970, *apud* Lopes, 1996, p.254), aquele que afirma “*somos o limite das nossas ilusões perdidas*”, o que para o autor é mais uma definição de ciência.

Ainda a respeito dos erros, uma importante concepção da filosofia de Bachelard está presente na ruptura entre o conhecimento comum e o conhecimento científico, no caso do ensino das ciências físicas. Para o filósofo, é preciso ir além das aparências, pois o aparente é uma fonte sistemática de enganos e de erros. Desta forma, superando os erros, o conhecimento científico vai se estruturando e rompe com o que se pensava conhecer previamente. Nesta perspectiva, Lopes, ao citar as considerações de Canguilhem (1972), afirma que “[...] *para Bachelard, a ciência não captura o real, ela indica a direção e a organização intelectual, segundo as quais nos asseguramos que nos aproximamos do real*”. (op.cit., p.259) Existe aí uma idéia que nos leva a diferenciar o que é “ciência” do que é “senso comum”. Nesse sentido, podemos entender que, para o senso comum, a realidade está relacionada aos sentidos, que por sua vez identificam e caracterizam o real aparente. Portanto, deve ser a partir do rompimento com esse conhecimento comum que se constituirá o conhecimento científico.

Destacando ainda outras relações entre o senso comum e o conhecimento científico, Lopes aponta que Bachelard (1972), em seus últimos trabalhos, introduziu a idéia de descontinuidade na cultura científica através das *noções de recorrência histórica, da concepção de ruptura e de racionalismo setorial*. As *noções de recorrência histórica* estão relacionadas ao fato de que a história dos fatos, tanto na experimentação quanto na conceituação científica, deve ter uma relação com os valores científicos recentes. Complementando, Lopes explica que:

Por isso, a história do desenvolvimento dos fatos deve vir acompanhada da história do desenvolvimento dos valores racionais, valores esses que se constituem a partir de um racionalismo abrangente: o valor de uma idéia não depende apenas da idéia em si, mas da relação desta idéia com a clareza de outras idéias. (op. cit. p. 257)

A *concepção de ruptura* refere-se a uma relação entre conhecimento comum e o conhecimento científico, e é a partir daí que os *obstáculos epistemológicos* são constituídos, ou seja, no decorrer do próprio desenvolvimento científico. Portanto, para o filósofo isto configura a *Filosofia do Não*. Nesta filosofia, não existe um contínuo racional na história do conhecimento científico. Por exemplo, a física relativística diz não à física newtoniana; a geometria de Lobatchevsky diz não à geometria euclidiana; a química quântica diz não à química de Lavoisier. Entretanto, não se trata de abandonar as teorias anteriores, pois as novas teorias constituem outra visão. Nesse sentido, a física relativística pode ser compreendida através de novos conceitos que, até então, não eram usados na física newtoniana. Sendo assim, a filosofia da ciência convive com *racionalismos setoriais*, introduzidos por Bachelard. Em oposição a esta concepção de mundo, está a visão dos continuístas, e, por isso, o filósofo analisa a idéia de progresso contínuo do saber, concebido por eles. Para estes, os progressos científicos sempre foram muito lentos, podendo-se dizer que são uma transformação lenta do conhecimento comum. (op.cit.)

Além dessas considerações tomadas da referência Lopes (1996), temos uma observação feita por Bachelard, que para este trabalho é de suma importância. Trata-se da realidade de um objeto que pode ser tocado, ou seja, que tem formas visíveis a olho nu e ocupa um espaço bem definido em comparação a uma molécula, por exemplo. Estas não podem ser tomadas como idealizações ou abstrações, e sim entendidas como pertencentes a outro tipo de realidade, a do ponto de vista microscópico. Por isso, só podem ser medidas por instrumentos adequados, que para Bachelard, constituem novos órgãos de sentido. Sendo assim, Bachelard cita o conceito de *fenomenotécnica*:

É preciso haver outros conceitos além dos conceitos 'visuais' para montar uma técnica do agir-cientificamente-no-mundo e para promover a existência, mediante uma fenomenotécnica, fenômenos que não estão na natureza. Só por uma desrealização da experiência comum se pode atingir um realismo da técnica científica. (BACHELARD, 1986, apud LOPES, 1996, p.260)

A definição do conceito de fenomenotécnica foi dada pela primeira vez, por Bachelard, em *Le nouvel esprit scientifique* (1938), e é a partir daí que a ciência contemporânea começa estar presente em suas obras. Mais uma vez ele compara o conhecimento comum ao conhecimento científico, no sentido de que o primeiro lida com um mundo constituído por fenômenos. Já o conhecimento científico é estruturado por uma *fenomenotécnica*, e este parte de um mundo sempre recomeçado. É neste aspecto que Bachelard introduz o conceito de *psicanálise do conhecimento objetivo* e afirma que o conhecimento comum é um obstáculo epistemológico ao conhecimento científico (op.cit.).

Sob outro ponto de vista, Lopes explica que a primeira utilização do termo *psicanálise* foi feita por Bachelard em *La formation de esprit scientifique*. Nesta época a psicanálise não possuía prestígio no meio universitário da França e, por isso, o termo foi usado como certa provocação. Segundo a concepção da psicanálise, as imagens são elementos que mascaram a realidade, porém Bachelard defende a imagem do ponto de vista da imaginação, ou seja, em outra obra (1989) citada por Lopes, o filósofo valoriza a imaginação como a capacidade de formar imagens além da realidade, considerando como válida apenas para o campo da poesia. Já no campo da ciência, ele contrapõe ao que ele chama de *ocularidade*, uma imaginação formal que se fundamenta na visão. Sendo assim, ele diz que não devemos aplicar à ciência uma imaginação de fantasias e da mesma forma, no campo da poesia, a imaginação não deve tornar-se científica em prejuízo dos devaneios. Apesar de valorizar o pensamento científico abstrato, apontando a experiência imediata como fonte de um obstáculo ao processo dessa abstração, ele defende as boas imagens, mesmo reconhecendo que o uso excessivo de analogias, metáforas e imagens, podem constituir-se em obstáculos. Lopes cita a obra onde Bachelard (1970) faz referência às boas e más imagens, as indispensáveis e as prejudiciais, sendo que as boas imagens são úteis para representar um mundo que não se vê, porém devem ser entendidas por meios matemáticos e de compreensão racional das leis. As críticas às metáforas e ao uso de imagens tornaram-se um traço marcante à sua epistemologia. (op.cit.)

De forma resumida, procuramos descrever outros obstáculos na formação do *espírito científico*. O primeiro deles é constituído pela *experiência primeira*, uma crítica ao empirismo, ou seja, um pesquisador, ao olhar um objeto de estudo que faz parte de seu contexto social,

pode se deixar levar pelo que lhe é visível, dando a este um caráter de verdade que ele não tem. Outro obstáculo citado por Bachelard é o *substancialismo*, ou realismo substancialista, que pode ser provocado pelo uso das imagens ou pela atribuição de qualidade aos fenômenos; e cita como exemplo a teoria de Boyle, que atribuía qualidades como viscosidade, untuosidade e tenacidade ao suposto fluído elétrico, como se a eletricidade fosse uma cola, ou ainda, como se tivesse um espírito material (Gomes & Oliveira, 2007). Ele também classificou como obstáculo, o *animismo*, que significa atribuir vida à matéria, podendo-se tomar como exemplo imaginar um fluido elétrico como matéria viva. Particularmente, as noções de corpúsculo e coisa (“coisismo”), choque (“choquismo”) na explicação de fenômenos também podem constituir obstáculos. (BACHELARD 1971, *apud* MOREIRA, 2005, p.7-8)

Quanto à superação dos obstáculos epistemológicos, Lopes afirma que:

Nesse sentido, os obstáculos epistemológicos nunca são definitivamente superados, uma vez que o espírito científico sempre se apresenta com seus conhecimentos anteriores; nunca é uma tábula rasa. E amalgamados aos conhecimentos, estão os preconceitos, as imagens familiares, a certeza das primeiras idéias. (LOPES, 1996, p.265)

Lopes faz várias considerações importantes sobre a contribuição de Bachelard ao ensino de ciências. Neste sentido, ele afirma, por exemplo, que nós, professores, devemos estar sempre atentos para os possíveis obstáculos epistemológicos à aprendizagem, buscando superá-los através do emprego de metodologias adequadas aos casos específicos. Além de todos os obstáculos apontados por Bachelard, a atenção deve ser redobrada, no processo de ensino-aprendizagem, para que não haja um reforço desses obstáculos. Outro aspecto relevante se refere ao conhecimento comum, presente em todos os indivíduos, o qual sofre profundas influências do meio social e, por sua vez, influencia a formação do conhecimento científico. Por isso, Bachelard considera que aprender a lógica da ciência não é conciliável com o conhecimento comum. Sendo assim, o conhecimento comum deve ser investigado tanto nos alunos como no próprio professor.

3. METODOLOGIA

Nesse capítulo apresentamos em detalhes o motivo da escolha do tema, da metodologia para o ensino-aprendizagem, assim como do público alvo. A idéia central é que a aprendizagem da TRR esteja associada a quatro objetivos específicos:

- 1- A explicitação das noções de referencial dos alunos, procurando estabelecer a sua posição no perfil;
- 2- A promover da consciência de cada aluno sobre a sua noção de referencial;
- 3- A promoção da consolidação da região newtoniana do perfil;
- 4- O desenvolver de uma nova região do perfil conceitual de referencial associada à Teoria da Relatividade Restrita.

Para atingir estes objetivos e ultrapassar os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da TRR, devem ser desenvolvidas estratégias didáticas e, para isso, é necessária a elaboração de um material instrucional.

A intenção, conforme o referencial teórico de Ausubel, é que o material instrucional elaborado seja *potencialmente significativo* para o aprendizado do conteúdo envolvido. Desta teoria também utilizamos a ferramenta constituída pelos *organizadores prévios*. Neste sentido, a elaboração de textos e da seqüência de pré e pós- testes seguiram esta idéia. Por outro lado, ao construir as animações, que fazem parte do material instrucional, tivemos a preocupação com o uso das imagens no processo cognitivo dos estudantes. As animações devem ser facilitadoras da aprendizagem, porém não devem ser instrumentos para o desenvolvimento de novos obstáculos epistemológicos, segundo a epistemologia de Bachelard. Também seguimos as idéias deste filósofo quando decidimos utilizar a *noção de perfil conceitual* para investigar as concepções prévias dos alunos sobre os conceitos envolvidos. A idéia central é desenvolver uma estratégia de ensino para que o estudante tome consciência de suas próprias noções a respeito do conceito de referencial. A intenção é que essas noções - reveladas nas respostas aos testes – não sejam totalmente abandonadas, e sim diferenciadas daquelas que são cientificamente aceitas, a fim de que possam ser utilizadas em contextos apropriados.

3.1. Planejamento do curso

A opção por este tema está relacionada à inserção da FM&C no Ensino Médio, sendo que entre os diversos conteúdos encontra-se a TRR. Partindo daí, a escolha do tema foi inspirada

pela leitura do artigo Ayala e Frezza (2007). Neste artigo, os autores apontam a existência de um problema com o aprendizado desta teoria, fortemente relacionado ao conceito de referencial e às noções de senso comum e newtonianas. Como já mencionamos anteriormente, a bibliografia estudada propõe a noção de perfil conceitual para o conceito de referencial.

Com o propósito de entender a noção de perfil conceitual, iniciamos com leituras dos trabalhos de Mortimer (1995, 2000), que propõem a construção de estratégias de ensino para trabalhar o conceito de atomismo. Na obra “*Linguagem e formação de conceitos no ensino de ciências*”, Mortimer (2000), baseando-se em resultados de pesquisa (Mortimer, 1995), propõe categorias para um perfil conceitual de átomo. Ele definiu as três zonas do perfil para este conceito: a primeira relaciona-se à concepção contínua da matéria; a segunda é substancialista; e a terceira corresponde à noção clássica (partícula material). Considera o estabelecimento das características, ontológicas e epistemológicas, das zonas do perfil, como sendo fundamental para o planejamento de uma estratégia de ensino. Além disso, destaca o papel do professor no sentido de identificar os obstáculos à aprendizagem, explicitar sua existência e discutir as dificuldades de superação das dificuldades. Ele avalia como de suma importância a tomada de consciência, pelo estudante, do seu próprio perfil e compara ao que chamam de metacognição. (White & Gustone, 1989, *apud* Mortimer, 2000) Na mesma obra, o autor apresenta uma metodologia de pesquisa e de coleta de dados e planeja atividades de ensino para a aplicação do perfil conceitual em sala de aula para estudantes de 8ª série. O objetivo do trabalho foi detectar e descrever a evolução das explicações atomistas para os estados físicos da matéria, utilizando-se, para isto, de pré e pós-testes. Essa leitura foi muito importante tanto para o planejamento dos testes quanto para a coleta e a análise dos dados sobre as concepções a serem apresentadas pelos alunos.

Quanto à escolha do público alvo para aplicação do material didático, em um curso, optamos por dar preferência a estudantes de licenciatura em Física. É a partir destes que podemos conseguir que os conteúdos de FM&C sejam levados às salas de aula do Ensino Médio. Sabemos que os currículos atuais pouco contemplam tais conteúdos, e uma das possíveis causas é que a formação dos professores se apresenta com falhas quanto a este conhecimento.

Inicialmente, recebemos apoio do professor responsável pela disciplina de Introdução à Teoria da Relatividade e do Colegiado do Curso de Física da UFPel, permitindo, assim, que fosse possível planejar a primeira aplicação do curso para os alunos da disciplina de

Instrumentação para o Ensino de Física I, no primeiro semestre de 2009, para 4 alunos. Poderíamos contar com sete encontros (dois por semana), totalizando catorze horas /aula. Esses alunos tinham como conhecimentos prévios as quatro físicas básicas, mas ainda não tinham conhecimentos mais profundos sobre a Teoria da Relatividade (com exceção de uma aluna que estudava esta teoria na Iniciação Científica). Para estes estudantes, o curso pode ser considerado como introdutório à disciplina de Introdução à Teoria da Relatividade, obrigatória no currículo destes.

Para que pudéssemos contar com mais resultados da aplicação do material didático e também sobre a metodologia, buscamos o apoio de um professor de física da FURG (Universidade Federal do Rio Grande). O curso, então, seria aplicado a 11 alunos formandos do curso de Licenciatura em Física na disciplina de Atividades de Ensino de Física III, no segundo semestre de 2009. Poderíamos contar com seis encontros (um por semana) totalizando doze horas/aula. Os alunos desta turma já haviam tido contato com alguns conceitos da TRR, juntamente com disciplinas que envolvem física moderna. A disciplina de TRR não é obrigatória no currículo deles.

3.2. A elaboração do material instrucional

3.2.1. O texto

O material didático é constituído por um texto versando sobre a noção de referencial na mecânica newtoniana e na relativística. A partir da elaboração deste texto, foi possível estudar os conceitos e revisar as equações matemáticas envolvidas nas duas teorias. Para isso, foram utilizadas diversas referências bibliográficas tais como livros didáticos e artigos encontrados na *web*. Entre as mais utilizadas estão os livros didáticos Tipler (1995), Resnick, Halliday & Krane (2004) e Halliday, Resnick & Walker (2007). Neste sentido, elaboramos o texto a partir de conceitos que pudessem envolver a noção de referencial desde a mecânica newtoniana /galileana, através de uma evolução histórica, até os conceitos hoje aceitos pela ciência - estes propostos por Einstein. É opcional, para o professor, o uso do texto contendo a parte conceitual dos temas tratados com os alunos, embora ele possa servir de apoio na exposição dos conteúdos em cada atividade. Com este texto, juntamente com os demais materiais, espera-se obter o desenvolvimento de atividades acerca das noções de referencial e observador na TRR. Os tópicos seguintes devem ser abordados no decorrer das atividades desenvolvidas com os alunos e são apresentados no capítulo 4.

1. A Relatividade galileana /newtoniana

2. Mecânica Relativística- A TRR

2.1. Os Postulados de Einstein

2.1.1. Conseqüência dos Postulados

2.2. A noção de referencial e a construção das noções de contração do comprimento e de dilatação temporal

2.3. A relatividade da sincronização de relógios

2.4. A relatividade da noção de simultaneidade

3.2.2. Os testes

Segundo Mortimer (2000), para que se possa avaliar uma evolução conceitual, são necessários testes que antecedam ao ensino, buscando desta forma revelar as concepções dos alunos sobre determinado assunto. Resultados apresentados por Ayala & Frezza (2007) evidenciam que, na mecânica galileana, o conceito de referencial pode resultar em obstáculo ao aprendizado da cinemática da TRR. Levando em consideração estas duas referências, optamos em começar as atividades por pré-testes sobre mecânica galileana/newtoniana com o objetivo principal de identificar a noção de referencial, envolvido nesta teoria, na estrutura cognitiva destes alunos. Os pré-testes foram aplicados antes de cada conteúdo novo introduzido na parte da disciplina que nos coube utilizar. Além disso, o teste relacionado à ultrapassagem de carros foi elaborado com a intenção de ser algo que fizesse parte do cotidiano dos alunos.

A construção dos pós-testes também se baseou em Mortimer (2000). O autor considera que, antes da instrução, é de se esperar que o aluno apresente lacunas em sua estrutura cognitiva e, demonstre isso, na forma como se expressa. Desta forma, a construção do pós-teste possibilita a análise tanto do preenchimento destas lacunas quanto da evolução conceitual.

Com base nas considerações de Mortimer (2000), em resultados de pesquisa sobre concepções de estudantes a respeito de referenciais e também sobre conceitos da TRR publicados em artigos, adaptamos quatro testes de compreensão. Outros três foram adaptados a partir de exercícios encontrados em livros didáticos.

Inicialmente, foram elaborados dois testes envolvendo a mecânica newtoniana (1.1 e 1.2), inspirados em testes existentes em livros didáticos. Estes foram considerados como pré-

testes à introdução da relatividade da MN. Por exemplo, o problema 4.6 (Halliday Resnick, R. & Walker, 2007, p.73), avião que lança uma cápsula de resgate sobre uma vítima na água, gerou o teste do avião-pacote (1.1.), devendo este ser respondido de forma qualitativa. O problema 4.10 (op cit, p. 79), serviu como referência para o teste de ultrapassagem dos carros A e B (1.2.). A ilustração e a explicação da composição de movimentos (caçador- macaco) foram baseadas em um problema da obra citada (p.71) que descreve o experimento de uma bola que acerta uma lata em queda livre. A partir destes, a idéia era elaborar um teste envolvendo um pulso de luz (1.3), como um pré-teste ao conteúdo que envolve a discussão dos Postulados da TRR. Para tal, foi considerada a possibilidade de explicar como seria a propagação de um pulso de luz de acordo com a física clássica. Entretanto, a visão relativística a respeito do fenômeno deve introduzir o segundo postulado da TRR, e a explicação clássica deve ser deixada de lado. Na seqüência, utilizamos um dos testes (2.1) aplicados no trabalho de Villani (1987) que, em nosso caso, será considerado um pós-teste para avaliar a compreensão dos alunos sobre a velocidade da luz, devendo ela estar relacionada ao segundo postulado da TRR. Após a introdução dos conceitos de contração do comprimento, dilatação do tempo e sincronização dos relógios, os testes (5.1 e 5.2) foram elaborados com base na referência Scherr, Shaffer e Vokos, (2001). Eles envolvem o conceito de evento (emissão ou recepção de um pulso luminoso) e introduzem o conceito de simultaneidade de eventos a partir dos pontos de vista de dois referenciais distintos. A partir daí, uma modificação na estrutura destes originou o pós-teste (5.3), com a finalidade de consolidar a noção de simultaneidade de eventos e, ao mesmo tempo, articular todos os conceitos até então definidos. Além disso, este último teste possibilita a avaliação da evolução do perfil conceitual de cada aluno no final do curso. Estes testes, com as respectivas respostas aceitas cientificamente, são apresentados no Capítulo 4, conforme o desenvolvimento das atividades.

3.2.3. As animações

As animações, construídas e utilizadas neste trabalho, encontram-se disponibilizadas em um CD ROM anexo ao Apêndice I. Estas são consideradas como produto educacional exigido por este Programa de Pós Graduação.

Por considerar as dificuldades que os alunos enfrentam para entender movimentos relativos, e por estas se estenderem com maior gravidade a TRR, optamos em construir animações, com o *software Modellus*, para cada tópico do conteúdo do curso. Algumas foram adaptadas de animações já existentes na *web*, entre elas a do barco de Galileu (1.1), a do

caçador-macaco (1.2), a de sincronização de relógios (4.4) e a de simultaneidade (5.5). Por serem construídas em *flash* e não apresentarem seu modelo matemático, para serem comprovadas, estas animações dificulta a compreensão da troca de referencial. Nossa preocupação, ao elaborar estas e as demais, foi no sentido de que elas sejam facilitadoras da construção do conhecimento relacionados aos conceitos abordados neste trabalho.

Sob uma visão da realidade mediada por novas tecnologias, e parafraseando Kerckhove (1997, *apud* Alves, 2007, p.4): “*antes da invenção da realidade virtual, ninguém imaginaria o conceito de uma mão mental*”. É neste sentido que entendemos a importância da construção de animações através de modelagem computacional, capaz de representar visualmente, por meio de modelos matemáticos, uma realidade que dificilmente poderíamos comprovar. Para tal, os conhecimentos sobre o *software* livre *Modellus*, adquiridos na disciplina de Tecnologias da Informação e Comunicação II do MPEF-IF-UFRGS, foram de muita utilidade. Assim, partimos para a construção das animações com este *software*. Este trabalho foi feito com bastante antecedência ao curso, envolvendo aproximadamente oito meses (novembro/2008 a junho/2009), pois além do domínio das ferramentas do *software*, a noção de referencial, principalmente na TRR, envolve situações com alto grau de abstração, ou seja, não são situações familiares ao nosso cotidiano e, por isso, devem ser simuladas detalhadamente de acordo com as leis da física.

Cada uma das animações foi idealizada seguindo a seqüência dos conteúdos a serem apresentados aos alunos, com a finalidade de representar visualmente a situação envolvida e estimular a discussão da mesma. Todas elas representam os exemplos discutidos nas aulas, assim como servem para ilustrar as respostas dos testes.

Desde o início, nossa preocupação foi a de deixar claro para o aluno o aspecto visual da animação, pois estas animações foram apresentadas com auxílio de *data show*. Neste sentido, ele, como espectador de todos os movimentos representados pela animação, deve estar atento ao referencial usado, não devendo considerar-se um observador absoluto, ou seja, ele deve refletir e compreender que cada situação apresentada depende do referencial adotado. Esse é um cuidado que devemos ter, porque a idéia de observador absoluto é muito forte no senso comum, podendo se constituir em um obstáculo epistemológico. A apresentação da descrição destas animações com as respectivas imagens, assim como a discussão das respostas cientificamente aceitas dos testes, estão no capítulo 4.

No total, são 30 animações, conforme relação:

1. Mecânica Galileana/Newtoniana:

Animação 1.1. Barco de Galileu;

Animação 1.2. Composição de movimentos (caçador-macaco);

Animação 1.3. Avião - pacote (referencial do avião);

Animação 1.4. Avião - pacote (referencial da Terra);

Animação 1.5. A cinemática do processo de ultrapassagem sob o ponto de vista do observador solidário ao carro A;

Animação 1.6. A cinemática do processo de ultrapassagem sob o ponto de vista do observador solidário ao carro B;

Animação 1.7. A cinemática do processo de ultrapassagem de dois carros A e B, sob o ponto de vista do observador solidário à pista;

Animação 1.8. Pulso clássico;

Animação 1.9. Pulso clássico (troca de referencial);

2. TRR- Segundo Postulado:

Animação 2.1. Pulso Relativístico;

Animação 2.2. Pulso relativístico (troca de referencial);

Animação 2.3. Trens A e B - Referencial da plataforma;

Animação 2.4. Trens A e B - Referencial do trem A;

Animação 2.5. Trens A e B - Referencial do trem B;

3. Contração do comprimento e dilatação do tempo

Animação 3.1. Contração comprimento- Experimento do relógio de luz no referencial do trem;

Animação 3.2. Dilatação tempo - Experimento do relógio de luz no referencial da plataforma;

4. Relatividade da Sincronização dos relógios

Animação 4.1. Sincronização de dois relógios (referencial destes);

Animação 4.2. Sincronização de dois relógios (referencial em movimento);

Animação 4.3. Sincronização de dois relógios (dois sistemas de referência);

Animação 4.4. Sincronização de nove relógios (um só referencial);

Animação 4.5. Sincronização de nove relógios (dois sistemas de referência);

Animação 4.6. Sincronização de nove relógios (dois sistemas de referência - mudança de referencial);

5. Relatividade da Simultaneidade

Animação 5.1. Emissão de sinais, ao mesmo tempo, por duas antenas e detecção por um detector no ponto médio entre elas;

Animação 5.2. Emissão de sinais, em tempos diferentes, por duas antenas e detecção por um sensor posicionado no ponto médio entre elas;

Animação 5.3. No referencial das antenas: dois pulsos luminosos emitidos pelas antenas A e B são detectados simultaneamente pelo detector D2;

Animação 5.4. No referencial da nave: dois pulsos luminosos emitidos pelas antenas A e B não são detectados simultaneamente pelo detector D1;

Animação 5.5. Sinais luminosos emitidos ao mesmo tempo pelos vulcões A e B são detectados simultaneamente pelo sismologista fixo na antena, situada no ponto médio entre estes;

Animação 5.6. Sinais luminosos emitidos ao mesmo tempo pelos vulcões A e B não são detectados simultaneamente pelo sismologista fixo ao pé do vulcão;

Animação 5.7. Sinais luminosos emitidos ao mesmo tempo pelos vulcões A e B não são detectados simultaneamente pelo observador no jato;

Animação 5.8. Sinais luminosos emitidos ao mesmo tempo pelos vulcões A e B são detectados simultaneamente pela antena, situada no ponto médio entre estes, e pelos observadores no jato;

3.3. Descrição do curso – Roteiro das atividades

O curso completo inclui sete atividades, com 2 horas/aula destinadas a cada uma.

Antes da aplicação, foi elaborado um roteiro de atividades. Este roteiro teve a finalidade de buscar a melhor forma de abordar os conceitos e de deixar um registro de como deve ser feita cada aplicação do material instrucional. Sendo assim, as atividades obedeceram à seguinte seqüência, as quais serão relatadas e discutidas no capítulo 4.

Atividade 1. Introdução

Esta atividade é constituída de uma introdução, juntamente com a explicação sobre a proposta do trabalho a ser desenvolvido e a aplicação dos pré-testes 1.1 e 1.2 (MN).

Atividade 2. A Relatividade Galileana/Newtoniana

Os seguintes aspectos devem ser abordados:

1. Conceituação de referenciais inerciais;
2. Definição de referencial na relatividade newtoniana, salientando a representação por eixos cartesianos, velocidades típicas e observadores inerciais;
3. Apresentação das equações de Galileu como primeiro modelo matemático para a relatividade, especificando, de forma teórica, como são tratadas as transformações de Galileu entre dois referenciais inerciais;
4. Utilização do exemplo do “barco de Galileu” para a descrição das trajetórias de um bola de ferro, solta do alto de um mastro, em relação a dois referenciais. Discussão do exemplo apresentado na animação 1.1, “barco de Galileu”. Complementação com o pensamento pré-galileano (exemplos de idéias pré-galileanas);
5. Apresentação da animação 1.2, “caçador-macaco” (exemplo da queda livre e do lançamento de projétil), salientando a composição de movimentos na relatividade newtoniana;
6. Discussão do pré- teste 1.1 (avião- pacote), com as respectivas animações 1.3 e 1.4;
7. Discussão do pré teste 1.2 (ultrapassagem dos carros A e B), com as respectivas animações 1.5 a 1.7.;
8. Discussão da questão do observador solidário ao referencial onde o objeto está em repouso, a questão das velocidades relativas e adição de velocidades;

9. Análise e discussão, em sala de aula, das respostas aos testes segundo a referência Panse, Ramadas & Kumar (1996), que trata dos tipos mais comuns de concepções da mecânica galileana apresentadas por estudantes;
10. Aplicação do pré-teste 1.3. envolvendo propagação de um pulso de luz em relação a dois referenciais distintos. Este teste contempla uma discussão de como seria a descrição de um pulso clássico de acordo com a mecânica newtoniana;

Atividade 3 - A Teoria da Relatividade Restrita

Aspectos a serem abordados:

1. Introdução da cinemática relativística, com ênfase em referenciais inerciais e em comparação entre valores de velocidade de vários corpos reais com o valor da velocidade da luz;
2. Discussão do teste 1.3. envolvendo pulso de luz através de animação 1.8 e 1.9 (pulso clássico) e 2.1 e 2.2 (pulso relativístico), salientando e diferenciando as duas situações sob a luz do segundo postulada da TRR. Deve ficar claro que o valor da velocidade da luz no vácuo é uma constante e independe do movimento da fonte;
3. Utilização de aspectos históricos para explicar a não existência de um referencial absoluto (interferômetro de Michelson e contração de Lorentz);
4. Introdução do fator de Lorentz de forma teórica;
5. Introdução do conceito de espaço-tempo- o tempo não pode ser tratado como absoluto;
6. Apresentação dos dois postulados da TRR;
7. Apresentação das consequências do segundo postulada, a serem discutidas nas próximas atividades:
 - a. As equações de Galileu são inconsistentes com o segundo postulada;
 - b. O cálculo relativístico da velocidade relativa entre dois objetos;
 - c. Medição de intervalos de tempo;
 - d. Medição de intervalos de espaço;
 - e. A relatividade da sincronização de relógios;
 - f. A relatividade da simultaneidade de eventos;
8. Aplicação do pós-teste 2.1 referente ao segundo postulada; (VILLANI & PACCA,1986)

Atividade 4 - A noção de referencial e a construção das noções de contração do comprimento e de dilatação temporal

Aspectos a serem abordados:

1. Aspectos teóricos sobre a noção de referencial na TRR, a construção das noções de contração de comprimento e da dilatação temporal;
2. Discussão do pós- teste 2.1 da aula anterior:
 - a. Descrição do movimento em relação a cada referencial com a ajuda das animações 2.3, 2.4. e 2.5;
 - b. Enfatizar os conceitos envolvidos, tais como: contração dos comprimentos, dilatação do tempo e velocidade relativa na TRR;
 - c. Enfatizar o fato de que as respostas devem estar de acordo com o segundo postulado da TRR;
3. Introdução do conceito de referencial na TRR, como um conjunto de relógios e réguas, e suas relações com:
 - a. Observadores inteligentes que usam diferentes referenciais;
 - b. O conceito de evento na TRR.;
4. Discussão de duas das conseqüências (medidas de comprimento e de tempo) do segundo postulado, apresentando os conceitos de:
 - a. Dilatação do tempo;
 - b. Contração dos comprimentos;
 - c. Tempo próprio e comprimento próprio;
5. Apresentação do exemplo do experimento de pensamento utilizado por Einstein “o trem relativístico e o relógio de luz” através:
 - a. Das animações 3.1 e 3.2.;
 - b. De demonstração das equações relacionadas à contração dos comprimentos e à dilatação do tempo;

Atividade 5 - A construção da noção de relatividade da sincronização de relógios

Aspectos a serem abordados:

1. Aspectos teóricos sobre a noção de relatividade da sincronização de relógios;
2. Salientar o atraso na percepção de um evento devido ao tempo que a luz leva para percorrer a distância entre a posição onde ocorre o evento e a posição onde ele é detectado;
3. Sincronização de relógios
 Contra exemplo: considera-se dois observadores, 1 e 2, separados por uma distância L , que pretendem sincronizar vários de seus relógios-próprios. Se o observador 2 ativar o seu relógio, quando enxerga o observador 1 ativando o seu, 2 registrará que os relógios

estão sincronizados, mas o observador 1 registrará o relógio 2 como atrasado em um intervalo temporal igual a $2L/c$;

4. Proposta do método de sincronização.
Contra exemplo: discussão das animações 4.1, 4.2 e 4.3.;
5. Discussão da situação em que dois observadores não são equidistantes da fonte luminosa, mas conhecem a sua distância até ela. Como estes observadores podem ajustar seus respectivos relógios-próprios?
6. Discussão do processo de sincronização para relógios dispostos regularmente no plano x y , salientando que cada relógio corresponde a um observador que conhece sua distância até a origem e que adianta seu relógio de um tempo igual àquele necessário para a luz ir da origem até o relógio. Esta situação é ilustrada na animação 4.4.;
7. Execução e discussão da animação 4.4;
8. Apresentação da animação 4.5. Discussão, em detalhes, dos aspectos da animação:
 - a. O pulso de luz atinge primeiro os relógios à esquerda, e estes parecerão adiantados em relação aos relógios à direita;
 - b. Os relógios fixos no sistema considerado em repouso estão sincronizados;
 - c. Os relógios em movimento estão sincronizados ao longo da direção y ;
 - d. Salientar que o comportamento do pulso de luz será o mesmo se a fonte estiver fixa no sistema considerado em movimento;
9. Apresentação da animação 4.6:
 - a. Discutir inicialmente a situação em que se está fixo no referencial azul e os relógios laranja estão em movimento;
 - b. O pulso de luz atinge primeiro os relógios à direita e estes parecerão adiantados em relação aos relógios à esquerda;
 - c. Novamente, os relógios solidários ao sistema em repouso estão sincronizados.
 - d. Os relógios considerados em movimento estão sincronizados ao longo da direção y ;
 - e. Salientar que o comportamento do pulso de luz será o mesmo se a fonte estiver fixa no sistema considerado em movimento;
 - f. Salientar que não existe acordo entre os observadores fixos nos referenciais laranja e azul, e que não existe uma escala única de tempo para os dois referenciais;
10. Discutir, novamente, o significado preciso de referencial na TRR;
11. Salientar, novamente, que a origem destes efeitos está na diferença entre um “pulso clássico” e um “pulso relativístico”. Mostrar, novamente, as animações de composição de movimentos da animação 1.8 e 1.9.

12. Aplicação dos pré-testes 5.1 e 5.2.

Atividade 6 - A relatividade da simultaneidade

Aspectos e ações a serem abordados/desenvolvidos:

1. Métodos para determinação da simultaneidade de eventos:
 - a. Contra exemplo: problema do observador que está fixo na origem e registra a chegada dos pulsos oriundos de três eventos: primeiro o pulso 1, depois o 2 e finalmente o 3. Qual é a ordem de ocorrência dos eventos?
 - b. Discussão das diversas possibilidades de ocorrência, concluindo que é necessário corrigir as distâncias;
 - c. Propor e discutir o procedimento do observador equidistante a dois eventos;
 - d. Como o problema da determinação da simultaneidade é resolvido se o observador, ao examinar a origem dos pulsos, determina que, não se encontra equidistante destas?
2. Apresentação da animação 5.1.
3. Apresentação da animação 5.2:
 - a. Discutir a diferença entre as duas simulações;
 - b. Salientar que o resultado depende do observador determinar quais são as distâncias entre ele e a origem dos pulsos;
 - c. Ao apresentar simulação 5.2, discutir o que ocorre quando um observador detecta pulsos ao mesmo tempo, mas posteriormente determina que, sua posição não é equidistante das fontes;
4. Apresentação da simulação 5.3 seguida de uma discussão de acordo com a noção de simultaneidade;
5. Apresentação da simulação 5.4 seguida de discussão de acordo com a noção de simultaneidade:
 - a. Retro-evoluir a animação e mostrar que os observadores fixos na nave explicam que o observador D2 recebe os pulsos não-simultâneos no mesmo instante de tempo porque ele se desloca para a esquerda.
 - b. Salientar, novamente, que a animação deve ser encarada como uma ilustração e que representa a evolução de eventos nos respectivos referenciais.
 - c. Discussão dos resultados referentes aos pré-testes 5.1 e 5.2, apresentando as animações 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 referentes aos vulcões.
 - d. Aplicação do pós-teste 5.3 a ser discutido na aula seguinte, destinada a uma revisão geral.

Atividade 7 - Discussão sobre perfil conceitual do conceito de referencial

Aspectos a serem desenvolvidos:

1. Discussão dos resultados do pós teste 5.3., juntamente com a apresentação da animação 5.9.
2. Reapresentação das animações dos vulcões, 5.6, 5.7 e 5.8, seguida de uma discussão sob o ponto de vista de observadores fixos em diferentes referenciais.
3. Comentar sobre a “Noção de Perfil Conceitual”, relacionando a sua origem - Perfil Epistemológico de Bachelard e Perfil Conceitual adaptado por Mortimer - exemplificando com a aplicação para outros conceitos existentes na literatura.
4. Apresentação da idéia inicial da noção de Perfil Conceitual de Ayala e Frezza (2007) – Referencial na mecânica newtoniana pode ser obstáculo epistemológico à compreensão correta da noção de referencial na TRR.
5. Explicação da divisão do Perfil Conceitual de referencial na três regiões propostas (Senso Comum, Newtoniana e relativística).
6. Comentar os resultados de pesquisa obtidos por Panse, Ramadas & Kumar, relacionados à noção de referencial na mecânica newtoniana.
7. Comentar as referências Villani & Pacca (1987) e Scherr, R.; Shaffer, P. S. & Vokos (2001-2002), com relação a referenciais na TRR.
8. Explicar a finalidade da proposta deste projeto aos alunos:
 - a. Explicitar as noções de referencial e estabelecer a posição inicial do perfil;
 - b. Promover a tomada de consciência sobre a própria noção de referencial do estudante;
 - c. Desenvolver uma nova região do perfil associada à TRR
9. Revisão das atividades propostas, consideradas como estratégias para o desenvolvimento da nova região do perfil conceitual de referencial na TRR.
10. Apresentação da análise dos resultados de cada estudante separadamente com auxílio de uma tabela dividida em três regiões. A análise chama a atenção para os resultados já obtidos na literatura (Panse, Ramadas & Kumar, 1996).

4. APLICAÇÃO DO MATERIAL INSTRUCIONAL EM SALA DE AULA E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Aplicamos o material instrucional em sala de aula para duas turmas da licenciatura em Física. A primeira foi uma turma da UFPel, no período de 06 de julho à 03 de agosto de 2009. A segunda foi uma turma da FURG, de 1º de outubro a 05 de novembro de 2009. Os alunos envolvidos se apresentavam em períodos distintos de sua formação acadêmica, conforme mencionaremos no item 4.1. Para a identificação, estes alunos foram analisados na ordem de aplicação – turma da UFPel (A) e turma da FURG (B) . Acompanhando as turmas por estas letras, o aluno é identificado por um índice (número).

As mesmas atividades foram desenvolvidas para ambas as turmas e foram baseadas no roteiro planejado. A apresentação dos conceitos, a discussão dos testes e das animações foi feita com o auxílio dos recursos de *data show*. Os testes foram impressos e distribuídos individualmente, de forma que fossem respondidos pelos alunos.

4.1. As turmas de Licenciatura em Física

Alunos da UFPel - Estes alunos, em número de quatro, cursavam a disciplina de Instrumentação de Ensino de Física I e se encontravam no quarto semestre letivo do curso de licenciatura em Física. Conforme mencionamos anteriormente, eles já haviam concluído as quatro Físicas básicas. Vamos denominá-los alunos A_1 , A_2 , A_3 e A_4 .

Alunos da FURG - Estes alunos, inicialmente em número de onze, cursavam a disciplina de Atividades de Ensino de Física III e se encontravam no último semestre letivo do curso de licenciatura em Física. Conforme mencionamos anteriormente, já tinham estudado tópicos de TRR no decorrer do curso. Vamos denominá-los alunos B_1 , B_2 , B_3 , B_4 ... B_{11} . Nem todos eles permaneceram no curso, uns por motivo de doença ou por chuva forte e outros por estarem realizando atividades de estágio em mesmo horário.

4.2. As atividades e resultados

A partir daqui é feita a descrição detalhada de cada uma das sete atividades. São apresentados, em seqüência: o texto envolvendo a parte conceitual e matemática das duas teorias envolvidas; os testes com as respostas científicas para serem comparadas as dos alunos; e as animações, utilizadas na discussão e representação dos conceitos, com respectivas imagens. A análise e a discussão dos resultados contemplam exemplos, tanto das concepções

aceitas cientificamente quanto daquelas de senso comum. Estes resultados também são apresentados, na sequência, em cada atividade desenvolvida. Para classificar essas concepções, nos utilizamos das três regiões do perfil conceitual de referencial apresentado na referência Ayala & Frezza (2007). Para definirmos em que região as respostas se encontravam, consideramos que na região do senso comum predominam as noções “pré-galileanas” de movimento; ou seja, a existência de um referencial absoluto associado ao próprio sujeito cognocente. A região da relatividade galileana/newtoniana inclui as noções de adição de movimento, a de referencial (como um sistema de coordenadas cartesianas) e as noções metafísicas newtonianas de espaço absoluto e tempo absoluto. A noção relativística de referencial mantém as coordenadas cartesianas, mas inclui um conjunto de observadores munidos de relógios, cada qual em um ponto do espaço, com seus respectivos relógios previamente e corretamente sincronizados uns com os outros, estabelecendo um padrão global de tempo. Este padrão caracteriza um referencial na TRR e, portanto, deve eliminar as noções de espaço e tempo absolutos. A seguir, apresentamos a análise dos testes respondidos pelos alunos, procurando evidenciar os termos que caracterizam as regiões do perfil conceitual.

4.2.1. Atividade 1. Introdução

Esta atividade foi destinada à apresentação e à explicação da proposta de trabalho a ser desenvolvida. Nela foram aplicados os pré-testes 1.1 e 1.2 sobre o conceito de referencial na mecânica galileana/newtoniana.

Para a turma A, apresentamos a proposta do curso e da metodologia, que utiliza o modelo de perfil conceitual de referencial, na forma de aula presencial. No período restante da aula, propusemos que os alunos respondessem a dois testes preliminares envolvendo as noções de referenciais na mecânica galileana. Para a turma B, como só podíamos contar com seis encontros, os mesmos testes foram enviados por email para que o professor responsável pela disciplina fizesse a aplicação. Isto ocorreu na semana anterior ao nosso primeiro encontro.

Os testes envolvidos, a título de pré- testes, com suas respectivas respostas cientificamente aceitas, são:

Teste 1.1. Um avião, voando a uma altura e uma velocidade, constantes, em um dado instante, libera um pacote (desconsidere a resistência do ar). Discuta qualitativamente a trajetória do pacote do ponto de vista (a) de um observador solidário ao avião, e (b) de um observador solidário ao referencial da Terra.

Resposta:

a) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual o avião e pacote estão em repouso. Nesta perspectiva, o referencial em relação ao qual a Terra está em repouso se move com velocidade $-V$ constante na direção do eixo-x. No instante em que o pacote é solto se inicia um movimento retilíneo vertical (queda livre).

b) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual a Terra está em repouso. O avião possui uma velocidade V constante na direção do eixo x . Em certo instante, o avião libera um pacote que, por se mover em conjunto com o avião, tem a mesma velocidade deste. O observador, solidário a este referencial, descreverá o movimento como uma composição de queda livre com o movimento que o pacote já possuía antes do início da queda. A trajetória é parabólica, para frente do avião.

Teste 1.2. Considere uma estrada plana e retilínea por onde se deslocam dois carros, A e B, na mesma direção e sentido e com velocidade constante. Em determinado momento, o carro A ultrapassa o carro B. Descreva de forma qualitativa a cinemática do processo de ultrapassagem nos casos em que você esteja (a) no carro A, (b) no carro B e (c) em repouso em relação à estrada.

Resposta:

a) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual o carro A está em repouso. Para interpretar o fato de que A ultrapassa B, ele considera que a velocidade V_A é maior do que a velocidade V_B . Neste caso, o observador descreve o movimento do carro B com uma adição de velocidades. A velocidade relativa é, portanto, $V_B - V_A$, resultando como negativa, de modo que o carro B move-se no sentido negativo. Por outro lado, este observador descreve o movimento da pista com velocidade $(-V_A)$.

b) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual o carro B está em repouso. Para interpretar o fato de que A ultrapassa B, ele considera que a velocidade V_A é maior do que a velocidade V_B . Neste caso, o observador descreve o movimento do carro A, com uma adição de velocidades. A velocidade relativa é, portanto, $V_A - V_B$, resultando como positiva, de modo que o carro A move-se no sentido positivo. Por outro lado, este observador também descreve o movimento da pista com velocidade $(-V_A)$.

c) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual a pista está em repouso. Ele descreve o movimento dos dois carros A e B com suas respectivas velocidades V_A e V_B (ambas positivas).

4.2.1.1 Análise e discussão dos resultados dos testes 1.1 e 1.2

A análise destes testes ocorreu durante a semana que antecedeu a segunda atividade. As concepções foram analisadas de acordo com as caracterizadas pela referência Panse, Ramadas & Kumar (1994). Destas, exemplificamos com as seguintes concepções:

No teste 1.1, que envolveu a descrição da trajetória da queda de um pacote a partir de um avião, e considerando o ponto de vista do observador solidário ao referencial do avião e ao da Terra, obtivemos as respostas dos alunos A_1 e A_2 que, apesar de não serem consideradas científicas, descrevem ou desenharam a trajetória corretamente. Citamos como exemplo, a descrição do aluno A_2 , que representa graficamente as trajetórias, acompanhadas do vetor velocidade, corretamente. Ele responde assim:

a) Para o observador que está no avião, a bomba vai na direção do chão em linha reta, como mostra a figura. Como o avião está com velocidade constante o pacote tende a ter a mesma velocidade que o avião..b) Para o observador que está no chão, verá o pacote realizando um movimento parabólico, pois ele não estará acompanhando o movimento do avião, apenas o da bomba...(A₂)

No entanto, o aluno A_3 desenhou trajetórias que correspondem ao senso comum - ou seja, trajetória em queda livre para o referencial da Terra e parabólica para o referencial do avião- porém, ao escrever, ele corrige. Isto demonstra a sua insegurança. Já o aluno A_4 descreve sua concepção de acordo com as caracterizadas pela referência Panse, Ramadas & Kumar (1994). Podemos identificar, no final da frase do item (a) de A_4 , que a concepção do aluno confere com o item 2 desta lista: “Limitar a extensão do sistema de referência ao tamanho do objeto físico ao qual o sistema está fixo”. Os termos em **negrito** caracterizam tais concepções:

a) No referencial do avião, ele percebe que quando o pacote cai, ele tem um movimento **parabólico**, ou seja, **não cai reto**. Ele observa este movimento parabólico porque o avião está com uma velocidade constante e **quando o objeto é solto, passa a cair em queda livre**. b) Para o observador na Terra, o objeto cai em queda livre, ou seja, **cai reto** ao chão (A₄)

Analisando as respostas da turma B, que são 11 alunos, obtivemos oito respostas aceitáveis a exemplo de B₁₀:

a) Como o pacote cai do avião com velocidade constante, tal pacote terá uma velocidade na horizontal igual a do avião, portanto o observador no avião não perceberá esse deslocamento no pacote, ou seja, verá o pacote caindo somente na direção vertical, b) o observador no referencial na Terra verá a soma das velocidades na horizontal com a vertical, ou seja, verá uma parábola. (B₁₀)

Entretanto, as respostas de B₅, B₇ e B₁₁ revelam as mesmas concepções de senso comum descritas para a turma A. Apresentamos alguns exemplos:

a) do referencial do avião, o pacote vai caindo **se afastando do avião**, menor a altura, mais longe do avião, em **movimento parabólico**. b) Ele vê, caindo em linha reta, o pacote do avião em MRU, só que em **queda livre**” (B₅)

a) o observador no referencial do avião vê o pacote cair em linha reta por um tempo e depois de certo tempo **começa a andar para trás** (B₇)

a) Um observador solidário ao referencial do avião verá o pacote se **afastando do avião**, pois está se movendo com relação ao referencial do avião. b) O observador no referencial da Terra verá o avião se movendo com velocidade constante e o pacote caindo em **queda livre**. (B₁₁)

No teste 1.2, os alunos deveriam descrever a cinemática de ultrapassagem entre dois carros A e B, ambos com velocidade constante, identificando pelo enunciado que $V_A > V_B$. Da turma A, os alunos A₁ e A₄, apresentam uma concepção aceita, mesmo utilizando termos do senso comum, a exemplo de:

a) No carro A: do ponto de vista de um observador que acompanha o movimento do carro A, temos o carro B vindo na direção do carro A e na hora da ultrapassagem é como se o carro B se movimentasse no sentido contrário ao de A. No referencial de A ele está em repouso. b) No carro B: antes da ultrapassagem o observador em B, observa A vindo em sua direção. Na ultrapassagem B vê A se movendo no mesmo sentido e se afastando. Aqui também vale que no referencial de quem está dentro do carro B, o mesmo estará em repouso a A. c) Em repouso em relação à estrada: Para um observador inercial aos dois movimentos carro A e carro B temos, antes da ultrapassagem $V_A > V_B$, constantes, pois se aproxima de B. Após a ultrapassagem $V_A > V_B$ porque A ultrapassa B. (A₁)

Já o aluno A₂, embora reconheça que o carro onde se encontra o observador está, permaneça em repouso em relação a ele, utiliza-se de termos relacionados à ultrapassagem, tais como: “a)[...] o carro B diminui um pouco ou em b) [...] o carro A aumenta a velocidade e em c) [...] na pista o carro A aumenta a velocidade em relação à B.” Devemos lembrar que o enunciado do exercício deixava claro que as velocidades dos carros eram constantes, e que se tratava de dois MRU’s. Tais resultados podem ser considerados como decorrentes da influência das ultrapassagens cotidianas, uma vez que estas são realizadas com mudanças tanto no módulo quanto na direção da velocidade.

As respostas do aluno A₃ apresentam fortes concepções de senso comum, como podemos identificar. Inclusive nos deparamos, mais uma vez, com um dos itens apontados na referência Panse, Ramadas & Kumar (1994) - ou seja, o item 5 de sua classificação, “movimentos reais e aparentes”. O termo em negrito provavelmente revela tal concepção:

a) O observador no carro A observa o carro B como estando parado, tendo como base que só o carro A está em movimento. O que realmente ocorre é que o carro A aumenta a velocidade para ultrapassar e o B permanece com a mesma velocidade... o observador em A observa o outro parado e a velocidade de A é $V_A - V_B$. b) Se o

observador estiver no carro B, ele observa o carro A com alta velocidade e ele próprio com velocidade constante. O que ele acredita é que o carro A possui uma velocidade ($V_A + V_B$). c) **Um observador, na estrada, observa o que realmente acontece**, o carro A amplia sua velocidade para ultrapassar e o carro B permanece com sua velocidade, só que observa também os carros com muita velocidade $V_A > V_B$. (A₃)

Na análise das respostas da turma B, somente dois alunos, B₂ e B₁₁, apresentaram respostas aceitas cientificamente para descrever movimentos desta ultrapassagem de carros. Citamos, por exemplo, a resposta do aluno B₂:

a) Do carro A, vê-se o carro B com uma velocidade negativa (andando para trás) enquanto estamos parados; b) Do carro B, vemos o carro A com uma velocidade positiva nos ultrapassando, enquanto estamos parados; c) Para alguém que está em repouso na estrada vê dois carros com velocidades diferentes de zero onde o carro A ultrapassa o B num determinado instante. (B₂)

Cinco alunos, B₃, B₅, B₆, B₉ e B₁₀, utilizam-se de termos semelhantes aos usados pelos alunos da turma A, ou seja, “acelerando” e “diminuindo”, quando se referem à ultrapassagem dos carros. Além disso, os mesmos alunos também utilizam em suas concepções, de senso comum, termos como “parece”, com as características descritas pelo item 5 da referência Panse, Ramadas & Kumar (1994), ou seja, que os movimentos não são reais e sim aparentes. Estes termos estão destacados em negrito na transcrição da resposta:

a) Sua velocidade será maior que B, e a ultrapassagem se dará lentamente (B₃)

a) O carro A está com velocidade constante maior do que B, então se aproxima de B até a ultrapassagem e se afasta de B. Para A, **parece** que B está **diminuindo** a velocidade. b) O carro B vê A se aproximando com velocidade constante. No caso de B, **parece** que A está **acelerando** e aumentando a velocidade. (B₅)

a) [...] eu estando no carro A, sei que minha velocidade é constante e me **parece** que o carro B **desacelerou**... b) [...] estando no carro B **parece-me** que o carro A **acelerou**, já que fui ultrapassado e sei que não acelerei. (B₆)

a) [...] para A ele não acelerou... b) [...] Para o carro B **pareceu** que o carro A tinha **acelerado**, pois sua velocidade constante era maior que a do carro A. (B₉)

a) A princípio o carro B **parecerá** estar parado juntamente com o carro A e então o carro A terá que acelerar muito para conseguir ultrapassar o carro B. b) para o observador que está no carro B **terá a impressão** que o carro A está acelerando. c) O observador em repouso na estrada perceberá que o carro A tem que **acelerar** muito para conseguir ultrapassar o carro B, visto que ele (B) está com uma velocidade no mesmo sentido que A. (B₁₀)

Podemos dizer ainda que os alunos B₇ e B₈ apresentam outros tipos de concepções de senso comum, e que o aluno B₁ fez uso de fórmulas, mas não conseguiu explicar corretamente a cinemática envolvida. Algumas dessas respostas são citadas a seguir:

- a) O carro B se aproxima lentamente e depois fica para trás lentamente. (B7)
 a) [...] É possível considerar o carro **B em repouso** e A, com velocidade maior, ultrapassando-o. (B8)

4.2.2. Atividade 2- A Relatividade Galileana/Newtoniana

Nesta atividade, seguindo o planejamento das atividades, a conceituação de referenciais inerciais e a definição de referencial na relatividade newtoniana baseou-se no texto previamente elaborado para a finalidade.

4.2.2.1 Texto sobre a Relatividade Galileana/Newtoniana

Consideraremos a descrição do movimento em relação a dois referenciais inerciais que se movem uniformemente um com relação ao outro. Um sistema de referência é inercial se a primeira lei de Newton é satisfeita em relação àquele referencial. Neste caso, não estão presentes forças fictícias na força resultante, com o quê a segunda lei de Newton assume a forma mais simples possível. *Forças fictícias*, ou *inerciais*, são decorrentes da aceleração do referencial *não inercial* usado, e não de interações físicas entre o corpo e a vizinhança. Exemplos, desse tipo de forças, são a força centrífuga e a força de Coriolis, presentes em referenciais giratórios.

Para facilitar a abordagem, vamos considerar movimentos em duas dimensões de um referencial S , com eixos cartesianos xy , e de outro referencial S' , com eixos $x'y'$ que se movimentam em relação a S de tal modo que os eixos x' e y' permaneçam sempre paralelos aos eixos x e y , respectivamente (Figura 2). O movimento da origem O' , quando observado em relação ao referencial S , é *MRU* com velocidade V .

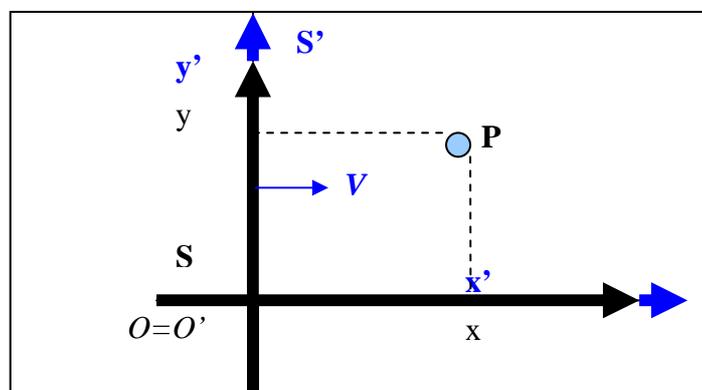


Figura 2- Eixos cartesianos representando dois sistemas de referência ($t=0$)

As relações existentes entre as posições e as velocidades de partículas ou corpos, observadas em relação a um desses referenciais, e as correspondentes posições e velocidades medidas, em relação ao outro referencial, são demonstradas a seguir. Seja \mathbf{r} o vetor posição de uma partícula P em relação ao referencial S, \mathbf{r}' o correspondente vetor posição em relação ao referencial S' e \mathbf{R} o vetor posição da origem O' , de S', em relação à origem O de S. É muito fácil verificar que

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}'(t) + \mathbf{R}(t) \quad (1)$$

Derivando essa expressão em relação ao tempo, obtemos

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}'(t) + \mathbf{V}(t) \quad (2)$$

onde

$$\mathbf{v}(t) = d\mathbf{r}(t)/dt$$

$$\mathbf{v}'(t) = d\mathbf{r}'(t)/dt$$

e

$$\mathbf{V}(t) = d\mathbf{R}(t)/dt$$

As equações (1) e (2) são conhecidas como as transformações de Galileu e, de acordo com a física newtoniana, são válidas entre dois referenciais inerciais quaisquer.

A chamada relatividade galileana veio substituir o pensamento aristotélico através de relações matemáticas e da realização de experimentos comprobatórios dependentes do referencial em relação ao qual se observa o movimento. Podemos dizer que o princípio da relatividade foi introduzido na ciência por Galileu, pois ele afirmou que o movimento, ou pelo menos o movimento retilíneo uniforme de um corpo, só tem significado quando comparado com algum outro corpo que sirva como referência. Segundo o princípio da relatividade de Galileu, *não existe um sistema de referência absoluto* em relação ao qual todos os outros movimentos possam ser medidos.

4.2.2.2. Discussão de conceitos e testes 1.1 e 1.2 com o uso de animações

Feita a apresentação das equações de Galileu, como o primeiro modelo matemático para a relatividade e a definição de referencial segundo a MN, foi utilizado o exemplo do “barco de Galileu” para a descrição das trajetórias de uma bola de ferro solta do alto de um mastro, em relação a dois referenciais. Para a discussão do exemplo foi apresentada a animação 1.1 (Figura 3), “o barco de Galileu”. A discussão científica é apresentada a seguir e foi complementada, em sala de aula, com o pensamento pré-galileano, ou seja, segundo este a bola cairia atrás do mastro

Análise da questão Barco de Galileu

A **animação 1.1** (Figura 3) contempla a descrição geral do movimento de queda de um objeto, do alto do mastro de um navio, em relação a observadores que usam dois sistemas de referência em movimento relativo: um deles fixo em um barco, outro fixo na margem de um rio ou mar. Em relação ao primeiro referencial, o barco está em repouso, e em relação ao segundo, a Terra. O quadro superior da Figura 3 representa o primeiro desses referenciais. O movimento de queda descrito por um observador fixo no barco é um movimento de queda livre do objeto ao longo do eixo y , verticalmente para baixo e com aceleração constante (g). Enquanto isso, este observador registra que a Terra e farol se deslocam com velocidade constante V . A bola cai ao pé do mastro.

O quadro inferior da Figura 3 representa o movimento descrito por um observador fixo na margem do rio ou mar, em relação ao qual o farol e a Terra estão em repouso. O barco se desloca com velocidade constante $-V$ na direção do eixo x . O observador fixo neste referencial descreve o movimento como uma composição de um movimento de queda livre na direção do eixo (y) com o movimento do barco na direção do eixo (x). A trajetória observada é parabólica e o objeto cai ao pé do mastro.

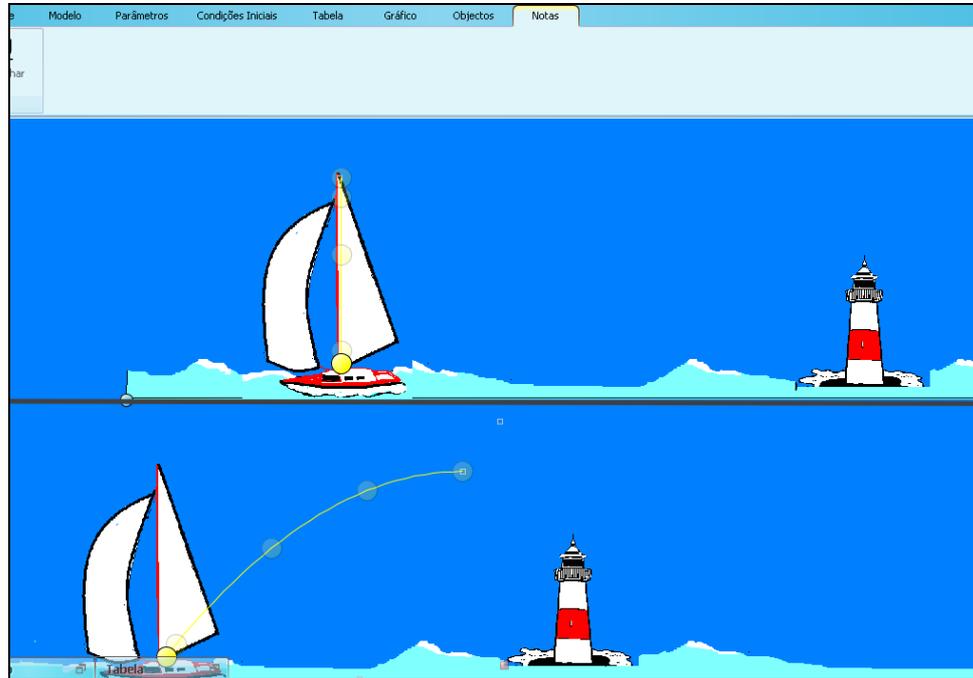


Figura 3- Animação 1.1- No quadro superior, o observador está fixo no referencial do barco, e no quadro inferior o observador está fixo na praia

Além deste, também apresentamos o exemplo da queda livre e do lançamento de projétil, salientando como seria a composição de movimentos na relatividade newtoniana. Para isso,

uma animação específica para este fim foi construída. Ela contempla a brincadeira feita em um parque de diversões, na qual existe o movimento de queda livre de um macaco, enquanto uma pessoa deseja acertá-lo com bolinhas de tinta.

Análise do movimento de uma bolinha de tinta e de um macaco

A **animação 1.2** (composição de movimentos), ilustrada pela figura 4, simula as trajetórias de uma gota de tinta e de um macaco. A gota é disparada em direção a um macaco no exato momento em que este se solta de um galho. Trata-se de uma situação típica de adição de movimentos.

Cinemática envolvida: o observador está solidário ao referencial fixo na Terra e onde a aceleração da gravidade é $g = 9,8 \text{ m/s}^2$. Ele se posiciona na origem $x_p = 0$ e $y_p = 0$, mirando em direção ao macaco no alto de uma árvore. O movimento da bolinha é bidimensional e, portanto, a velocidade é decomposta em dois componentes. Em x_p o movimento é retilíneo e uniforme (V_x é constante), e em y_p o movimento é de queda livre (acelerado para baixo). A trajetória descrita é uma parábola. Por outro lado, existe a situação enfrentada pelo macaco. No mesmo instante em que a bolinha é disparada ele é solto do galho. Sua origem, o galho da árvore, é considerada $y_m = 0$. Sua trajetória descendente é retilínea, ou seja, um movimento comum de queda livre.

A animação nos demonstra que a bolinha sempre acerta o alvo sem que importe a velocidade inicial da bolinha. (Resnick, Halliday & Krane, 2004, p 81). A pessoa sempre acerta! Os vetores (verticais) da Figura 4 determinam a trajetória do macaco e, a cada intervalo de tempo, a bolinha coincide com a posição final deste vetor. A animação representa, através de vetores, esta composição de movimentos.

Se não houvesse aceleração da gravidade, a bolinha também acertaria o alvo, pois a equação para x_p e y_p seria a mesma utilizada para subir um plano inclinado com velocidade constante, com a velocidade decomposta em V_x e V_y (conforme o modelo matemático na animação do *Modellus*). O observador descreveria o movimento da bolinha como uma trajetória retilínea e inclinada, até atingir o macaco. O macaco, por sua vez, permaneceria em repouso na origem, devido à ausência de gravidade.

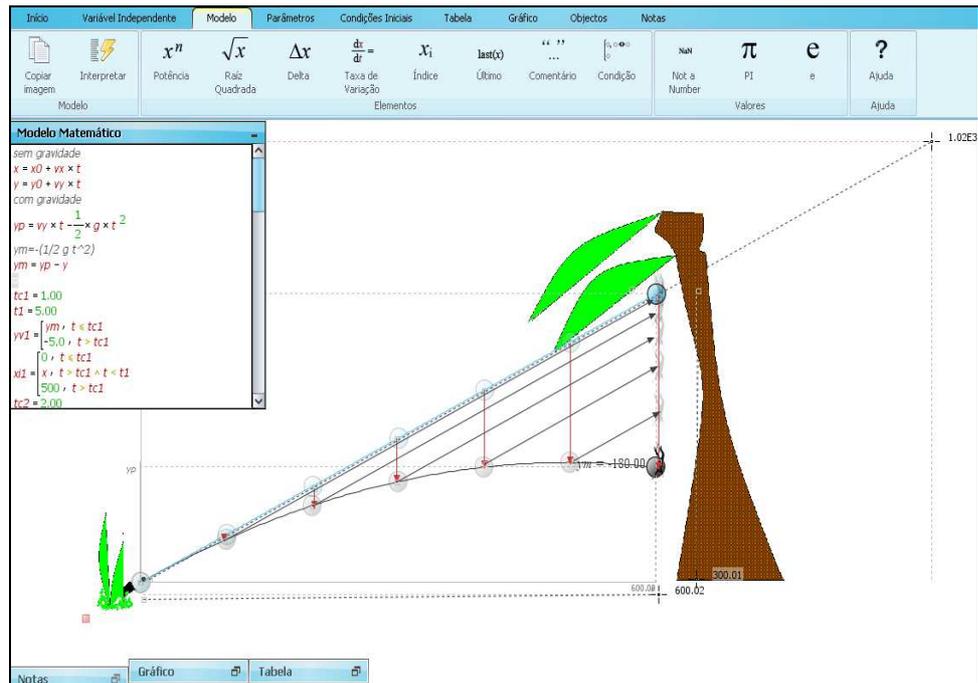


Figura 4 – Animação 1.2 - Composição de movimentos de uma bolinha de tinta e do macaco

A seguir, foi feita a discussão do pré- teste 1.1 (avião-pacote) juntamente com as respectivas animações 1.3 e 1.4, ilustradas nas Figuras 5 e 6, assim como, do pré-teste 1.2.(ultrapassagem dos carros A e B), com as animações 1.5, 1.6 e 1.7. Uma destas últimas está ilustrada pela Figura 7.

Análise da questão de um pacote solto de um avião

Esta animação simula o movimento de queda de um pacote a partir de um avião, em relação a dois sistemas de referência: um fixo na Terra, outro no avião. Serve para ilustrar e discutir o pré-teste 1.1.. Cada situação é representada em uma animação separada.

Na **animação 1.3** (avião–pacote), os observadores estão solidários ao referencial em relação ao qual o avião e pacote estão em repouso. Nesta perspectiva, o referencial em relação ao qual a Terra está em repouso se move com velocidade constante $-V$. No instante em que o pacote é solto se inicia um movimento de queda livre (Figura 5). O ponto da Terra onde o pacote cai pode ser registrado pela figura da árvore.

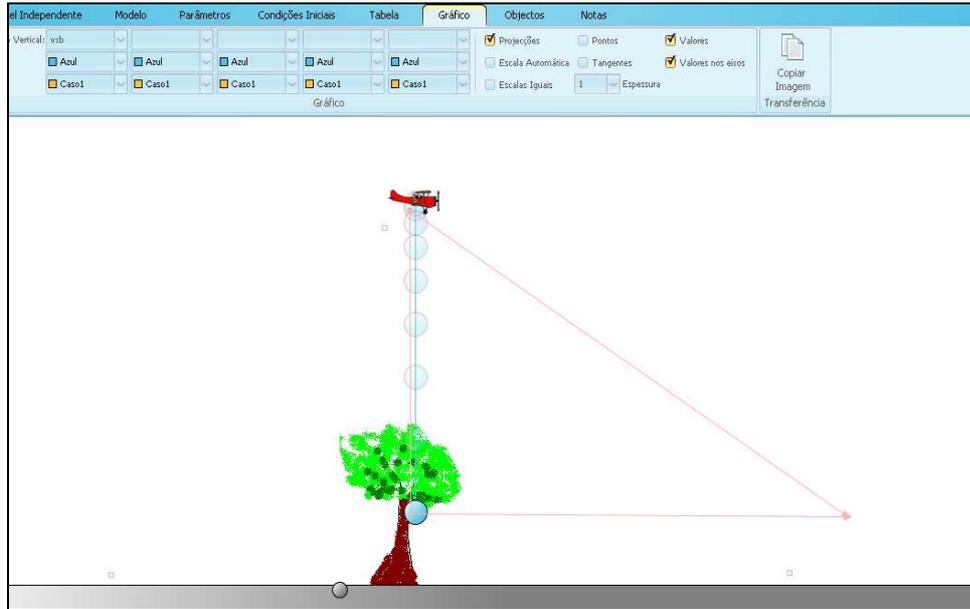


Figura 5 – Animação 1.3- Trajetória do pacote do ponto de vista do observador fixo no avião

Na **animação 1.4** (avião–pacote), os observadores estão solidários ao referencial em relação ao qual a Terra está em repouso. O avião possui uma velocidade V constante na direção do eixo x . Em certo instante, o avião libera um pacote que, por se mover em conjunto com o avião, tem a mesma velocidade deste. Os observadores solidários ao referencial descreverão o movimento como uma composição de queda livre com o movimento que o pacote já possuía antes do início da queda. A trajetória é parabólica, para frente do avião (Figura 6). O pacote cai no mesmo ponto da Terra comentado no parágrafo acima (árvore).

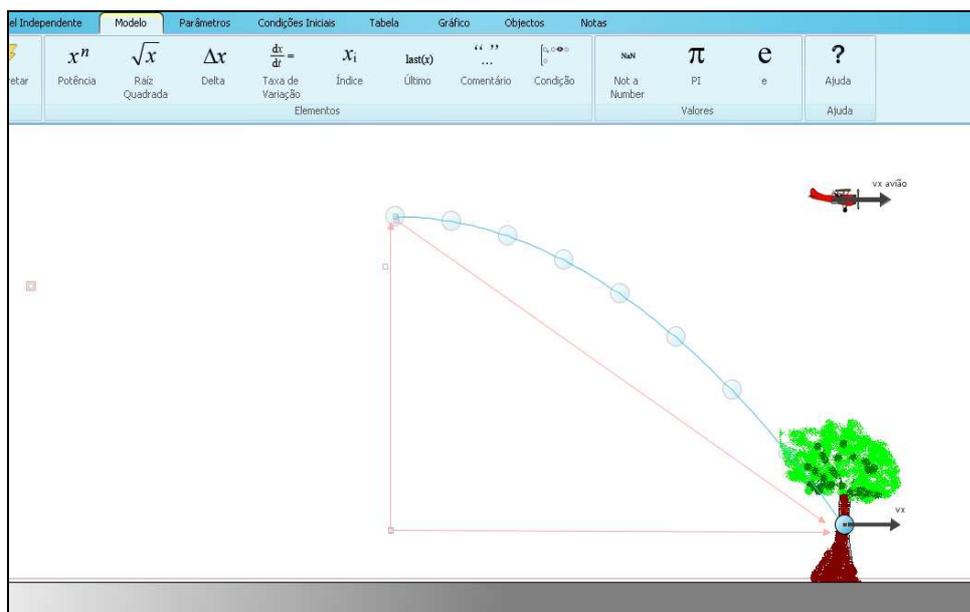


Figura 6 – Animação 1.4 - Trajetória do pacote do ponto de vista do observador fixo na Terra

Análise da ultrapassagem de dois carros A e B

As animações 1.5, 1.6 e 1.7 ilustram o movimento de dois carros A e B em relação a observadores fixos em três sistemas de referências distintos: um que é solidário ao carro A, outro ao carro B, e um terceiro, à pista. Estas servem para ilustrar e discutir o pré-teste 1.2.

A **animação 1.5** descreve a cinemática do processo de ultrapassagem em relação ao observador fixo no carro A - o observador está solidário ao referencial em relação ao qual o carro A está em repouso. Para interpretar o fato de que A ultrapassa B, ele considera que a velocidade V_A é maior do que a velocidade V_B . Neste caso, o observador descreve o movimento do carro B com uma adição de velocidades. A velocidade relativa é, portanto, $V_B - V_A$, resultando como negativa, de modo que o carro B move-se no sentido negativo. Por outro lado, este observador descreve o movimento da pista com velocidade $(-V_A)$.

A **animação 1.6** descreve a cinemática do processo de ultrapassagem em relação ao observador fixo no carro B - o observador está solidário ao referencial em relação ao qual o carro B está em repouso. Para interpretar o fato de que A ultrapassa B, ele considera que a velocidade V_A é maior do que a velocidade V_B . Neste caso, o observador descreve o movimento do carro A, com uma adição de velocidades. A velocidade relativa é, portanto, $V_A - V_B$, resultando como positiva, de modo que o carro A move-se no sentido positivo. Por outro lado, este observador também descreve o movimento da pista com velocidade $(-V_A)$.

A **animação 1.7**, ilustrada pela Figura 7, descreve a cinemática do processo de ultrapassagem de dois carros A e B em relação ao observador fixo na pista - o observador está solidário ao referencial em relação ao qual a pista está em repouso. Ele descreve o movimento dos dois carros A e B com suas respectivas velocidades V_A e V_B (ambas positivas).

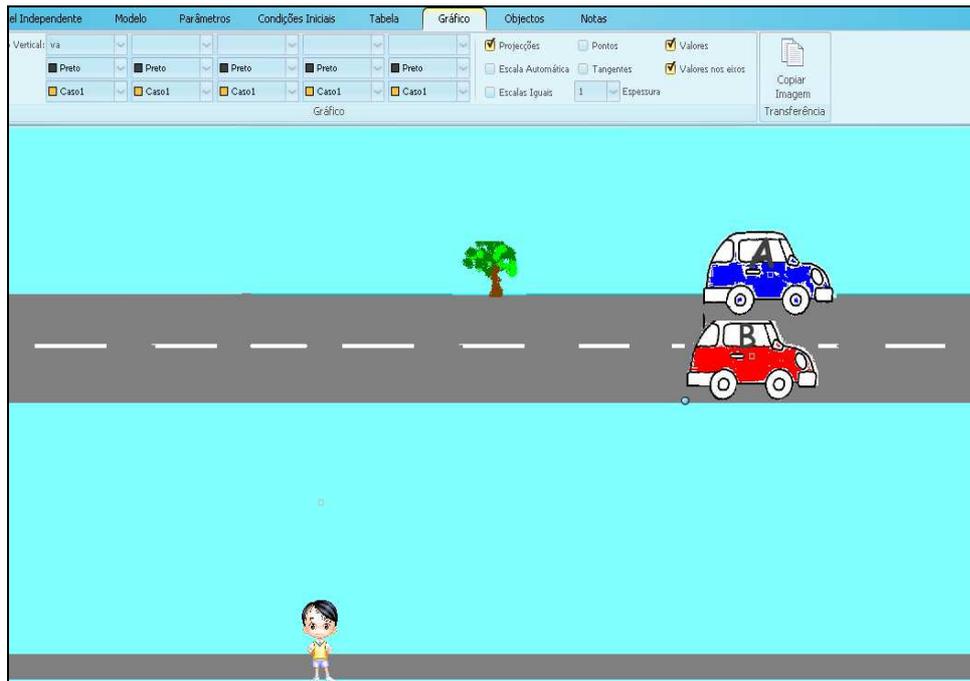


Figura 7 – Animação 1.7- Ultrapassagem de dois carros A e B do ponto de vista de um observador fixo na pista.

4.2.2.3. Aplicação do pré-teste 1.3

No final desta atividade foi feita a aplicação do pré-teste 1.3, envolvendo propagação de um pulso de luz em relação a dois referenciais distintos.

Teste 1.3. Considere um sistema de referência constituído por uma fonte de luz C, um detector A, à direita e outro B, à esquerda, ambos equidistantes L desta. Em certo instante de tempo a fonte emite um pulso, que se propaga de forma esférica e que deve ser registrado pelos detectores. Descreva qualitativamente a recepção do pulso em cada detector A e B se o observador estiver (a) solidário ao referencial onde a fonte está em repouso e (b) solidário ao referencial que se movimenta com velocidade de módulo $v = c/2$ em relação à fonte.

Resposta:

- Os observadores estão fixos no referencial em relação ao qual a fonte e detectores, que são equidistantes (distância L) desta, estão em repouso. De posse dos registros de chegada do pulso aos detectores, eles concluem que o pulso é registrado ao mesmo tempo pelos dois detectores.
- Os observadores estão fixos em um referencial em relação ao qual a fonte se move para a esquerda com velocidade $V = -c/2$. Eles concluem que o pulso é detectado primeiro pelo

detector que se aproxima da frente de onda, e depois pelo detector que se afasta dela. Para eles, o pulso não foi registrado simultaneamente pelos detectores.

4.2.2.4 - Análise e discussão dos resultados do teste 1.3

No decorrer da semana, posteriormente à primeira atividade, foram analisadas as concepções dos alunos referentes ao tema da velocidade da luz. Na turma B, somente quatro alunos participaram da atividade devido a uma forte chuva que caiu sobre a região de Rio Grande neste dia. O item (a) foi respondido corretamente por todos os alunos das turmas A e B, ou seja, a detecção ocorre ao mesmo tempo nos dois detectores, embora as respostas não possam ser consideradas como cientificamente aceitas. Podemos citar como exemplo a resposta do aluno B₂:

a) para um observador solidário ao referencial onde a fonte e detectores estão em repouso vê o raio de luz atingir A e B ao mesmo tempo. (B₂)

No item (b), apenas os alunos B₃, B₇ e B₁₁ apresentaram raciocínio aceitável em termos de detecção do sinal, porém incompleto. Como exemplo, podemos citar B₁₁: *b) Neste caso verei toda esta situação em movimento (fontes e detectores). Verei o raio luminoso chegando mais rápido no detector B do que em A, supondo o sentido positivo de x de B para A.* (B₁₁)

Além disso, o aluno B₂ apresenta sua resposta inicial como “não sei”, comentando oralmente que não entendia nada de relatividade. Sua resposta foi muito confusa e ele representa, através de uma figura, o detector A à esquerda e B à direita:

b) Não sei. Considerando que o pulso de luz está na direção de A move-se em sentido negativo e que o novo referencial move-se no sentido positivo (na mesma direção que o pulso B), imagino que este observador perceberá o pulso A primeiro. (B₂)

Os demais estudantes, A₁, A₂, A₃ e A₄, apresentaram respostas confusas. Um ponto positivo é que os alunos A₁, A₂, A₄, B₂, B₃, B₇ e B₁₁ manifestaram, através de suas respostas, a noção de que, neste referencial, solidário ao referencial que se movimenta com velocidade de módulo $V = c/2$ em relação à fonte, a antena e detectores se movem para esquerda, revelando, assim, a noção de referencial newtoniana em seu perfil conceitual; ou seja, o observador solidário ao referencial que se movimenta verá o outro mover-se em sentido contrário ao seu. Havíamos discutido este fato na atividade 1, nos testes 1.1 e 1.2.

4.2.3. Atividade 3- A Mecânica Relativística

Nesta atividade, seguindo o planejamento das atividades, foram abordados conceitos relacionados à cinemática relativística. Esta abordagem se utilizou de aspectos históricos para explicar a não existência de um referencial absoluto (experimento de Michelson-Morley e contração de Lorentz-FitzGerald). Também introduziu o fator de Lorentz de forma teórica, o conceito de espaço-tempo, no qual o tempo não pode ser tratado como absoluto. Nesta foram apresentados os dois postulados da TRR. As consequências do segundo postulado, como a medição de intervalos de tempo e de espaço, a relatividade da sincronização de relógios e a relatividade da simultaneidade de eventos são discutidas separadamente nas próximas atividades.

O seguinte texto, previamente elaborado com esta finalidade, serviu de apoio para a introdução destes conceitos aos alunos.

4.2.3.1. Texto sobre a Teoria da Relatividade Restrita

Até o final do século XIX, as leis de Newton descreviam o movimento e a gravitação (relatividade newtoniana), e as equações de Maxwell, o eletromagnetismo. No início do século XX os trabalhos de Becquerel, Planck, Einstein, Rutherford, Millikan, Bohr, de Broglie, Schrödinger, Heisenberg e outros levaram à formulação de duas teorias radicalmente inovadoras: a TRR e a Mecânica Quântica. Esta é uma síntese do contexto histórico que levou Einstein a formulação da TRR, fazendo-nos entender que cada teoria contribuiu para a criação de outra. Falaremos com mais detalhes da importância de algumas das teorias que estão relacionadas com a TRR. (TIPLER, 1995)

Desde a antiguidade buscava-se explicar os movimentos dos corpos, e tal busca se estende até o trabalho de Einstein de formulação da TRR. Esta teoria diz respeito a comparação entre medidas efetuadas de um mesmo movimento em relação a diferentes referenciais inerciais quando as velocidades relativas envolvidas são comparáveis à da luz no vácuo. A teoria de Einstein baseia-se em dois postulados, que veremos mais adiante.

Na seção anterior, onde revisamos os *movimentos relativos* clássicos, observamos que as leis de Newton e as transformações de Galileu são válidas para dois ou mais referenciais desde que todos eles sejam inerciais. Como nenhum deles tem preferência em relação a qualquer outro, “*não é possível perceber ou detectar o movimento absoluto*”.

Na segunda metade do século XIX, pensava-se ser possível detectar e medir o movimento absoluto da Terra por meio de algum experimento. Para tal, entre 1881 e 1887, usando um interferômetro inventado por Michelson, este e Morley realizaram uma série de experimentos cada vez mais precisos. A proposta dos dois cientistas era determinar, do ponto de vista de um observador na Terra, a velocidade do planeta em relação ao éter, na época considerado o meio natural de propagação da luz. O interferômetro consistia, basicamente, em um divisor de feixe de luz, constituído por um espelho parcialmente transparente (que deixa passar 50% da luz incidente e reflete a outra metade) e outros dois espelhos comuns, arranjados como mostra esquematicamente a Figura 8. Nela estão representadas as trajetórias de dois raios luminosos, cada qual ao longo de um dos dois braços do aparato, que foi chamado de interferômetro:

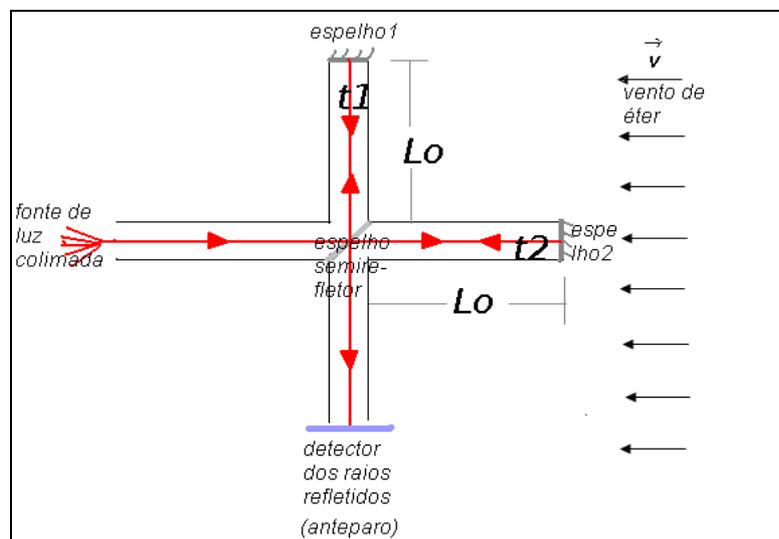


Figura 8 – Representação esquemática do interferômetro.

O aparato foi montado sobre uma laje de mármore que flutuava em uma enorme bacia cheia de mercúrio, de modo a minimizar oscilações de origem externa e, ao mesmo tempo, facilitar que o aparato inteiro, incluindo o detector de raios (uma tela branca), pudesse ser girado em qualquer ângulo em torno de um eixo vertical central. Note que o experimento foi montado fixo em relação à superfície da Terra, de modo que o feixe estaria em movimento em relação ao éter junto com o planeta.

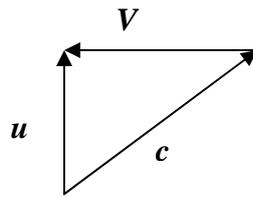
Através deste esquema, podemos visualizar um feixe de luz, proveniente de uma fonte de luz, ser transmitido através do espelho semitransparente e depois incidir nos espelhos comuns 1 e 2, nos limites do braço horizontal e do vertical respectivamente. Note que, os dois raios que seguem, do semi-espelho, pelos dois braços do interferômetro são *coerentes* entre si, apesar de luz proveniente da fonte, antes de ser dividida pelo semi-espelho, não ser coerente (trata-se de

luz comum). E note também que, na figura, estamos ilustrando tão somente um raio proveniente da fonte cuja direção é paralela ao eixo do instrumento (a direção horizontal). É claro que outros raios são emitidos pela fonte e que estes não estarão alinhados com o eixo do instrumento. Após os raios coerentes incidirem nos espelhos comuns, eles retornam ao semi-espelho onde, cada um, é novamente dividido, resultando, portanto, em quatro novos feixes coerentes entre si, dos quais dois se dirigem para o anteparo, onde, então, se pode observar um padrão de interferência originado pelos feixes. Dependendo do ponto onde eles atingem simultaneamente o anteparo, sua combinação (soma) pode resultar em interferência (total ou parcial) construtiva ou destrutiva, conforme o valor da diferença de fase entre eles. Este valor, ou seja, o espaçamento entre as franjas, por sua vez, dependerá do comprimento de onda da luz usada, dos comprimentos dos braços (eles não precisam ser iguais) e da inclinação do feixe original em relação da geometria do interferômetro. Se a diferença entre o número de onda n for inteira haverá reforço, e se for $\frac{1}{2}+n$, será destrutiva.

Com base na relatividade de Galileu e na suposta existência do éter, podemos prever teoricamente os resultados que Michelson e Morley esperavam obter ao girar o aparato todo em 90 graus. Uma vez que o movimento é relativo (Galileu), podemos considerar a Terra como o referencial, em relação ao qual, obviamente, o planeta se encontra em repouso, e o éter se move, de modo que o interferômetro e a luz estão sob a influência de um “vento de éter”. Para facilitar o raciocínio, vamos supor que o vento de éter sopra horizontalmente da direita para a esquerda.

Para o braço 1, propagação vertical em relação ao éter, considere a resultante u , da velocidade V , do aparato em relação ao éter, e c , o módulo da velocidade da luz, obtido a partir das equações Maxwell, das quais falaremos mais adiante. (Barros *et al*, 2005) Vamos fazer uso de uma analogia entre o movimento de propagação da luz na direção, indicada por um raio, e um barco que navega em um rio com correnteza significativa na direção e no sentido do vento de éter na nossa figura. Neste caso, o barco atravessa o rio transversalmente. A velocidade do barco, resultante, é a soma das velocidades V da correnteza do rio (análoga ao “vento de éter”), e c , a sua própria velocidade (raio de luz).

Representando a adição destes vetores graficamente, temos:



e, assim, podemos calcular o módulo da velocidade resultante por meio do teorema de Pitágoras:

$$c^2 = V^2 + u^2$$

$$u = \sqrt{c^2 - V^2}$$

Logo, o tempo transcorrido para a luz percorrer o braço 1, na ida e volta, é

$$t_1 = \frac{2L_0}{\sqrt{c^2 - V^2}}$$

$$= \frac{2L_0}{c} \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

Para a luz que se propaga pelo braço 2, a analogia é com um barco que navega contra ou a favor da correnteza do rio. O módulo da velocidade resultante u na ida (a favor) é igual a $(c - V)$, e, na volta (contra), igual a $(c + V)$. Portanto, o tempo correspondente a ida e volta (t_2) é dado por

$$t_2 = \frac{L_0}{(c - V)} + \frac{L_0}{(c + V)}$$

$$= \frac{(c + V)L_0 + (c - V)L_0}{(c^2 - V^2)}$$

$$= \frac{2L_0c}{(c^2 - V^2)}$$

ou seja,

$$t_2 = \frac{2L_0}{c} \frac{c}{(1 - \frac{V^2}{c^2})}$$

Assim, concluímos que

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \Rightarrow t_2 = t_1 \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \quad (3)$$

de modo que $t_2 > t_1$.

Era essa diferença nos tempos, prevista teoricamente, que Michelson e Morley esperavam obter ao girar o aparato todo em 90 graus. Tal resultado implicava a existência de uma alteração no padrão de franjas de interferência quando o interferômetro fosse girado em 90° ao redor de um eixo central e vertical, quando as posições dos braços seriam trocadas uma com a outra. Com o papel dos braços trocados um com o outro, o padrão de franjas (anéis concêntricos, na realidade) de interferência deveria sofrer um deslocamento no anteparo. Porém jamais foi detectada qualquer alteração no padrão de anéis de interferência em qualquer das inúmeras repetições do experimento, realizadas exaustivamente ao longo de 6 anos. Este resultado parecia demonstrar cabalmente que a diferença dos tempos era nula, ou seja, a irreabilidade do éter - e, portanto, do movimento absoluto da Terra – ou, se não, algum outro efeito estaria intervindo no experimento de modo que nenhuma variação ocorresse no padrão de interferência. E se o éter realmente existisse, resultados negativos da experiência (não ter jamais ocorrido um deslocamento no padrão de anéis de interferência) parecia contradizer o próprio princípio da relatividade clássica. (Karan, Cruz & Coimbra, 2006) Em um artigo (1889), o físico irlandês George Francis Fitzgerald (1851-1901) descreve a influência do éter na estrutura material dos objetos. Portanto, para ele, os resultados negativos das experiências de Michelson-Morley eram explicados pela contração dos braços do interferômetro. Essa idéia, foi desenvolvida pelo físico holandês Hendrick Antoon Lorentz (1853-1928), levando em conta as equações, de 1895, para o comportamento das ondas sonoras ao vento. A estas equações, em 1903, ele introduziu a contração proposta por Fitzgerald . Para explicar a igualdade dos tempos observada a partir do experimento de Michelson e Morley, Lorentz propôs a introdução de um termo multiplicativo $\gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ (maior do que 1) de modo que a diferença de tempo entre os dois braços fosse nula, termo que hoje conhecemos como o *fator de Lorentz*. (MOURÃO, 1997)

A hipótese dos dois cientistas, conhecida como *contração de Lorentz- Fitzgerald*, é de que, quando um corpo sólido se movimenta através do éter, seu comprimento na direção do movimento sofre uma contração material. Ou seja, seu comprimento diminui porque, de acordo com Fitzgerald e Lorentz, diminuem as distâncias entre seus átomos/moléculas constituintes vizinhos, na direção de movimento. A diminuição das distâncias interatômicas ocorreria devido

a uma espécie de atrito entre cada uma das partículas constituintes e o éter através do qual se movem. Dessa maneira, no caso do nosso exemplo da figura 8, o comprimento do braço horizontal seria menor do que o comprimento do braço vertical, que é perpendicular ao movimento (este também sofreria uma diminuição de sua largura). Assim, se o comprimento do braço vertical (não-contraído) for representado por L_0 , o comprimento do braço paralelo à direção do movimento é $L < L_0$. Assim, para que os tempos t_1 a t_2 sejam iguais, e não exista uma diferença de fase não-nula entre os dois feixes coerentes que atingem o anteparo, é necessário que

$$\frac{\frac{2L_{01}}{c}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{\frac{2L_{02}}{c}}{(1-\frac{V^2}{c^2})}.$$

Logo,

$$L = L_0 \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}} \quad (4)$$

Esta deve ser a relação entre os comprimentos dos dois braços do interferômetro a fim de que não se note nenhum deslocamento de anéis de interferência no anteparo.

Note que, de acordo com esta interpretação, tal contração teria um caráter absoluto, pois todos os observadores em movimento relativo ao éter deveriam medir a mesma contração, isto é, o mesmo valor de L contraído. Curiosamente, a relação acima foi deduzida por Einstein em 1905, mas com uma interpretação e um significado inteiramente diferentes, como veremos mais adiante.

A história do éter luminífero consiste em um dos mais duradouros erros na ciência, porém não pode deixar de ser relatada em detalhes para que o significado das fórmulas seja entendido pelos estudantes.

Sobre a equação de Maxwell, referida anteriormente, sabe-se que ele obteve uma equação de onda a partir de suas quatro equações de campo do eletromagnetismo, considerando uma região do espaço livre (ausência de cargas e correntes elétricas). A equação obtida fornecia automaticamente o valor da velocidade da onda e descrevia sua propagação no vácuo, ou seja, meio que separava o Sol e a Terra. O valor encontrado, identificado a partir do termo $1/v^2$, na equação da onda, depende apenas de duas constantes eletromagnéticas (ϵ_0 e μ_0) e fornece o valor da velocidade da luz como

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (5)$$

onde ϵ_0 e μ_0 são, respectivamente, a constante de permissividade elétrica do vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ Farad /metro) e a constante de permeabilidade magnética do vácuo ($1,26 \times 10^{-6}$ Henry/metro) respectivamente. Calculando este valor, obtemos $2,997925 \times 10^8$ m/s. A confirmação experimental de que a luz é uma onda eletromagnética foi feita por Hertz, em 1887, em concordância com as previsões teóricas de Maxwell.

Como já sabemos, todas as experiências que se referem a existência do éter como meio de propagação da luz foram mal sucedidas. Portanto, a questão a ser respondida era: Em relação a que referencial era medida essa velocidade? A proposta da medida em relação ao éter implicava que as equações de Maxwell somente tinham validade para o observador em repouso em relação a este meio. Sendo assim, outro observador que se movesse com velocidade constante V em relação ao éter, mediria $c+V$ ou $c-V$, conforme o sentido de sua velocidade (equações de Galileu). Entretanto, sabemos que o valor da velocidade da luz (c) é constante no vácuo, logo as equações de Galileu foram violadas.

As inconsistências encontradas estavam relacionadas ao princípio da relatividade, que estabelece que as leis da física, em qualquer sistema físico, devem tomar a mesma forma desde que sejam sistemas de coordenadas inerciais. Por esta razão, tais inconsistências levaram a proposta de três alternativas:

1. O princípio da relatividade seria válido apenas para a mecânica newtoniana e as equações de Maxwell seriam válidas apenas para o referencial de repouso em relação ao éter.

2. O princípio da relatividade seria válido para a mecânica newtoniana e eletromagnetismo, mas as equações de Maxwell precisariam ser modificadas de modo que a velocidade da luz com relação a fonte emissora fosse sempre c .

3. O princípio da relatividade seria válido tanto para a mecânica newtoniana quanto para o eletromagnetismo, mas as equações referentes às transformações de coordenadas de Galileu precisariam ser modificadas.

Einstein escolheu a terceira alternativa para construir a TRR em 1905. Portanto o eletromagnetismo foi a principal motivação para a origem da TRR. (RICCI, 2000)

Outro problema que ainda restava a ser solucionado, referia-se à adição das velocidades. Para observadores em diferentes referencias inerciais, em movimento relativo, a velocidade da luz é c , tanto para um referencial como para outro. O cálculo da velocidade relativa, por exemplo, de duas partículas que se movem em relação a um observador solidário a seu

referencial, nunca pode exceder o valor de c . Esta solução veio em 1922, quando Einstein revisou o conceito de tempo da física newtoniana. O tempo não poderia ser tratado como absoluto.

Mais tarde (em 1904), Lorentz mostrou que as equações de Maxwell não são covariantes frente às transformações de Galileu, e sim frente a outras transformações, conhecidas hoje como as *transformações de Lorentz*.

Depois de todas as tentativas infrutíferas de detectar o movimento da Terra em relação ao éter, Henri Poincaré propôs que o “princípio da relatividade” é válido para todos os tipos de fenômenos.

Assim, quando, em 1905, Einstein publicou seu primeiro artigo sobre relatividade, já havia sido formulado o princípio da relatividade e as transformações de Lorentz para o espaço e o tempo. No mesmo ano, Einstein deduz a equação da contração do comprimento de objetos em movimento a partir das Transformações de Lorentz, determinando as propriedades do espaço-tempo. Esta equação foi deduzida a partir de um dos postulados propostos por Einstein, o de que a velocidade de propagação da luz no vácuo é sempre medida como $c = 300.000 \text{ km/s}$ em relação *a todo e qualquer* referencial inercial. Este é o famoso postulado da invariância da velocidade da luz no vácuo. (op.cit)

Como podemos concluir uma grande parte da teoria já estava pronta até então. Ela foi construída ao longo do tempo por um conjunto de pesquisadores. Apesar disso, Einstein teve que combater a hipótese da existência do éter até por volta de 1920.

Os Postulados de Einstein

Os dois postulados propostos por Einstein em seu artigo original de 1905 (Saraiva M. J., 1971) são:

1º) As leis da Física são as mesmas em relação a qualquer referencial inercial; ou seja, não existe um referencial inercial preferencial em relação aos demais (o princípio da relatividade clássica)

2º) A luz se propaga no espaço vazio com uma velocidade cujo módulo é sempre o mesmo ($c = 300.000 \text{ km/s}$), *independentemente* do estado de movimento da fonte emissora ou do observador.

4.2.3.2. Discussão dos postulados e teste 1.3. com uso de animações

Com auxílio de animações, foi discutido o teste 1.3 envolvendo um pulso de luz. Através das animações 1.8 e 1.9 (pulso clássico) e 2.1 e 2.2 (pulso relativístico), salientamos e

diferenciamos as duas situações frente ao segundo postulado da TRR. Ao fim da atividade, deve ficar claro para o estudante que o valor da velocidade da luz no vácuo é uma constante e independe do movimento da fonte em relação ao observador.

Análise da recepção de um pulso luminoso por detectores de acordo com a mecânica newtoniana

As animações, 1.8. e 1.9., contemplam a descrição de um pulso clássico de luz esférico, isto é, a adição da velocidade da luz com a da fonte, aparentando que o pulso depende do movimento da fonte, o que contradiz o segundo postulado da TRR. Cada uma dessas animações foi construída com o propósito de discutir a consequência observada, ou seja, o pulso é detectado simultaneamente pelos detectores seja qual for o referencial usado. Isto não está de acordo com a TRR.

Na **animação 1.8** (pulso clássico a), no quadro inferior (Figura 9), os observadores estão fixos no referencial em relação ao qual a fonte e detectores estão em repouso. De posse dos registros da chegada do pulso aos detectores, os observadores registram as recepções como simultâneas. Na mesma animação, quadro superior, os observadores estão fixos em um referencial que se move em relação ao primeiro e, nesta perspectiva, o referencial onde a fonte encontra-se em repouso é que se move para esquerda com velocidade $-V$. Para estes observadores, a origem do pulso acompanha o movimento da fonte e, novamente, eles concluem que a detecção do pulso pelos dois detectores é simultânea.

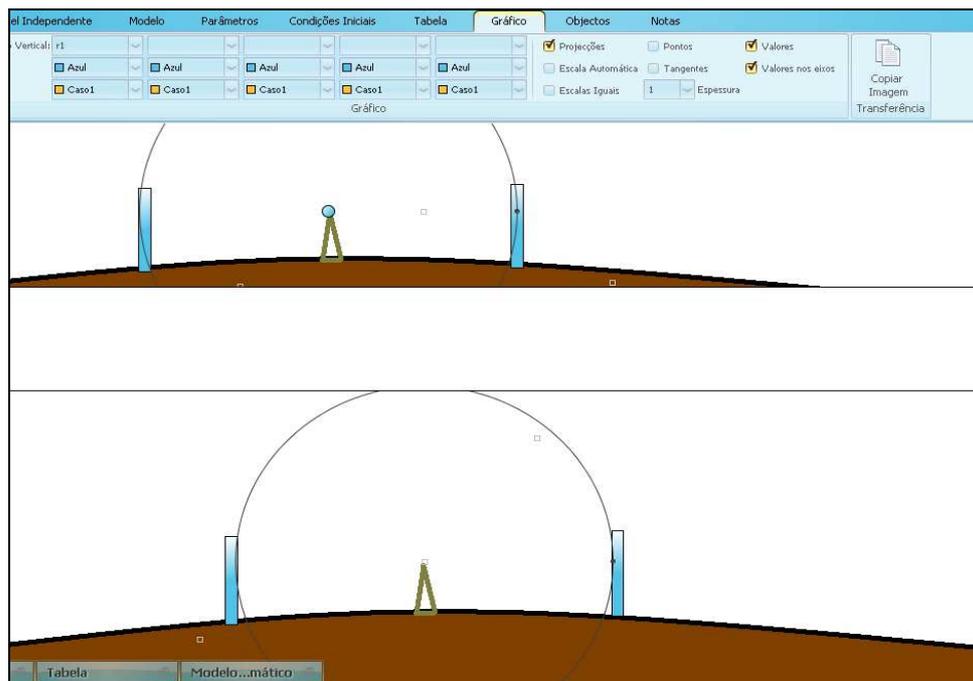


Figura 9 – Animação 1.8- Representação de um pulso de luz clássico

É neste momento que o aluno deve obter a primeira informação em nível da TRR: a velocidade da luz é constante (no vácuo, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), uma velocidade limite no vácuo independentemente do movimento da fonte, ou seja, não pode ser adicionada à velocidade da fonte. O pulso se expande a partir de um centro fixo, mesmo que a fonte se mova.

Outra **animação, 1.9**. (pulso clássico b), faz uma troca de referencial. A situação deve ser analisada de forma que, no quadro superior, os observadores estão fixos no referencial, em relação ao qual, as antenas e a fonte estão em repouso e, no quadro inferior, estão solidários a outro referencial que se move em relação ao primeiro. Neste último, a antena e fonte se movem para a direita com velocidade V .

Análise da recepção de um pulso luminoso (relativístico) por dois detectores

As animações **2.1** e **2.2** contemplam a descrição de um pulso de luz esférico relativístico, isto é, a velocidade da luz independe do movimento da fonte.

Na **animação 2.1** (pulso relativístico a), no quadro inferior da Figura 10, os observadores estão fixos no referencial em relação ao qual a fonte e detectores, que são equidistantes (distância L) desta, estão em repouso. De posse dos registros de chegada do pulso aos detectores, eles concluem que o pulso é registrado ao mesmo tempo pelos dois detectores. No quadro superior (Figura 10), os observadores estão fixos em um referencial em relação ao qual a fonte se move para a esquerda com velocidade $V = -c/2$. Note que, diferentemente da situação apresentada na animação 1.8, eles concluem que o pulso é detectado primeiro pelo detector que se aproxima da frente de onda, e depois pelo detector que se afasta dela. Para eles, o pulso não foi registrado simultaneamente pelos detectores.



Figura 10 – Animação 2.1- Representação de um pulso de luz relativístico

Outra **animação, 2.2** (pulso relativístico b), faz uma troca de referencial. A situação deve ser analisada de forma que, no quadro superior, os observadores estão fixos no referencial em relação ao qual, as antenas e a fonte estão em repouso e, no quadro inferior, os observadores estão solidários a outro referencial, que se move para direita com velocidade $V = c/2$ em relação ao primeiro.

4.2.3.3. Aplicação do pós-teste

No final da atividade, foi proposto o teste extraído da referência Villani & Pacca (1986). Este teste teve como objetivo medir a evolução das concepções dos alunos em relação à TRR e, por isso, foi considerado como um pós- teste.

Teste 2.1. Considere dois trens, TA e TB, que se deslocam na mesma direção e sentidos opostos com velocidade $V = c/2$ em relação aos trilhos. Em um determinado instante de tempo, os dois trens se cruzam em frente a uma estação. Neste instante, a antena de rádio da estação emite dois sinais eletromagnéticos, A e B, em sentidos opostos, sendo que o sinal A é emitido no mesmo sentido do movimento de TA, e o sinal B, no mesmo sentido de TB. Considere a existência de uma antena receptora, C, disposta a uma distância L da estação, que detecta o sinal B. A figura 11 seguinte ilustra a situação.

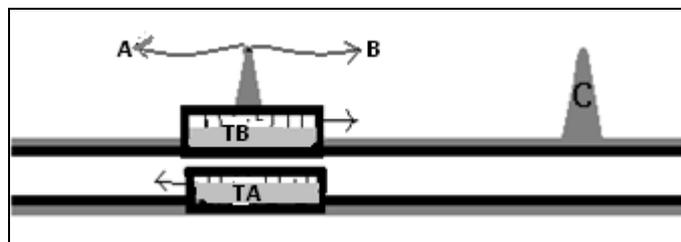


Figura 11- Referencial das antenas

- Em relação a um referencial solidário à estação, a que distância da antena de rádio estarão os trens TA e TB e o sinal A quando B atingir a antena C? Justifique sua resposta.
- Suponha que você seja um passageiro do trem TB. Quando o sinal B atingir a antena C, quais dos dois sinais (A ou B) estará mais próximo de você? Justifique sua resposta.
- Se você for um passageiro do trem TA, quando o sinal B atingir a antena C, qual dos sinais (A ou B) estará mais próximo de você? Justifique sua resposta.
- Suas respostas aos itens anteriores são consistentes com o 2º Postulado da TRR? Justifique.

Respostas:

a) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual a estação, fixa na Terra e que contém as duas antenas (emissora e receptora), está em repouso. Nesta perspectiva, ele descreve o movimento dos dois trens como em movimento em sentidos opostos com velocidades de módulo $V = c/2$. Sendo L a distância entre as antenas, o intervalo de tempo que a luz do pulso B leva para chegar até C é $\Delta t = L/c$. Neste mesmo intervalo, cada trem percorre uma distância $L/2$, de modo que a distância entre eles é L . À medida L obtida neste referencial chamamos de comprimento próprio. Por outro lado, a medição do comprimento dos trens, neste referencial, é contraída pelo fator gama de Lorentz.

b) O observador está solidário ao referencial em relação ao qual o trem TA está em repouso. Em relação a este referencial, as antenas é que se movem com $V = c/2$. A velocidade relativa U , entre o trem TB e TA, é calculada pela equação típica da TRR,

$$u = \frac{(v_B + v_A)}{\left(1 + \frac{v_A \cdot v_B}{c^2}\right)} \quad (5)$$

e tem valor $U = 4/5c$.

A distância entre as antenas deve ser contraída pelo fator gama de Lorentz, assim como o comprimento do trem B. Considerando a antena C se afastando do trem B, o intervalo de tempo para a recepção do pulso B será $\Delta t = L/(c-v)$ e, portanto, é maior do que o intervalo medido pelo observador de TB (questão 1.c). Entretanto, a resposta à questão 1.c também tem relação com a distância percorrida pelos dois sinais e, pelo fato da velocidade da luz ser constante em todas as direções, os dois sinais estão equidistantes do trem A quando o pulso B é detectado pela antena C.

c) O observador está fixo no referencial em relação ao qual o trem TB está em repouso. Para ele, as antenas se movem com $V = -c/2$. A velocidade relativa entre o trem TB e o trem TA deve ser calculada pela equação 4, da qual resulta o valor $U = -4/5c$. A distância medida entre as antenas deve ser contraída pelo fator gama de Lorentz, assim como o comprimento do trem TA. Considerando a antena C se aproximando do trem B, o intervalo de tempo decorrido para a percepção do pulso B será $\Delta t = L/(c+v)$. Entretanto, a resposta à questão 1b tem relação com a distância percorrida pelos pulsos A e B para o observador que está fixo no referencial de TB. Ele deverá responder que, no instante da chegada do pulso B à antena C, o pulso A, mesmo não sendo detectado por nenhuma antena, percorre a mesma distância de B. Isto está de

acordo com o segundo postulado da TRR, pois a velocidade da luz é constante em todas as direções e sentidos, e independe do movimento da fonte.

d) Conforme discutido nos itens anteriores, as respostas às questões a, b e c estão de acordo com o postulado da invariância da velocidade da luz. Uma das razões para isso é o cálculo de velocidade relativa entre os dois trens em movimento. A outra tem relação com a distância percorrida pelos dois sinais, medidas no momento da detecção pela antena C. Assim, conclui-se que a velocidade da luz é constante em todas as direções e sentidos e, o limite no vácuo (3×10^8 m/s).

4.2.3.4. Análise e discussão dos resultados sobre o pós- teste 2.1

Da análise do pós- teste 2.1, concluímos que:

No item (a), em que o referencial usado pelo observador é solidário às antenas, tivemos os alunos da turma A, A₁, A₂, A₃ e A₄, revelando noções relativísticas acerca da velocidade da luz. Na turma B, participaram sete alunos, B₂, B₃, B₄, B₅, B₈, B₉ e B₁₀, e destes também podemos dizer que todos revelaram noções relativísticas. Podemos exemplificar isto transcrevendo as respostas de alguns alunos:

a) Como a velocidade dos trens é $v = c/2$, então os trens estarão a $d = L/2$, e o sinal A estará a $d = L$ (da antena emissora). (B₁₀)

a) A velocidade do sinal B é a velocidade da luz, então ele percorrerá a distância L de uma antena a outra no tempo igual a L/c . Já os trens têm velocidades (em módulo) de $v = c/2$, assim percorrem uma distância L no tempo (distância entre os trens). (B₄)

Nos itens (b) e (c), todos os alunos, com exceção de B₂, apresentam a noção de aproximação ou afastamento das antenas sob o ponto de vista do observador no interior dos trens, conforme o sentido de seus deslocamentos. Entretanto, eles não respondem corretamente de acordo com o segundo postulado sobre a distância percorrida pelo sinal A e a distância percorrida pelo trem em movimento relativo. Ou seja, eles ainda não perceberam que as velocidades escalares dos sinais eletromagnéticos independem do movimento da fonte, e o observador, solidário a cada um dos trens, estará em repouso também em relação a origem destes sinais. Sendo assim, este observador deverá medir distâncias iguais para ambos os percursos dos sinais A e B, já que sua propagação se dá com a mesma velocidade em todas as direções e sentidos. Para exemplificar, apresentemos algumas dessas respostas:

b) O sinal B, pois estarei me deslocando na mesma direção que ele. (B₄)

b) O sinal B, pois ele se move no mesmo sentido do trem TB e, assim, TB estaria a uma distância $d = L$ de A e $D > L$ de B. (B₈)

c) O sinal A, pois está no mesmo sentido de A, enquanto B se afasta. (B₅)

c) Neste caso o sinal A estará mais próximo do observador solidário ao movimento do trem A, pois ambos (sinal e trem A) se movem no mesmo sentido (A₁)

Consideramos de muita importância, para o resultado do trabalho até então apresentado, as respostas do aluno B₂. Ele apresentou um raciocínio (através de um desenho) e também uma linguagem adequada para responder às questões. Foi este aluno que, na atividade anterior, havia se manifestado quanto ao fato de não entender nada de relatividade. Observamos, desde o início, que ele se mostrou muito interessado em aprender - a tão comentada pré-disposição em aprender que faz parte da aprendizagem significativa. Desta forma, é importante a transcrição de suas respostas:

b) Alguém solidário ao referencial do trem B observa a estação e antena mover-se para a esquerda com velocidade $c/2$. Assim, quando atinge a antena, o trem TB está na mesma distância dos dois pulsos, pois a fonte da luz (local de onde foi emitido o pulso) permanece imóvel, independente do movimento do referencial. c) Alguém solidário ao trem A observa a estação mover-se para a direita com velocidade $c/2$, mas o local do pulso de luz permanece imóvel. Assim, quando o pulso de luz B atinge a antena, o pulso A está a mesma distância do trem. (B₂)

O item (d) questiona sobre a certeza das respostas anteriores estarem de acordo com o segundo postulado. Nas respostas, apareceram muitos termos como “não sei”, “não tenho muita certeza” ou “acredito que sim”. Além disso, os alunos não relacionaram esta questão àquelas respondidas anteriormente. Destacamos como exemplo, a resposta do aluno B₉: *d) Acho que a letra (a) está de acordo. Sobre as letras (b) e (c) não tenho muita certeza se concordam com o postulado da Teoria da Relatividade.* (B₉)

No entanto a aluno B₂, que já havia escolhido as alternativas a, b e c, aceitáveis pela TRR, respondeu: *d) Sim, pois a velocidade da luz independe do referencial. O local de origem do pulso permanece imóvel.* (B₂)

Concluimos que, com exceção de B₂, os demais alunos continuam com dificuldade de descrever os movimentos para observadores que estão solidários ao referencial que se movimenta.

4.2.4. Atividade 4 - O conceito de Referencial na TRR e os efeitos de contração de comprimento e dilatação do tempo

Na quarta atividade, iniciamos com a discussão das respostas do pós-teste que foi aplicado na atividade anterior. Esta foi complementada com o uso das animações 2.3, 2.4, 2.5 e, novamente, voltamos a apresentar as animações 2.1. e 2.2, que se referem à independência da velocidade da luz em relação ao movimento da fonte. Discutimos as respostas aceitas cientificamente para cada referencial.

4.2.4.1. Discussão do pós- teste 2.1 e descrição do movimento com uso de animações

Na **animação 2.3** - trens A e B e referencial fixo na plataforma (figura 12) - o observador está solidário ao referencial em relação ao qual a estação, fixa na Terra e que contém as duas antenas (emissora e receptora), está em repouso. Esta discussão deve responder a questão (1.a). Nesta perspectiva, ele descreve o movimento dos dois trens como em movimento em sentidos opostos com velocidades de módulo $V = c/2$. Sendo L a distância entre as antenas, o intervalo de tempo que a luz do pulso B leva para chegar até C é $\Delta t = L/c$. Neste mesmo intervalo, cada trem percorre uma distância $L/2$, de modo que a distância entre eles é L . À medida L obtida neste referencial chamamos de comprimento próprio. Por outro lado, a medição do comprimento dos trens, neste referencial, é contraída pelo fator gama de Lorentz (discutido no texto de apoio). Esta animação facilita a descrição da resposta à questão 1a, porém deve-se deixar claro que se está fazendo uma simples representação do pulso de luz como um segmento de reta. O pulso, na realidade, tem forma esférica.

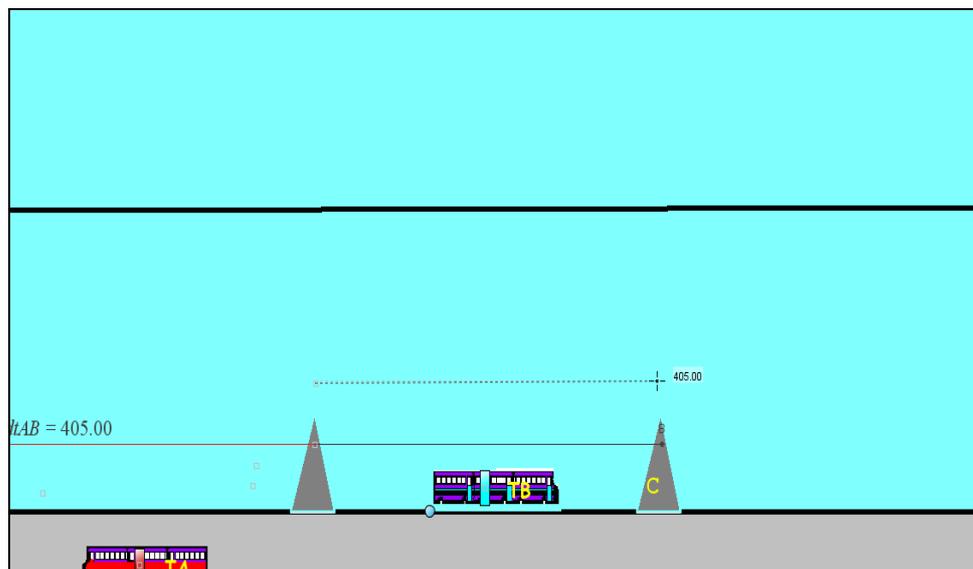


Figura 12-Animação 2.3- Referencial fixo na plataforma

Na **animação 2.4** - Trens A e B e referencial fixo no trem A - o observador está solidário ao referencial em relação ao qual o trem TA está em repouso (Figura 13). Em relação a este referencial, as antenas é que se movem com $V = c/2$. A velocidade relativa entre o trem TB e TA, calculada pela equação,

$$u = \frac{(vB + vA)}{\left(1 + \frac{vA \cdot vB}{c^2}\right)}$$

tem valor $U = 4/5c$.

A distância entre as antenas deve ser contraída pelo fator gama de Lorentz, assim como o comprimento do trem B. Considerando a antena C se afastando do trem B, o intervalo de tempo para a recepção do pulso B será $\Delta t = L/(c-v)$ e, portanto, é maior do que o intervalo medido pelo observador de TB. Entretanto, existe uma relação com a distância percorrida pelos dois sinais e, pelo fato da velocidade da luz ser constante em todas as direções, os dois sinais estão equidistantes do trem A quando o pulso B é detectado pela antena C.

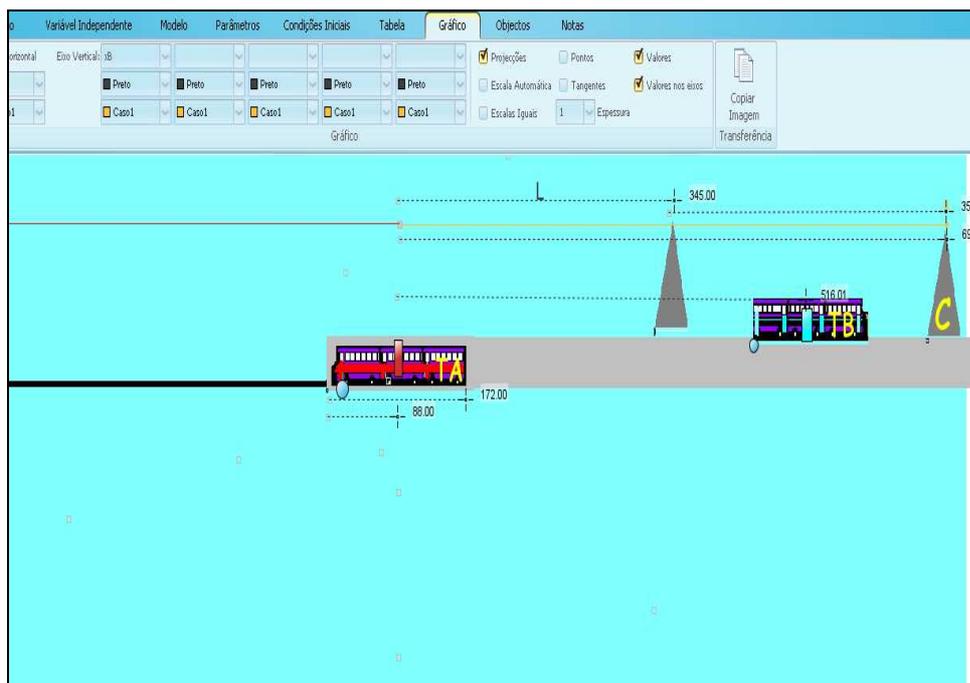


Figura 13 – Animação 2.4 - Referencial fixo no trem A

Na **animação 2.5** - Trens A e B e referencial fixo no Trem B - o observador está fixo no referencial em relação ao qual o trem TB está em repouso (Figura 14). Para ele, as antenas se movem com $V = -c/2$. A velocidade relativa entre o trem TB e o trem TA, resulta o valor $U = -4/5c$. A distância medida entre as antenas deve ser contraída pelo fator gama de Lorentz, assim como o comprimento do trem TA. Considerando a antena C se aproximando do trem B, o intervalo de tempo decorrido para a percepção do pulso B será $\Delta t = L/(c+v)$. Entretanto, existe uma relação com a distância percorrida pelos pulsos A e B para o observador que está fixo no referencial de TB. Ele deverá responder que, no instante da chegada do pulso B à antena C, o pulso A, mesmo não sendo detectado por nenhuma antena, percorre a mesma distância de B. Isto está de acordo com o segundo postulodo da TRR, pois a velocidade da luz é constante em todas as direções e sentidos, e independe do movimento da fonte.

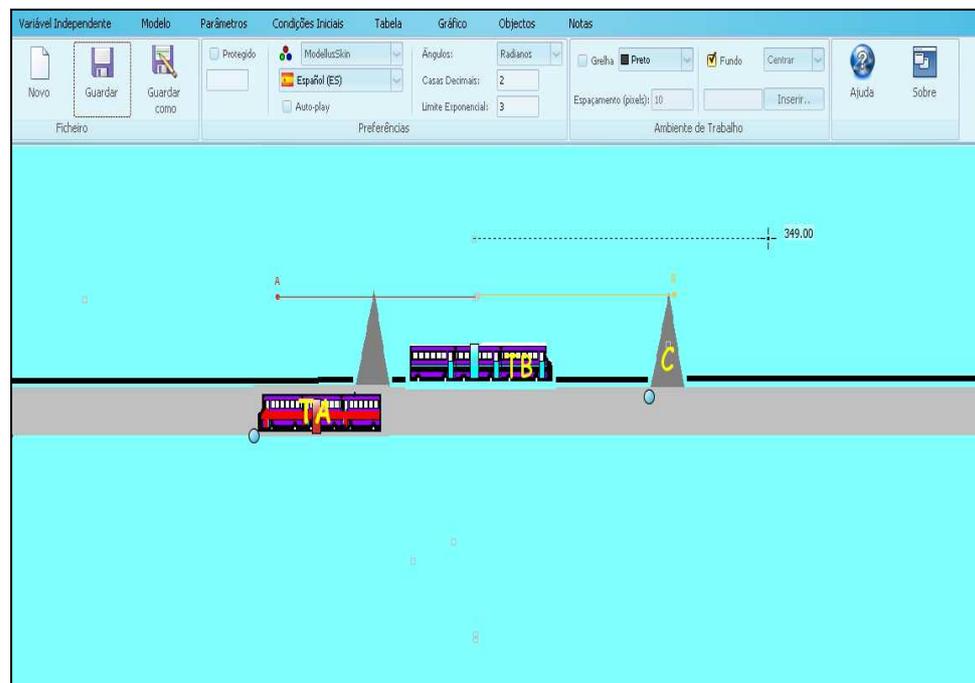


Figura 14 – Animação 2.5 - Referencial no trem TB.

Após esta discussão, a introdução do conceito de referencial na TRR como um conjunto de relógios e réguas, e suas relações com observadores inteligentes que usam diferentes referenciais, o conceito de evento na TRR e a discussão teórica de duas das conseqüências (medidas de comprimento e de tempo) do segundo postulodo seguiram o seguinte texto, que foi elaborado com esta finalidade:

4.2.4.2. Texto sobre a noção de referencial e a construção das noções de contração do comprimento e de dilatação temporal

Na referência Sherr, Shaffer & Vokos (2001) os autores afirmam que o desenvolvimento da noção de sistema de referência é fundamental nos cursos de relatividade especial. Eles definem, um “... *sistema de referência como um sistema de observadores (ou dispositivos), através do qual, as posições e tempos são determinados*”. Para eles, o conceito de *sistema de referência* ou, simplesmente, *referencial*, constitui o instrumento básico para procedimentos de medição. Em (Halliday, Resnick & Walker, p.145, 2007), os autores descrevem um sistema de referência como sendo constituído por uma rede tridimensional de relógios e de réguas. Em nosso trabalho, definimos um sistema de referência ou referencial, como sendo constituído por um conjunto infinito de observadores, cada qual munido de um cronômetro, de uma régua e de outros dispositivos (sensores, detectores, etc.), através dos quais, posições e tempos são determinados. Em qualquer sistema de referência, tais observadores podem ser ditos “observadores inteligentes”, pois podem fazer a correção dos tempos decorridos entre eventos através de cálculos envolvendo posições e velocidades.

Na TRR, definimos um “evento” como algo que ocorre em um ponto do espaço e em um instante de tempo, estando relacionado à emissão e à recepção de sinais luminosos. Portanto, ao falarmos em medição de tempo e de distância entre eventos em relação a diferentes referenciais, precisamos estar atentos a dois fenômenos, o da contração dos comprimentos na direção do movimento e o da dilatação do tempo, que também são consequências dos postulados da TRR propostos por Einstein.

É importante apresentar aqui a explicação para a fórmula da contração do comprimento de objetos que se movem com velocidade comparáveis a da luz sob o ponto de vista histórico. Como vimos anteriormente, a fórmula para a contração do comprimento apresentada por Lorentz-Fitzgerald tem um significado diferente da apresentada por Einstein. Para Einstein, bem diferentemente, o significado da fórmula da contração do comprimento é que ela decorre da relatividade de nossas medições de distância e de tempo - decorrentes, por sua vez, do fato de a luz se propagar com mesma rapidez em relação a todos os observadores inerciais. É preciso que fique claro para os estudantes, que a chamada contração do comprimento não envolve qualquer alteração da estrutura da matéria ou deformação dos corpos (no caso de Michelson e Morley, os braços do interferômetro) em movimento relativístico. (RICCI T. F. & OSTERMANN, 2002).

A referência (Tipler, p. 146-147,1995) faz uso de uma maneira de compreender a dilatação temporal. Para isso, considera-se dois eventos que ocorrem em uma mesma posição

x_0' e nos instantes t_1' e t_2' , de acordo com um observador O' fixo em um referencial S' . Através das seguintes equações, podemos determinar os correspondentes instantes de ocorrência destes eventos para um observador O fixo no referencial S . Uma vez que

$$t = \gamma(t' + \frac{Vx'}{c^2}) \quad (6)$$

obtemos

$$t_1 = \gamma(t_1' + \frac{Vx_0'}{c^2}) \quad (7)$$

e

$$t_2 = \gamma(t_2' + \frac{Vx_0'}{c^2})$$

de modo que

$$t_2 - t_1 = \gamma(t_2' - t_1').$$

O intervalo de tempo $\Delta t' = (t_2' - t_1')$ medido pelo observador O' é o *tempo próprio* e o intervalo de tempo medido em qualquer outro referencial é sempre *maior* do que o correspondente tempo próprio. Esse fenômeno é denominado *dilatação temporal*. Ou seja,

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t' \quad (8)$$

Relacionada à dilatação temporal está a contração do comprimento. Levando em consideração a invariância da velocidade da luz, é condição que estes dois fenômenos sejam complementares para observadores em movimento relativo junto com seus respectivos referenciais inerciais. Chamamos de *comprimento próprio*, L_p , o comprimento de um objeto medido com relação a um referencial em que o objeto está em repouso. Contudo, em outro referencial, em relação ao qual o objeto esteja em movimento paralelo ao comprimento do objeto, esta medida, denotada por L , é menor do que o comprimento próprio, $L < L_p$. A isso se denomina *contração do comprimento*.

Para obter a fórmula da contração do comprimento. Consideremos que os observadores O e O' estejam fixos, respectivamente, nos referenciais S e S' , como na demonstração anterior. Portanto, eles podem medir os comprimentos em relação aos dois referenciais. Se o comprimento de uma barra for medido em relação ao referencial S , ela estará em movimento para direita com velocidade V , ou seja, com a mesma velocidade do referencial S' em relação a S . Da mesma forma, trocando de referencial, S se move para esquerda com velocidade $-V$. Na equação 2, constatamos que $L_p = x_2' - x_1'$ (medido no referencial S') é maior do que $L = x_2 - x_1$ (medido no referencial S), onde x_2 é a posição de uma extremidade do objeto no instante t_2 , e

x_1 , a posição da outra extremidade no mesmo instante, e $t_1 = t_2$. Não é conveniente relacionar as equações x , x' e t' , uma vez que devemos considerar $t_2 = t_1$, e não $t_1' = t_2'$. (TIPLER, 1995)

Assim

$$\begin{aligned}
 x'_1 &= \gamma(x_1 + Vt_1) \\
 x'_2 &= \gamma(x_2 + Vt_2) \\
 t_1 &= t_2 \\
 x'_2 - x'_1 &= \gamma(x_2 - x_1) \\
 L_p &= \gamma L \\
 \text{ou} \\
 x_2 - x_1 &= \frac{(x'_2 - x'_1)}{\gamma}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Portanto,

$$L = \frac{1}{\gamma} L_p \tag{10}$$

Pode-se também obter as fórmulas da dilatação temporal e da contração do comprimento a partir dos *postulados de Einstein* por meio de experimentos mentais, tais como o do exercício do relógio de luz, ilustrado através das animações 3.1. e 3.2.

4.2.4.3. Apresentação do exemplo “trem relativístico e relógio de luz” com uso de animações

A apresentação e discussão do exemplo desse experimento de pensamento utilizado por Einstein, que denominamos informalmente de “trem relativístico e relógio de luz”, foram feitas através das animações 3.1 e 3.2 e de demonstração das equações relacionadas à contração dos comprimentos e à dilatação do tempo.

Análise das medidas feitas por um observador fixo em um trem em movimento relativístico

Na **animação 3.1** (Contração do comprimento) - experimento do relógio de luz em relação ao referencial do trem com velocidade $c/2$ - um observador A' está solidário ao referencial S', em relação ao qual o trem relativístico encontra-se em repouso. Ele mede o intervalo de tempo entre dois eventos que estão relacionados à altura D do trem. Para fazer esta medição, ele conta com um equipamento denominado relógio de luz. Um clique deste relógio consiste no tempo entre a emissão de um pulso de luz, do piso do trem, sua chegada a

um espelho localizado no teto e o retorno do pulso refletido. Ao intervalo de tempo decorrido entre a emissão, reflexão e detecção do pulso, que percorre uma distância total $2D$, chamamos de tempo próprio $\Delta t'$, e usamos esta terminologia porque este evento ocorre no mesmo ponto do espaço. No entanto, se quisermos medir o comprimento de L de uma régua fixa na plataforma, devemos considerar que esta se move para a esquerda com velocidade $-c/2$. Detectores colocados lado a lado na plataforma devem marcar a distância percorrida pela régua (Figura 15) entre a ida e volta do pulso, ou seja, $2D = L = c\Delta t'$.

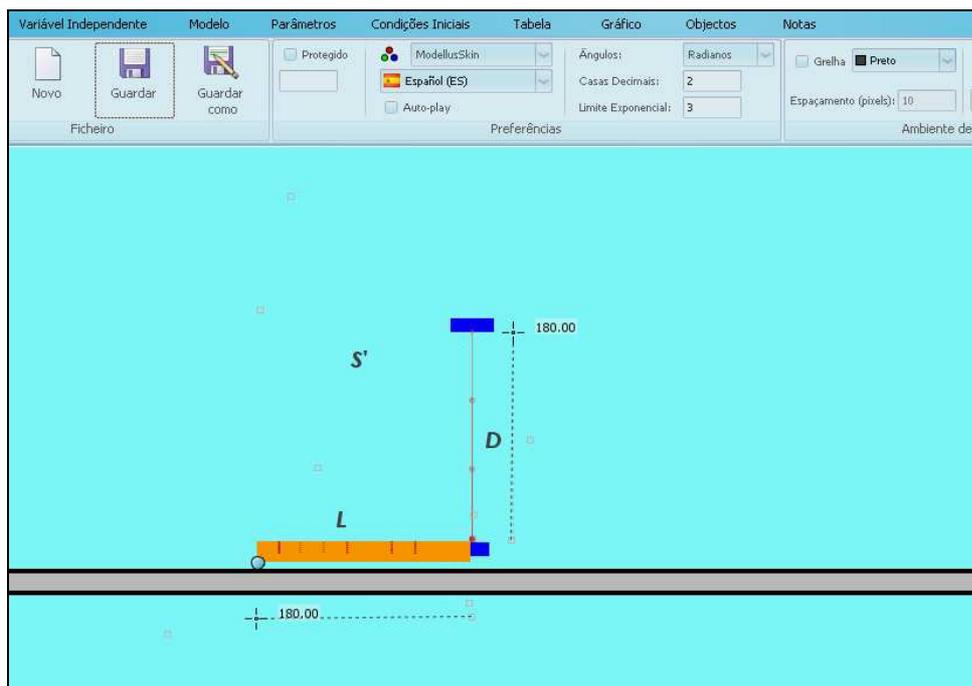


Figura 15 –Animação 3.1- Referencial S' (contração comprimento).

Análise das medidas feitas por observadores solidários a uma plataforma

Na **animação 3.2** (dilatação do tempo) - experimento do relógio de luz em relação ao referencial da plataforma – o observador A está em repouso com relação ao referencial S , no qual a plataforma está em repouso. Para eles, o trem se move com velocidade $c/2$ para a direita. Eles desejam medir o intervalo de tempo entre os mesmos eventos da situação anterior, ou seja, o intervalo entre a emissão e o retorno do pulso no relógio de luz, dentro do trem. Nesta situação, os eventos ocorrem em dois pontos do espaço e, por isso, precisa-se dispor de detectores colocados ao longo de uma régua fixa na plataforma (Figura 16). Esse intervalo de tempo será denotado como Δt .

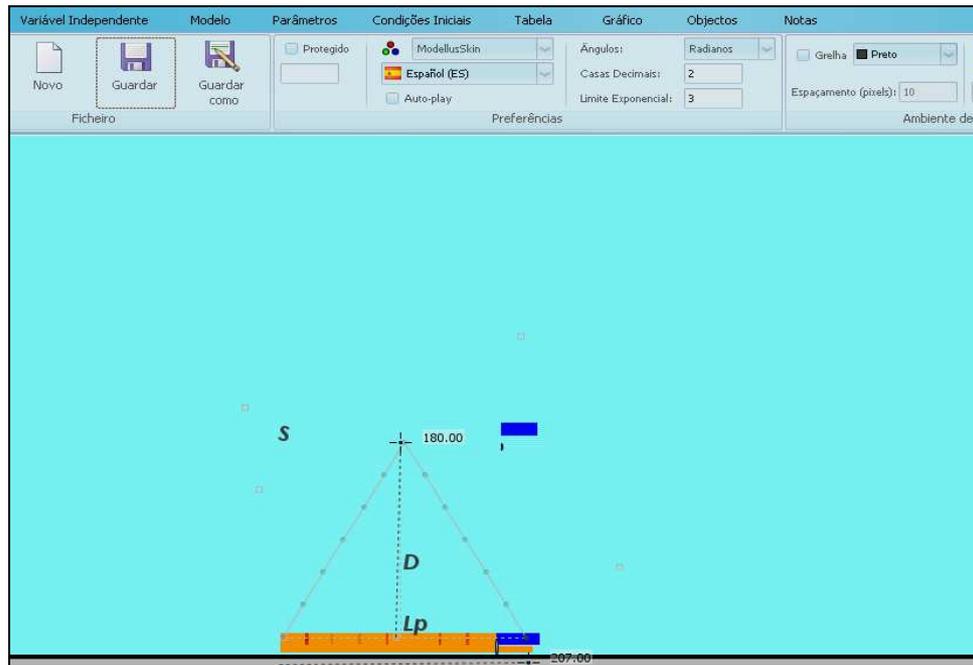


Figura 16 – Animação 3.2 - Referencial S (dilatação do tempo).

A figura 17, triângulo retângulo, representa a metade da distância percorrida pelo pulso, $\frac{c\Delta t}{2}$, do piso até o teto, juntamente com a metade distância percorrida pelo trem, $\frac{V\Delta t}{2}$. Ou seja:

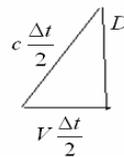


Figura 17 - Dilatação temporal.

Desta forma, demonstramos matematicamente, com o simples uso do teorema de Pitágoras, que este intervalo de tempo está dilatado pelo fator gama de Lorentz (dilatação temporal). A medida correspondente do comprimento da régua na plataforma chamamos de comprimento próprio, denotado como L_p . Assim:

$$\begin{aligned} \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 &= D^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2 \\ \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 &= \left(\frac{c\Delta t'}{2}\right)^2 + \left(\frac{V\Delta t}{2}\right)^2 \\ c^2\Delta t^2 &= c^2\Delta t'^2 + V^2\Delta t^2 \\ \Delta t^2\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) &= \Delta t'^2 \\ \Delta t &= \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} = \gamma\Delta t' \end{aligned}$$

ou seja,

$$\Delta t > \Delta t'$$

Sabendo que, em relação ao referencial S da plataforma, a régua mede $L_p = V\Delta t$, e que $\Delta t = \gamma \Delta t'$, podemos concluir:

$$V\Delta t = \gamma V\Delta t'$$

$$L_p = \gamma L$$

ou

$$L = \frac{1}{\gamma} L_p$$

ou seja,

$$L < L_p$$

4.2.5. Atividade 5- A relatividade da sincronização de relógios

Nesta atividade, foram apresentados os efeitos para a relatividade da sincronização de relógios. Através desta, foi complementada a discussão da atividade anterior, sobre o conceito de referencial, e este foi descrito como sendo constituído de infinitos observadores munidos de relógios e réguas. Deixamos claro que, em nosso trabalho, representamos este referencial por quantidades finitas de sensores, no máximo, nove relógios, somente a título de ilustração.

A seqüência do texto elaborado serviu de apoio à introdução da parte conceitual sobre sincronização de relógios.

4.2.5.1. Texto sobre a relatividade da sincronização de relógios

Nessa seção abordaremos uma consequência muito importante dos postulados de Einstein (especialmente do segundo postulado): a falta de sincronização dos relógios usados por distintos observadores inerciais. Embora altamente contra-intuitiva, tal conclusão pode ser obtida facilmente e de forma qualitativa, a partir do segundo postulado, mediante um experimento de pensamento, proposto neste trabalho. O experimento mental deve ilustrar o conceito de sistema de referência a que nos referimos anteriormente. Este conceito, aliado ao de *evento*, na TRR, nos dará suporte para entendermos a relatividade da sincronização. Portanto, a dedução da relatividade dos intervalos de tempo entre eventos, quando observados em relação a diferentes referenciais inerciais será uma consequência imediata. O aluno, progressivamente, deve tomar consciência dos efeitos relativísticos (dilatação temporal e contração dos comprimentos) no que se refere aos intervalos de tempo medidos, o que, por sua

vez, levará o estudante à conclusão de que os comprimentos medidos de objetos em movimento relativístico também são relativos.

Para tal, deverá ser discutido em detalhes o método de sincronização de relógios por meio de pulsos de luz, levando em consideração que dois relógios que estiverem sincronizados quando em repouso em um dado referencial inercial não estarão sincronizados com relação a um relógio em repouso em outro referencial e que está em movimento com relação ao primeiro.

Inicialmente, como ilustração, usaremos um exemplo retirado de livro de Física Tipler (1995). Este exemplo ilustra o conceito de observadores inteligentes. Concluímos que, através de seus cálculos, estes observadores concordam com a sincronização dos relógios. A luz leva um intervalo de tempo L/c , tempo que separa dois observadores.

Suponhamos que temos dois relógios em repouso, nos pontos A e B, a uma distância L , no referencial S. Como seria possível sincronizar estes relógios? Se um observador em A olha para o relógio em B e acerta o seu relógio para ler o mesmo instante, os relógios não estarão sincronizados em virtude do tempo L/c necessário para a luz percorrer a distância entre os dois relógios. A fim de sincronizar os relógios, o observador em A deve adiantar de L/c o seu próprio relógio. Então, perceberá que o relógio B marca um tempo que está L/c atrasado em relação ao seu próprio relógio, mas verificará que os relógios estão sincronizados quando levar em conta o tempo L/c que a luz leva para sair de B e chegar em A. Quaisquer outros observadores, exceto os que estiverem equidistantes dos relógios, verão que os relógios marcam tempos diferentes, mas também calcularão o tempo necessário para a luz atingi-los e verificarão que os relógios estão sincronizados. Um outro procedimento equivalente para a sincronização dos relógios seria um observador C a meio caminho de A e B enviar sinais luminosos para que estes observadores acertassem os respectivos relógios numa hora predeterminada, ao receberem o sinal enviado por C. (TIPLER, 1995, p.150)

O referencial utilizado no exemplo acima é aquele em que os observadores estão em repouso em relação à este, porém nosso trabalho vai um pouco além. A rede de relógios e réguas, nosso referencial, é representada aqui, em duas dimensões. Nesse exemplo consideramos uma rede de nove relógios (Figura 18), com um observador solidário ao relógio central, coincidindo com a origem de um pulso luminoso quando seu relógio indica $t = 0$. Ele contará com a ajuda de oito auxiliares, cada um solidário também a um relógio. De posse da medida L (comprimento próprio) entre os relógios e sabendo que a luz leva um tempo L/c para chegar em cada relógio, estes auxiliares adiantam seus relógios. O observador começa a contar o tempo a partir da recepção do pulso e assim se efetiva a sincronização destes relógios.

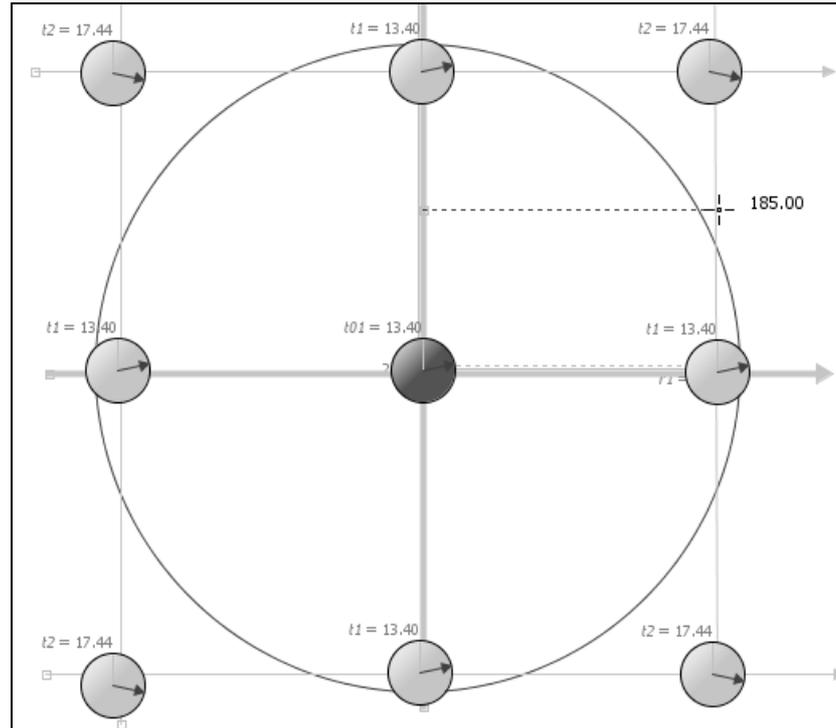


Figura 18– Representação de sistema de referência na TRR.

O passo seguinte é considerar outro referencial, no mesmo modelo do primeiro, em movimento relativo ($V = 0,5c$). Agora os dois conjuntos de relógios devem ter seus tempos adiantados por L/c em seus respectivos referenciais de repouso, conforme anteriormente mencionamos. No momento em que os relógios centrais se cruzam, em $t = 0$, um pulso é emitido. Todos os relógios começam a marcar o tempo quando são atingidos por este pulso. A ilustração do resultado, através de animações, faz parte deste trabalho e veremos que mais uma vez, nos deparamos com o espaço e tempo interligados, demonstrados por Einstein.

A aplicação deste conhecimento torna-se familiar na atualidade e, como exemplo, temos o sistema de Posicionamento Global dos Satélites (GPS), que se baseia na triangulação de satélites (três ou quatro satélites). A teoria da relatividade é utilizada por engenheiros de forma rotineira para determinar a passagem do tempo nos satélites. O tempo passa mais devagar nos satélites do que na superfície terrestre e apesar da utilização de relógios atômicos precisos, faz-se necessário um ajuste no tempo. O cálculo da distância com base na velocidade e no tempo é simples. É possível calcular a distância entre o satélite e o receptor na Terra, multiplicando-se a velocidade da luz pela diferença entre o tempo da chegada do sinal no receptor e o tempo da saída do satélite. Já o tempo é um parâmetro difícil, por isso o uso de relógios precisos como os atômicos. Destacamos que fontes de erros de localização podem existir devido aos efeitos relativísticos explicados pela TRR e também pela Relatividade Geral. Para saber quando o

sinal foi transmitido, a precisão dos relógios tem que ser perfeita. A TRR diz que os relógios destes dois referenciais precisam ser sincronizados, porque se as correções não fossem feitas, o erro na localização poderia chegar até 11 km/dia. Se existir um erro de um milésimo de segundo, à velocidade da luz implica um erro de 300 km. O GPS tem dupla utilidade, ou seja, na indústria militar e na civil. Entre as aplicações, podemos citar a navegação e o mapeamento, sendo que a funcionalidade GPS já começou a ser utilizada em telefones móveis. (SANTOS, 2008)

Consideramos que, chamar a atenção para esta aplicabilidade, reforça o interesse dos alunos pelo aprendizado. Sugerimos que os alunos envolvidos neste curso fizessem leituras extras sobre o GPS a título de ampliação do conhecimento científico.

4.2.5.2. Discussão da Relatividade da sincronização com uso de animações

Para explicar e ilustrar o atraso na percepção de um evento, devido ao tempo que a luz leva para percorrer a distância entre a posição onde ocorre o evento e a posição onde ele é detectado, começamos a apresentação de uma seqüência de animações partindo da sincronização de dois relógios. Como contra-exemplo, consideramos dois observadores, 1 e 2, separados por uma distância L , e que pretendem sincronizar vários de seus relógios-próprios; porém se o observador 2 ativar o seu relógio quando enxerga o observador 1 ativando o seu, aquele registrará que os relógios estão sincronizados, mas o observador 1 registrará o relógio 2 como atrasado em um intervalo temporal igual a $2L/c$. A proposta do método de sincronização foi apresentada e discutida inicialmente pelas animações 4.1, 4.2 e 4.3.

Na **animação 4.1** (Sincronização de dois relógios fixos em um mesmo referencial), dois observadores estão solidários ao referencial onde uma fonte de luz está fixa, estando aqueles equidistantes da fonte (Figura 19). Cada observador dispõe de um detector e de um relógio (relógio verde). Estes relógios marcam $t = 0$ e são acionados quando os detectores são atingidos pelo pulso oriundo da fonte. O intervalo de tempo gasto pelo pulso para atingir o detector é $t = L/c$, sendo L o comprimento próprio medido por estes observadores. Neste caso, o pulso é detectado ao mesmo tempo por eles e, desta forma, seus relógios estarão sincronizados.

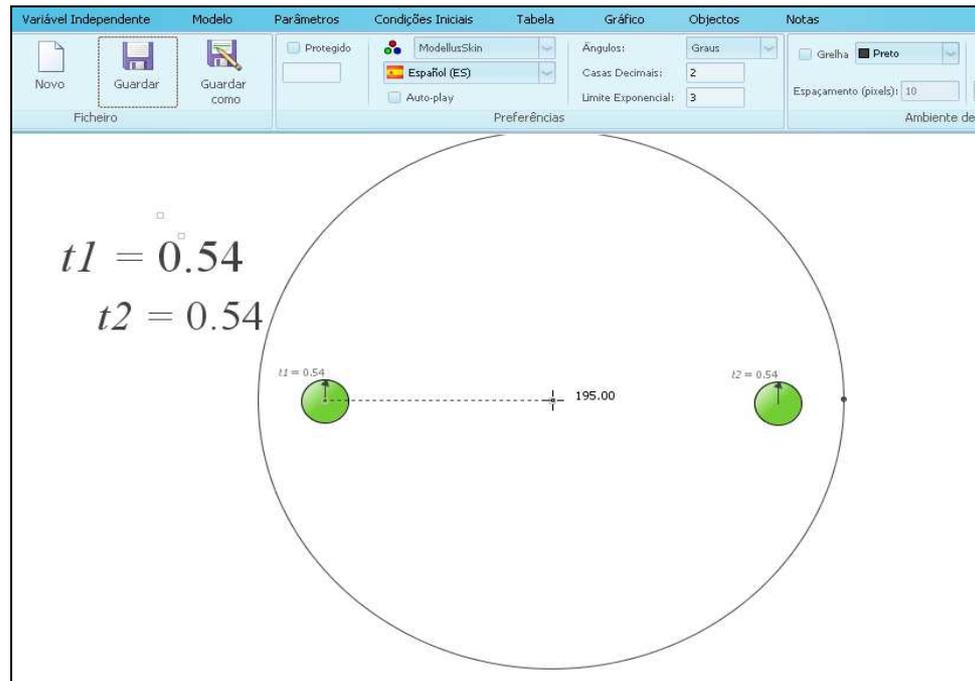


Figura 19 – Animação 4.1- Sincronização de dois relógios no mesmo referencial.

A **animação 4.2** (Sincronização de dois relógios - referencial em movimento) descreve uma situação em que o observador está solidário ao referencial em relação ao qual uma fonte de luz está em repouso, porém existe outro referencial em relação ao qual estão fixos dois outros observadores, cada qual com um relógio (laranja), e que se move para a direita com velocidade $V = c/2$ em relação ao primeiro. Relativamente ao primeiro, a distância entre os relógios de cor laranja é medida contraída pelo fator gama de Lorentz. No instante $t = 0$ de emissão do pulso, *o ponto médio entre os relógios coincide com a origem do pulso* e o tempo começa a ser contado no momento em que os relógios são atingidos pelo pulso. A propagação do pulso se dá de forma esfericamente simétrica e independe de qualquer movimento da fonte. Para o observador em questão, o observador da esquerda (laranja) se aproxima da frente de onda (luz), enquanto o da direita se afasta dela (Figura 20). Desta forma, ele calcula que o da esquerda é alcançado antes pelo pulso, começando a marcar o tempo a partir de $t = L/(c+v)$, e o da direita é alcançado depois, começando a marcar a partir de $t = L/(c-v)$. Ele conclui que os relógios não ficam sincronizados.

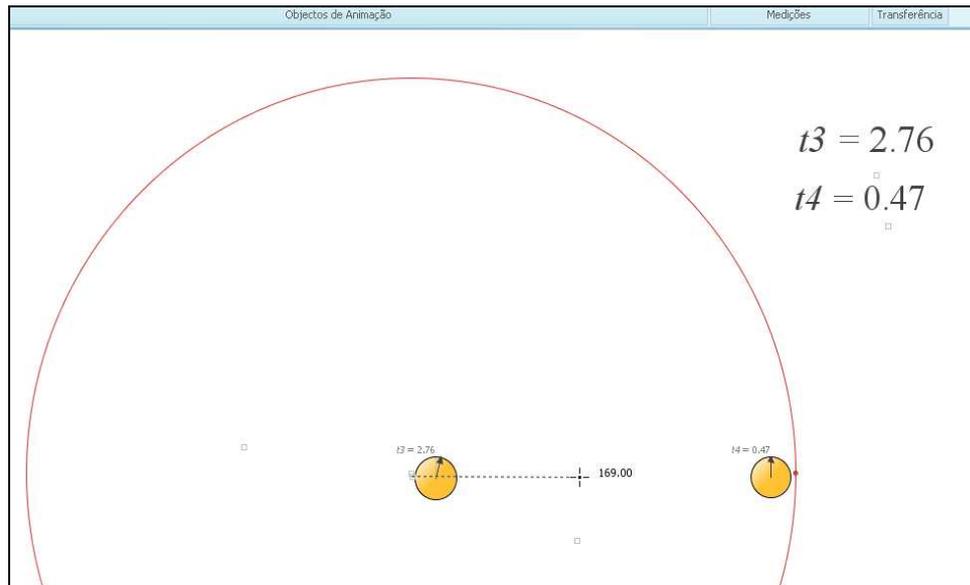


Figura 20 – Animação 4.2 - Sincronização de dois relógios no referencial considerado em movimento.

A **animação 4.3** (Sincronização de dois relógios em dois sistemas de referência) apresenta os dois referenciais, anteriores, em movimento relativo. A observação é feita em relação aos observadores solidários ao referencial em relação ao qual os relógios de cor laranja, o detector e a fonte estão em repouso. Para eles, o referencial próprio dos relógios de cor verde se move com velocidade $V = -c/2$. No momento em que o ponto médio dos relógios verdes coincide com o ponto médio dos relógios laranja, um pulso de luz é emitido pela fonte que está localizada neste ponto (Figura 21). Pelos motivos discutidos na animação 4.1 e 4.2, a sincronização dos relógios só acontece para o conjunto de relógios laranja.

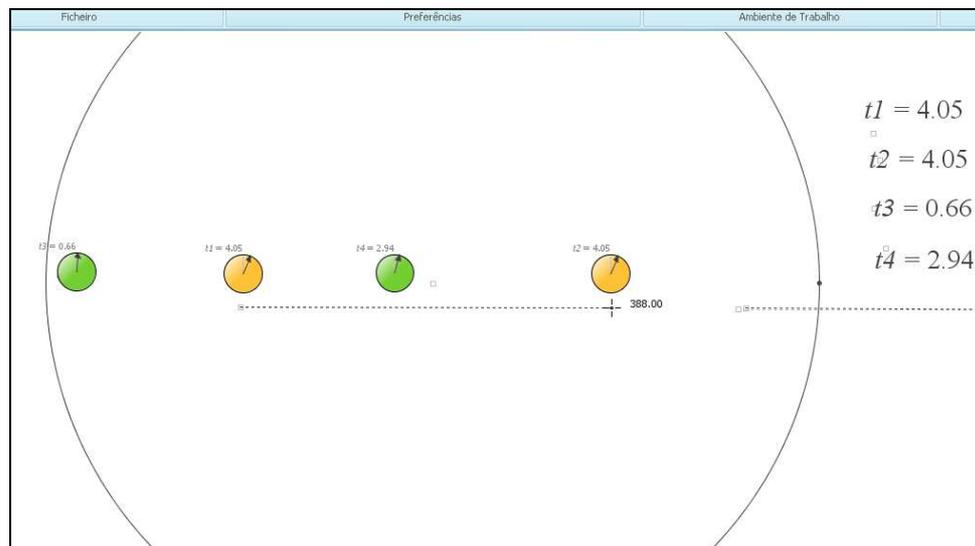


Figura 21 – Animação 4.3 - Relógios em dois sistemas de referência.

A seguir, são apresentados os correspondentes efeitos para um conjunto de nove relógios que se movem com velocidade relativística. Esta deverá ser nossa representação de um sistema de referência na TRR, porém, na realidade, este sistema é tridimensional e dotado de um número infinito de observadores, cada qual munido de um relógio e de um detector. Um pulso de luz (esférico) emitido por uma fonte, localizada no ponto médio entre os relógios - nosso evento - serve como mecanismo de sincronização destes. Um relógio central, o qual será denominado relógio-chefe, começa a contar o tempo a partir da emissão do pulso ($t = 0$). Cada um dos demais relógios é adiantado por um tempo $\Delta t = L/c$ e começa a funcionar à medida que um detector, junto a ele, é atingido pelo pulso.

Esses efeitos e a discussão da situação em que dois observadores não são equidistantes da fonte luminosa, mas conhecem a sua distância até ela, podem ser compreendidos com a seqüência de animações 4.4, 4.5 e 4.6. Podemos com elas ilustrar claramente como estes observadores podem ajustar seus respectivos relógios-próprios. A discussão do processo de sincronização para relógios dispostos regularmente no plano (x, y) mostra que cada relógio corresponde a um observador que conhece sua distância até a origem e que adianta seu relógio de um tempo igual àquele necessário para a luz ir da origem até o relógio. Foi possível ilustrar aos alunos, através do modelo matemático do *software Modellus*, o método utilizado para sincronizar tais relógios. Essa é, portanto, uma das características de grande importância deste *software*, ou seja, todos os movimentos apresentados são animados de acordo com as leis da Física que o aluno já conhece.

Esta situação é ilustrada inicialmente na animação 4.4.

A **animação 4.4** (Sincronização de nove relógios - um só referencial) representa um referencial composto por dois eixos cartesianos ortogonais e por um conjunto de observadores, cada qual com seu relógio (Figura 22). São representados apenas nove destes observadores na figura. A fim de sincronizar os relógios, os observadores escolhem o relógio do observador que está na origem como o relógio-chefe e cada qual adianta o seu relógio no valor $t_i = L_i / c$, onde L_i é a distância linear entre o i -ésimo observador ($i = 1, 2, \dots, 8$) e a origem. Note que relógios equidistantes do relógio-central estão adiantados no mesmo valor t_i . Os relógios dispostos diagonalmente apresentam um adiantamento maior que os relógios posicionados sobre os eixos. A sincronização é feita a partir da emissão de um pulso de luz no centro geométrico do conjunto, que coincide com a posição do relógio-chefe. Cada relógio começa a contar o tempo quando o pulso o atinge. Após a passagem do pulso pelos relógios mais distantes, todos os relógios estarão sincronizados.

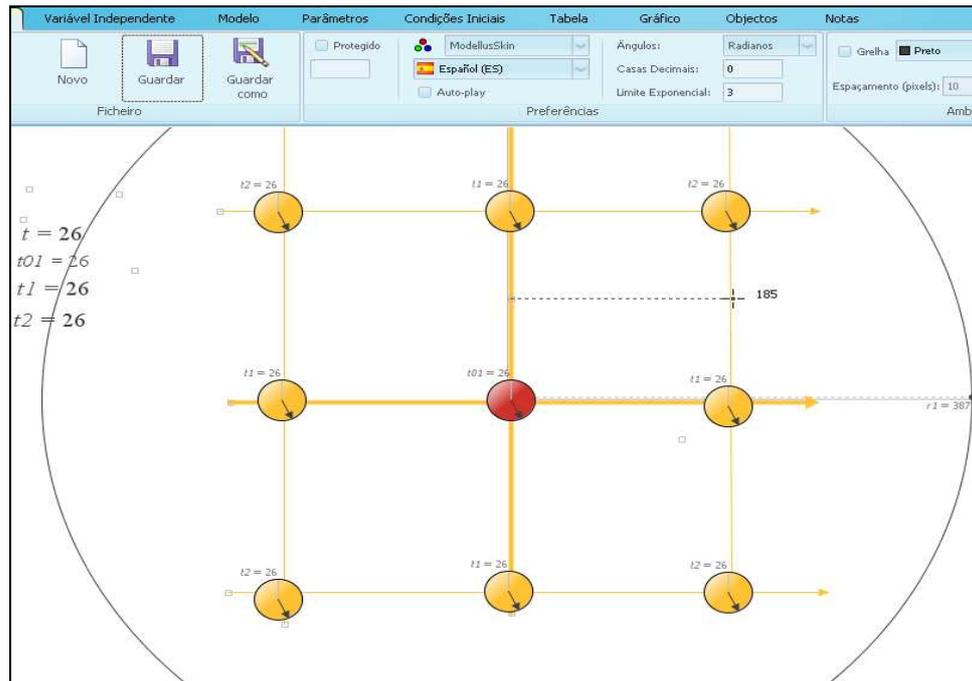


Figura 22-Animação 4.4 - Sincronização de nove relógios (um referencial)

Nas animações 4.5 e 4.6, são representados dois referenciais em movimento relativo. Nestas, é possível verificar que, nos dois referenciais em movimento, há uma discordância quanto à sincronização destes relógios. Através das equações da TRR, utilizadas no modelo matemático do *software*, este fenômeno é facilmente identificado. Também representamos a contração da distância entre os relógios que se movem no mesmo sentido do movimento deste referencial.

Na **animação 4.5** (sincronização de nove relógios - dois sistemas de referência), ao conjunto de relógios descrito na animação 4.4 (relógios de cor laranja) é adicionado outro conjunto de observadores e relógios (de cor azul), solidários a um segundo referencial que se move com velocidade constante $c/2$ em relação ao primeiro. Este novo conjunto também possui um relógio-chefe e todos os relógios estão adiantados de acordo com a relação $t_i = L_i/c$, conforme a Figura 23. As distâncias na direção do movimento estarão contraídas pelo fator $(1/\gamma)$. Quando os centros geométricos (origens) dos dois conjuntos coincidem, um pulso de luz é emitido pela fonte e os dois relógios-chefes começam a marcar o tempo iniciando em $t=0$. Os outros relógios iniciam a marcação do tempo à medida que o pulso de luz os atinge. Para os observadores fixos no referencial laranja, os relógios do referencial azul que estão à esquerda da origem serão atingidos pelo pulso de luz antes dos relógios dispostos à direita da origem. Após a passagem do pulso pelos relógios mais distantes, todos os nove relógios laranja estarão sincronizados. No entanto, em relação ao referencial laranja, os relógios dos observadores do

referencial azul não estarão sincronizados. Em relação a tal referencial, os relógios, dispostos à esquerda do relógio-chefe laranja estarão adiantados, e os relógios à direita, atrasados. O andamento dos relógios azuis é mais lento do que o andamento dos relógios laranja por um fator $(1/\gamma)$.

Será importante notar que, devido ao segundo postulado, este efeito não depende da velocidade da fonte em relação a qualquer dos dois referenciais. Ela pode estar fixa tanto em relação ao referencial laranja quanto ao azul que o efeito será o mesmo. Na animação é fácil verificar que os relógios fixos no sistema considerado em repouso estão sincronizados. Os relógios em movimento estão sincronizados ao longo da direção y , mas não na direção x .

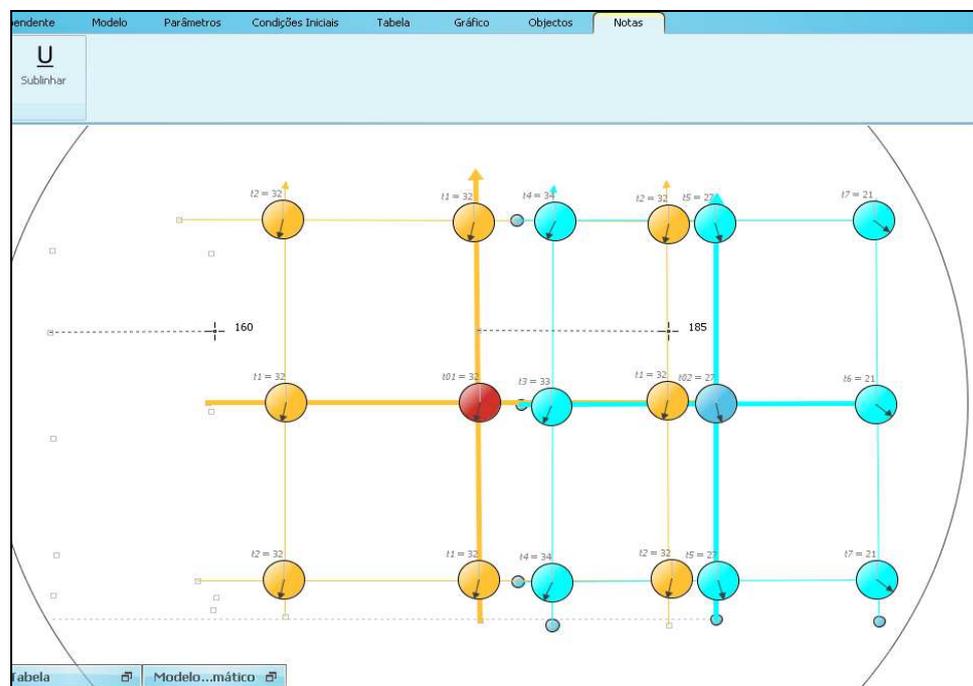


Figura 23 – Animação 4.5 - Dois sistemas de referência na TRR.

A **animação 4.6** (sincronização de nove relógios - dois sistemas de referência e mudança de referencial) apresenta o mesmo processo de sincronização sob a perspectiva de observadores fixos no referencial azul. Como o pulso de luz parte da origem e, sua propagação independe do movimento da fonte, os relógios azuis estarão todos sincronizados quando o pulso tiver passado pelos relógios mais distantes. No entanto, para estes observadores, os relógios laranja à direita do relógio-chefe são atingidos pelo pulso antes dos relógios que estão à esquerda (Figura 24). Logo, ao final do processo, os relógios do referencial laranja não parecerão sincronizados para tais observadores. Os relógios mais à direita parecerão mais adiantados. Da mesma forma que o procedimento da animação 4.5, os relógios fixos no sistema

considerado em repouso estão sincronizados. Os relógios em movimento estão sincronizados ao longo da direção y , e o comportamento do pulso de luz será o mesmo se a fonte estiver fixa no sistema considerado em movimento.

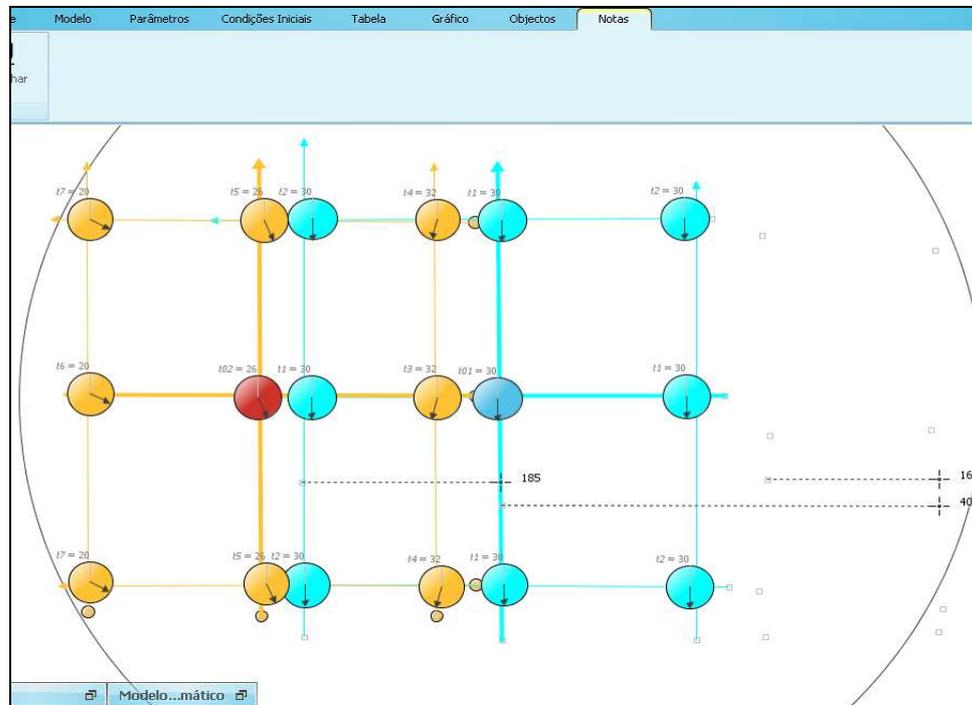


Figura 24- Animação 4.6 -Troca de referencial

Devemos salientar que não existe acordo entre os sistemas de relógios previamente sincronizados usados por dois observadores-inteligentes fixos nos referenciais laranja e azul, e que não existe uma escala única de tempo para os dois referenciais.

Após ser apresentada essa seqüência de animações sobre a sincronização de relógios, salientamos, novamente, que a origem destes efeitos está na diferença entre um “pulso clássico” e um “pulso relativístico”, que foram ilustrados através das animações 1.9, 1.8, 2.1 e 2.2, respectivamente.

4.2.5.3. Aplicação de pré-testes 5.1 e 5.2

No final desta atividade, foram aplicados os pré- testes 5.1 e 5.2 relacionados a relatividade da simultaneidade, todos baseados na referência (Scherr, Shaffer e Vokos,2001). Apresentamos aqui, as respostas cientificamente aceitas.

Teste 5.1 - Dois vulcões, Monte Albano e Monte Belano, estão separados por uma distância L . Os dois vulcões entram em erupção e um sismologista, que se encontra em um

laboratório fixo no solo e equidistante dos dois montes, determina que, as erupções são simultâneas. Um assistente do sismologista se encontra em outro laboratório fixo localizado na base do monte Albano. Um jato se desloca, com velocidade $c/2$, do monte Belano para o monte Albano. Em relação ao referencial solidário ao jato, a erupção do Monte Belano ocorre antes, durante ou mesmo tempo que a erupção do monte Albano? Justifique sua resposta.

Resposta:

O observador está fixo no referencial em relação ao qual o jato está em repouso. Para ele, os vulcões e a antenna é que se movem com velocidade relativa ($-c/2$). O jato se desloca do Monte Belano para o Monte Albano quando estes emitem os flashes. O jato possui um receptor e registra antes o *flash* proveniente do Monte Albano, pois se aproxima deste, enquanto o *flash* proveniente do Monte Belano, que se afasta dele, ocorre depois. Para este observador, as recepções dos *flashes* não ocorreram simultaneamente.

Teste 5.2 - Dois vulcões, Monte Albano e Monte Belano, estão separados por uma distância L (figura 25). Os dois vulcões entram em erupção e um sismologista, que se encontra em um laboratório fixo no solo e equidistante aos dois montes, determina que, as erupções são simultâneas. Um assistente do sismologista se encontra em outro laboratório fixo localizado na base do monte Albano. Para o assistente, o Monte Belano entrou em erupção antes, depois ou, ao mesmo tempo em que o Monte Albano? Justifique sua resposta.



Figura 25 - O referencial dos vulcões - a antenna está no ponto médio entre eles

Resposta:

O assistente é observador que está fixo no referencial onde os vulcões estão em repouso, estando no pé do Monte Albano. Assistente e sismologista estão em um mesmo referencial. Apesar de não estar no ponto médio entre eles, o assistente, por ser considerado inteligente,

poderá com auxílio de cálculos que relacionam o tempo, a distância e a velocidade da luz (L/c), responder que as erupções dos dois montes foram simultâneas, embora a detecção não seja. Por estarem no mesmo referencial, devem concordar na ordem de ocorrência do evento da emissão e detecção.

4.2.5.4. Análise e discussão dos resultados dos pré- testes 5.1 e 5.2

Estes testes tiveram a finalidade de verificar as concepções prévias dos alunos quanto ao fenômeno da relatividade da simultaneidade. Em ambas as questões, o aluno deveria considerar como fundamentais na compreensão os termos “entrar em erupção” e “registrar o sinal desta erupção”, ou seja, deveria perceber que são eventos distintos e que devem ser interpretados separadamente em relação a cada referencial.

Na análise dos pré-testes, com relação ao teste 5.1, e considerando a Figura 24 que representa as posições dos vulcões e da antena, os alunos A_1 , A_2 e A_4 apresentaram dificuldades. As concepções apresentadas por eles foram, decisivamente, de senso comum, como, por exemplo, “[...] o observador solidário ao jato pode ser considerado como a fonte do pulso, logo detectará as erupções simultaneamente”. Já o aluno A_3 representa a percepção de que o observador, no jato com velocidade $c/2$ para a esquerda, registra primeiro a erupção do Monte A, explicando assim: “ A erupção vista primeiro... é a do Monte A e depois a do Monte B, pois ele está indo na direção do Monte A..” Prossegue : *vê o Monte B andando para trás e, vindo em sua direção, o Monte A...*”

Dos sete alunos participantes da turma B, tivemos três respostas (de B_4 , B_6 e B_9) em que o Monte Belano entra em erupção depois, como por exemplo: “[...] depois, visto que ele está se afastando do Monte Belano”. (B_6). Da mesma forma, outros alunos respondem:

[...] a erupção do Monte Albano ocorre antes que a erupção do Monte Belano, pois o jato está se aproximando do Monte Albano. (B_4).

[...] ocorre depois que o Monte Albano, pois ele está indo em sentido contrário ao do Monte Belano (B_9)

O aluno B_5 respondeu que a erupção do Monte Belano ocorre antes, sendo que sua resposta foi complementada com uma imagem do observador sobre o Monte Belano.

Os alunos B_3 e B_8 , responderam: “[...] o jato perceberá as duas erupções ao mesmo tempo, pois ele está se deslocando em relação a ambos os sinais”. (B_8), “[...] ocorreu ao mesmo tempo e deve-se ao segundo postulado (B_3);

O aluno B₂ representou a detecção das erupções como simultâneas, através de uma imagem, e complementou: “[...] *para alguém solidário ao referencial do jato, conforme figura [...], observa os dois vulcões entrarem em erupção ao mesmo tempo*”.

Concluimos, portanto, que as dificuldades em descrever eventos no referencial em movimento ainda permanecem.

Com relação ao teste 5.2, os alunos A₁, A₂ e A₄, comentaram apenas que o assistente registra antes a chegada do sinal ao Monte Albano. Da turma B, os alunos B₂, B₄, B₅ e B₈, também chegaram à mesma conclusão. Eles não fazem qualquer comentário sobre as erupções, o foco da questão.

O aluno A₄ apresentou a seguinte resposta: “[...] *percebe que os dois vulcões entram em erupção ao mesmo tempo, pois os dois tiveram erupções simultâneas e o assistente está fixo ao solo*”. A partir daí, podemos concluir que, apesar de ser uma resposta incompleta, o aluno A₄ utiliza o termo “*fixo ao solo*”, o que caracteriza que ele percebeu que se trata de um só referencial. Outro aluno, B₉, respondeu que “*as erupções ocorrem ao mesmo tempo, pois o assistente está fixo em relação aos montes*. No entanto, este aluno não explicou que ambos, assistente e sismólogo, por estarem fixos no mesmo referencial, devem concordar que as erupções foram simultâneas. O aluno B₆ disse que, para o assistente que está no pé do Monte Albano, este entrou em erupção depois, e utiliza da seguinte explicação para a erupção: “[...] *entrar em erupção antes é o que ele observa aparente*.” O termo aparente poderia ser substituído por “aparentemente”. A justificativa para esta resposta pode estar relacionada ao que já havíamos comentado anteriormente, ou seja, movimentos “reais” quando o observador está fixo no referencial da antena e “aparente”, quando tem que descrever outro referencial – neste caso, suposto por ele, o do pé do Monte Albano.

Concluimos, portanto, que outra dificuldade enfrentada pelos estudantes é a de descrever qualquer evento sob o ponto de vista de dois ou mais observadores em diferentes posições no mesmo referencial. Para responderem este teste, eles poderiam ter usado o conhecimento adquirido na atividade 5 - sincronização de relógios - na qual explicamos e enfatizamos como deve ser feito o cálculo relativístico do intervalo de tempo entre os dois eventos ocorridos no mesmo referencial, ou seja, entre a emissão e a recepção do pulso luminoso.

4.2.6. Atividade 6- A relatividade da simultaneidade

Como suporte ao conteúdo teórico, utilizamos o seguinte texto:

4.2.6.1. Texto sobre a relatividade da simultaneidade

A relatividade da simultaneidade de eventos é mais uma consequência do segundo postulado. Está relacionada a atividade anterior (sincronização), ou seja, o procedimento utilizado para sincronizar os relógios é a emissão e recepção de pulsos luminosos *simultâneos* por parte de um observador *solidário* a cada relógio. Todavia, para um segundo observador inercial qualquer, em movimento uniforme com respeito ao primeiro, esses eventos não serão simultâneos.

Seguimos com a continuação do exemplo retirado do livro de Física, Tipler (1995):

Suponhamos que observadores se coloquem nos pontos A e B e decidem emitir sinais luminosos no instante t_0 (depois de terem sincronizados seus respectivos relógios). O observador C, equidistante dos dois, observará a luz dos dois sinais no mesmo instante, e concluirá que os dois sinais foram emitidos simultaneamente. Outros observadores no referencial S verão a luz de A, ou a de B, em primeiro lugar, dependendo da respectiva localização, mas, depois de fazer a correção do tempo necessário para a luz atingi-los, também concluirão que os sinais foram emitidos simultaneamente. Podemos então definir simultaneamente da seguinte forma: em relação a um referencial, dois eventos são simultâneos se os sinais luminosos emitidos nos eventos atingem ao mesmo tempo um observador localizado a meio caminho dos locais dos dois eventos. (TIPLER, 1995, p.150)

Da mesma forma, como já nos referimos anteriormente, o conceito de observadores inteligentes também se aplica aqui, pois, independentemente de eles estarem a meio caminho dos locais de dois eventos, estes observadores deverão fazer a correção do tempo marcado em seus relógios e também concordar sobre a simultaneidade destes eventos, em relação a um mesmo referencial. A situação discutida neste exemplo refere-se aos eventos detectados por observadores solidários a um dado sistema de coordenadas, cada qual, com seu relógio, em repouso neste referencial.

Mais complexa será a discussão da simultaneidade de eventos quando detectados por dois observadores, cada qual solidário a um de dois referenciais, que estão em movimento um com relação ao outro. Neste trabalho, através das atividades propostas e do uso de ilustrações através das animações, teremos a oportunidade de discutir e entender a noção de relatividade da simultaneidade.

4.2.6.2. Discussão sobre os métodos para determinação da simultaneidade de eventos

Nesta atividade, iniciamos discutindo o problema em que o observador está na origem de um sistema de referência e percebe pulsos eletromagnéticos oriundos de três eventos: primeiro o pulso 1, depois o 2 e depois o 3. Perguntamos aos estudantes: qual é a ordem de ocorrência dos eventos?

Os alunos das duas turmas A e B responderam em primeiro lugar 1, depois 2 e depois 3, sem se darem conta também de que a ocorrência dos eventos poderia ser simultânea. Neste caso, a distância do observador até o ponto de origem de cada evento deverá ser menor para o evento 1, aumentando sucessivamente para os eventos 2 e 3. Seriam possíveis, portanto, duas alternativas. Este exercício teve a finalidade de diferenciação entre a ocorrência de um evento e de sua percepção. Trata-se de um exercício simples, mas que ilustra a necessidade de corrigir as distâncias para conclusões sobre a ordem de eventos como descritos em um dado referencial. Além disso, procuramos comparar o problema (recepção dos três pulsos) ao da sincronização de relógios, onde também foram feitos cálculos de correção relativísticos. Nesse aspecto, apresentamos o conceito de “*observador inteligente*” - aquele que corrige, através de cálculos entre distância e velocidade da luz, o intervalo de tempo entre dois eventos. Devemos estar atentos para as possibilidades de determinação de simultaneidade. O procedimento deve levar em consideração o observador equidistante a dois eventos ou aquele que, ao examinar a origem dos pulsos, determina que não se encontra equidistante destas.

4.2.6.3. Apresentação da relatividade da simultaneidade de eventos através de animações

Apresentamos, a seguir, as animações 5.1, 5.2, correspondentes ao fenômeno da simultaneidade. Estas ilustram a emissão de pulsos de luz por duas antenas e a detecção por um detector no ponto médio entre elas. Devemos salientar que o resultado depende do observador determinar quais são as distâncias entre ele e a origem dos pulsos.

O procedimento que observadores utilizam para determinar se eventos são simultâneos, ou não, pode ser discutido através da apresentação de uma seqüência de animações. Estas contêm diversas situações em que o evento é a emissão ou a recepção de um pulso luminoso. Devemos considerar sistemas de referência como os discutidos na seção anterior.

A **animação 5.1** ilustra a emissão de sinais por duas antenas, ao mesmo tempo, assim como a detecção por um detector D2, conforme ilustra a Figura 26. A animação representa um referencial, onde observadores, fixos em uma plataforma, possuem relógios sincronizados e detectores de sinais luminosos. Supõe-se que existem duas antenas, A e B, uma em cada extremidade da plataforma, e um detector D2 no centro da mesma. Em um dado instante de tempo, as antenas emitem pulsos luminosos e ambos são detectados, simultaneamente, por D2. O observador solidário a D2 concorda, portanto, que as emissões foram simultâneas. Os demais observadores, dispostos a diferentes distâncias dessas antenas, registram os pulsos não simultaneamente, mas, por serem considerados observadores inteligentes, devem fazer uma correção dos tempos entre a detecção de cada pulso a fim de concordar que as emissões, na realidade, foram simultâneas.

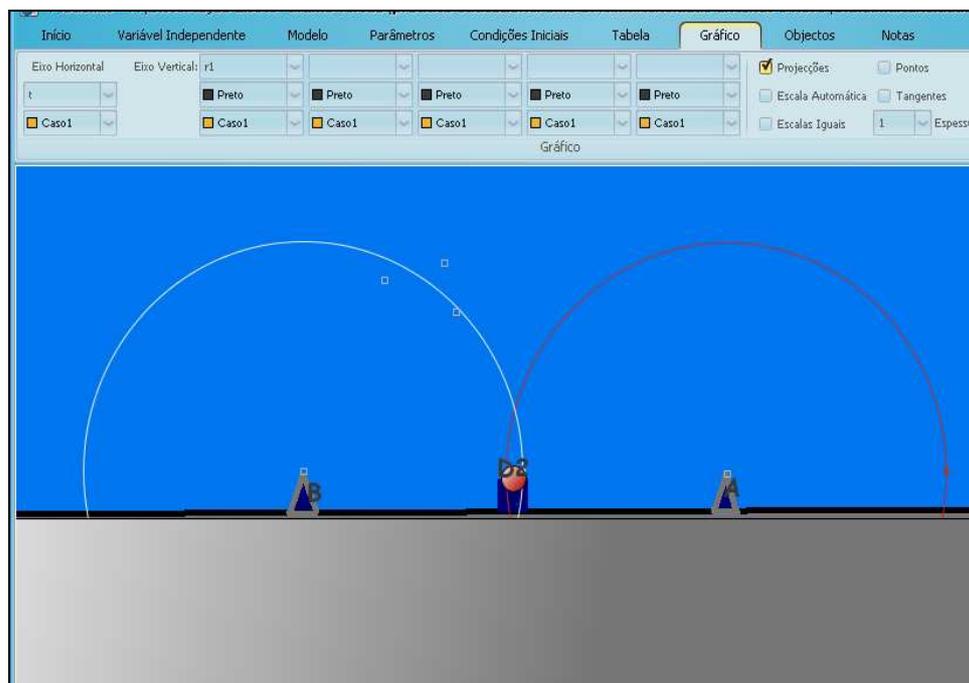


Figura 26 –Animação 5.1- Em relação ao referencial das antenas

A **animação 5.2** (emissão de sinais em tempos diferentes por duas antenas e detecção por um sensor posicionado no ponto médio entre elas) representa um referencial e observadores fixos em uma plataforma, que possuem relógios sincronizados e detectores de sinais luminosos. Da mesma forma que a animação anterior, existe duas antenas, A e B, uma em cada extremidade da plataforma, e um detector D2 no centro desta. Em determinados instantes, são emitidos pulsos luminosos pelas duas antenas, mas, agora, eles não são detectados simultaneamente por D2, de modo que o observador solidário a este detector registra antes o

pulso emitido pela antena A, e depois aquele emitido pela antena B. Por outro lado, um dos observadores, próximo a B, detecta-os simultaneamente, conforme ilustra a Figura 27. Ao apresentar esta simulação, devemos discutir o que ocorre quando um observador detecta pulsos ao mesmo tempo, mas posteriormente determina que sua posição não é equidistante das fontes. Neste caso, como se trata de um observador inteligente e por estar no mesmo referencial, ele faz a correção dos tempos e acaba concordando, como os demais, que as emissões não ocorreram simultaneamente.



Figura 27 – Animação 5.2. Emissões não simultâneas.

Na **animação 5.3**, a questão da simultaneidade de eventos pode ser expressa na forma que segue. Consideremos uma plataforma muito longa e uma nave que se desloca paralelamente à plataforma com velocidade V , conforme ilustra a Figura 28. Em relação ao referencial solidário à plataforma, existe um conjunto de observadores localizados ao longo da mesma que possuem relógios sincronizados, assim como detectores de sinais luminosos. O mesmo se dá com o referencial solidário à nave. Supomos que existam duas antenas, A e B, uma em cada extremidade da plataforma. Chamamos de D1 ao detector posicionado no centro da nave, e D2 ao detector no centro da plataforma. Quando os dois detectores se cruzam, as

antenas A e B emitem pulsos de luz. Tanto os observadores solidários à estação quanto aqueles solidários à nave concordam quanto à seguinte ordem dos acontecimentos:

1. O pulso oriundo do emissor A é detectado por D1;
2. Ambos os pulsos são detectados juntos por D2; e
3. O pulso oriundo do detector B é detectado por D1.

Os observadores, solidários à plataforma registram a passagem dos pulsos e determinam que, estes se propagam com frentes de onda esféricas centradas na posição das antenas, equidistantes de D2. Então, a partir do item 2, eles concluem que as emissões ocorreram simultaneamente.

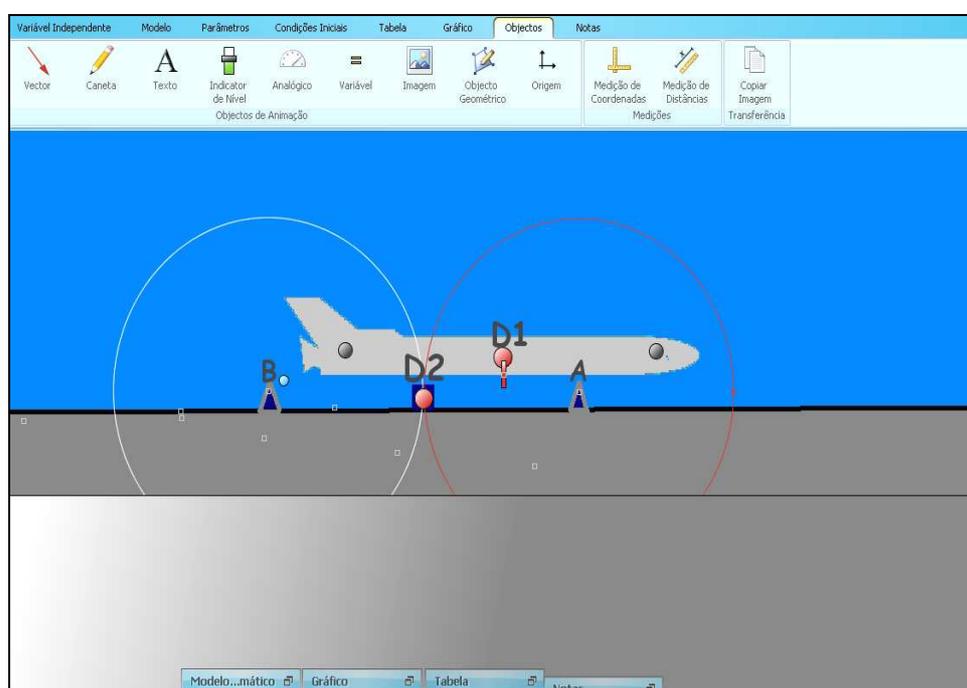


Figura 28 – Animação 5.3 - Em relação ao referencial da plataforma.

Na **animação 5.4**, para os observadores solidários a nave, a plataforma, as antenas e o detector D2 estão em movimento para a esquerda. As frentes de onda se expandem uniformemente em torno dos pontos fixos onde ocorreram as emissões, independentemente do movimento das antenas. Os observadores também determinam que os pontos fixos são equidistantes de D1, conforme ilustra a Figura 29. Uma vez que o detector D2 se desloca para a esquerda, a única forma de os observadores solidários à nave explicarem o que ocorre no item 2 (ambos são detectados ao mesmo tempo por D2) é supor que o evento A ocorreu antes do B. Em outras palavras, para estes observadores, as emissões não ocorreram simultaneamente e, por isso, foram detectados por D1 em momentos diferentes.

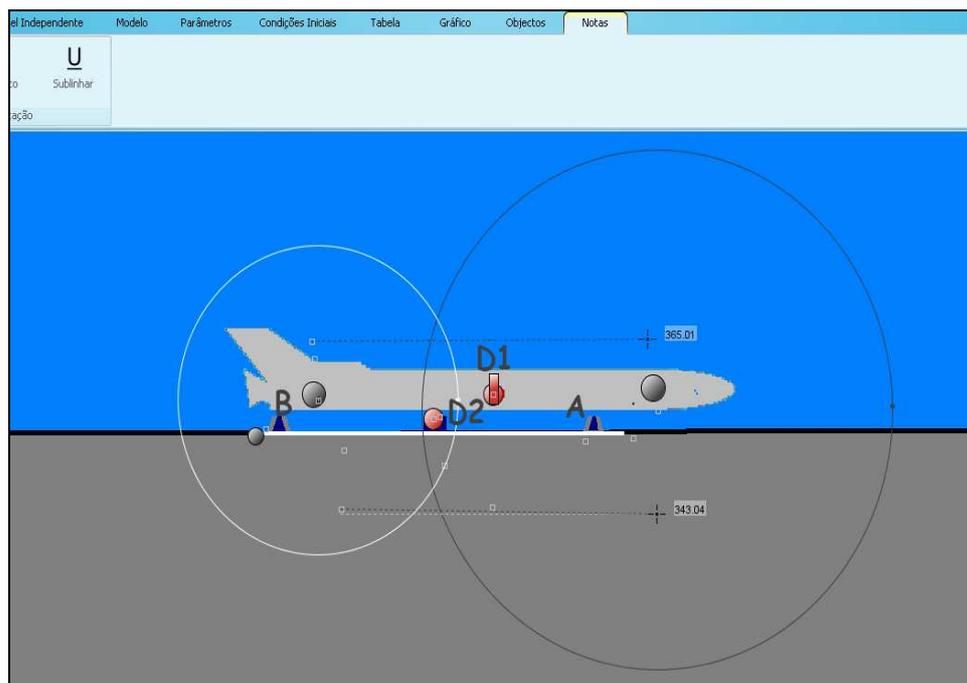


Figura 29 – Animação 5.4 - Em relação ao referencial da nave.

A apresentação da simulação 5.3. e 5.4 deve ser seguida de discussão de acordo com a noção de simultaneidade. Devemos retro-evoluir a animação e mostrar que os observadores fixos na nave explicam que o observador D2 recebe os pulsos não-simultâneos no mesmo instante de tempo porque ele se desloca para a esquerda. Novamente salientamos que a animação deve ser encarada como uma ilustração e que representa a evolução de eventos nos respectivos referenciais

4.2.6.4. Discussão dos testes 5.1, 5.2, com uso de animações

A discussão das respostas referentes aos pré-testes 5.1 e 5.2, apresentando as animações 5.5, 5.6 e 5.7 (vulcões Albano e Belano). Nestas também evidenciamos o modelo matemático do *software* usado, pois os comentários de alguns alunos sugeriam que poderíamos estar manipulando a detecção dos sinais. Com isso, concluímos que a dificuldade de os estudantes assimilarem as idéias envolvidas nestes testes foi muito grande, mesmo com a ajuda das animações.

As animações 5.5, 5.6 e 5.7 contemplam a descrição da detecção de *flashes* emitidos por dois vulcões, Albano e Belano, por observadores fixos em distintos sistemas de referência: (a) um sismólogo fixo no referencial dos vulcões, situados a iguais distâncias do observador; (b) um assistente do sismólogo, fixo ao pé do vulcão Albano, em relação ao qual os dois vulcões

estão em repouso; e (c) um observador em uma espaçonave, em relação ao qual ela está em repouso.

Na **animação 5.5**, o observador está fixo no referencial (Figura 30), em relação ao qual uma antena receptora, localizada no ponto médio entre os dois vulcões, encontra-se em repouso. Dois *flashes* são emitidos pelos vulcões simultaneamente. Nesta situação descrita, a antena registra os sinais simultaneamente e, se o observador está solidário a ela, o observador conclui que as emissões ocorreram simultaneamente.

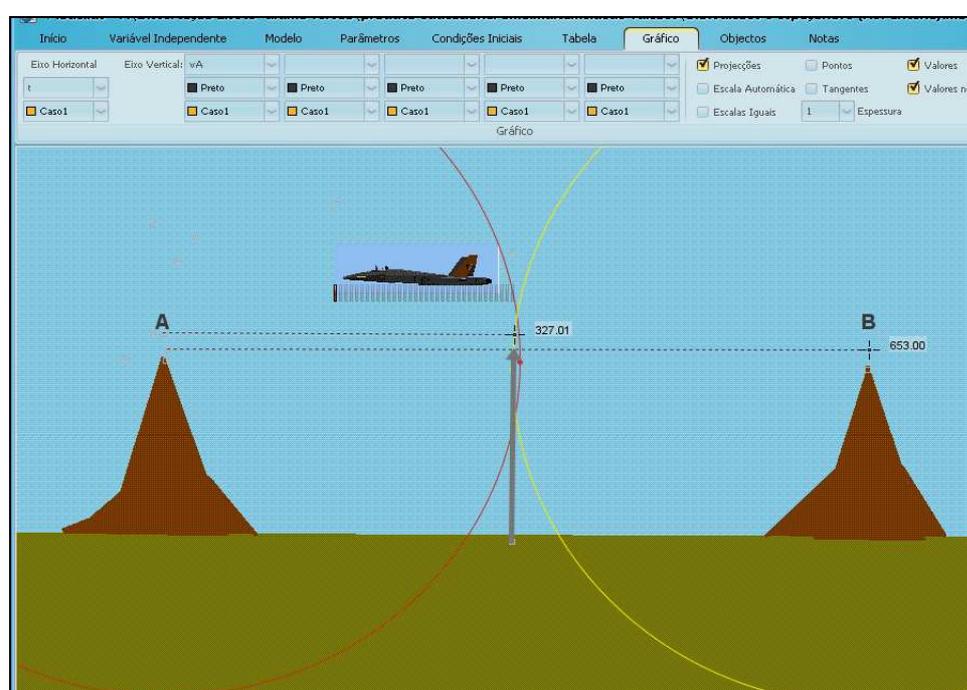


Figura 30 – Animação 5.5. -Em relação ao referencial da antena e dos vulcões.

Na **animação 5.6**, o observador está na posição do assistente do sismólogo, que está fixo no referencial dos vulcões, porém ele e a antena receptora estão posicionados no pé do vulcão da esquerda, Albano, conforme ilustra a Figura 31. Por não estar equidistante dos vulcões, a distância percorrida pela luz até a antena será diferente e, assim também, o tempo de percepção, $t = L/c$, de modo que os eventos não são registrados simultaneamente pelo referido observador. Por outro lado, por estar fixo no mesmo referencial dos vulcões, e por ser considerado um observador inteligente, ele tratará de fazer uma correção dos tempos registrados e concordará com o sismólogo em que os eventos ocorreram simultaneamente.



Figura 31- Animação 5.6. - Assistente no pé do Monte Albano e vulcões não equidistantes.

Na **animação 5.7**, o observador está fixo no referencial em relação ao qual o jato está em repouso. Para ele, os vulcões e a antena é que se movem com velocidade relativa ($-c/2$). O jato se desloca do Monte Belano para o Monte Albano quando estes emitem os *flashes*. O jato possui um receptor e registra antes o *flash* proveniente do Monte Albano, conforme ilustrado pela Figura 32, pois se aproxima deste, enquanto aquele proveniente do Monte Belano se afasta dele. Para este observador, as recepções dos *flashes* não ocorreram simultaneamente.

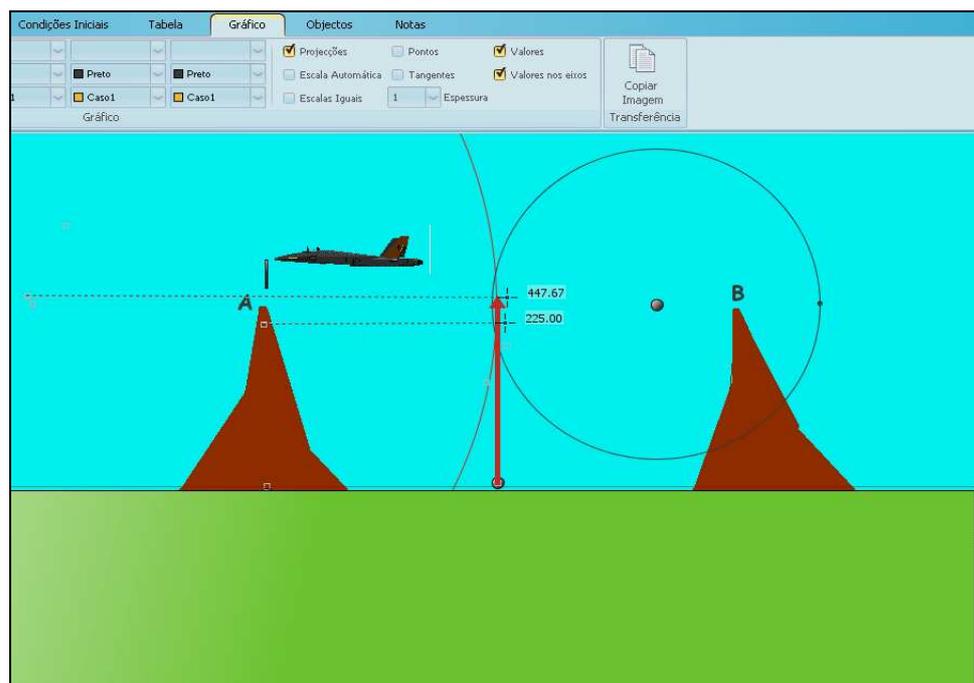


Figura 32 –Animação 5.7.- Em relação ao referencial onde o jato está em repouso.

4.2.6.5. Aplicação do pós-teste 5.3.

No final da aula, foi aplicada uma versão modificada do pré-teste anterior. Este foi apresentado como um pós-teste para medir a evolução do conhecimento acerca de referenciais e das teorias que os utilizam. O pós-teste com a resposta cientificamente aceita é apresentado a seguir.

Teste final 5.3 - Dois vulcões, Monte Albano e Monte Belano, estão separados por uma distância L (figura 33). Os dois vulcões entram em erupção e um sismólogo, que se encontra em um laboratório fixo no solo e equidistante dos dois montes, detecta as erupções ao mesmo tempo. Um jato que se desloca, com velocidade $(-c/2)$, indo do monte Belano para o monte Albano (no início ele está sobre Belano), também detecta as erupções simultaneamente quando sua posição coincide com a do laboratório.

a) No referencial solidário ao jato, a erupção do Monte Belano ocorre antes, depois ou ao mesmo tempo em que a erupção do Monte Albano? Justifique sua resposta.

b) No referencial do sismólogo, a erupção do Monte Belano ocorre antes, depois ou ao mesmo tempo em que o Monte Albano? Justifique sua resposta

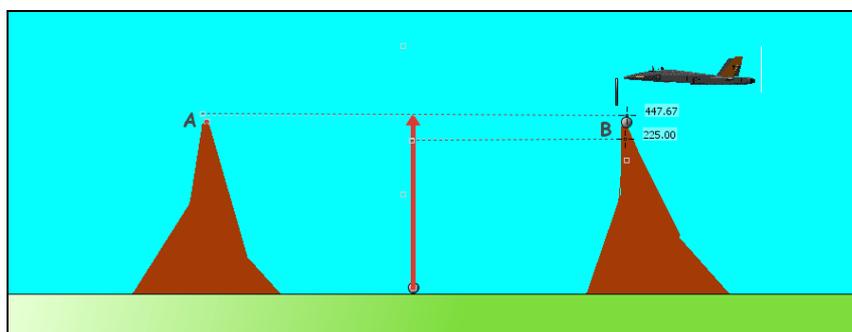


Figura 33 - Os sinais são detectados ao mesmo tempo pelo jato e antena.

Resposta:

a) No referencial solidário ao jato, o observador, também detecta *os flashes* simultaneamente. Para este último, que parte de Belano, o sistema se move da esquerda para direita. O sistema vulcões e antena se aproximam dele, mas pelo fato da origem do pulso luminoso ser independente do movimento da fonte, ele conclui que o sinal proveniente do Monte Albano tem de percorrer uma distância maior até o detector da antena. Assim, para ele, se as detecções foram simultâneas, a erupção do Monte Belano ocorreu depois do que a da outra montanha, pois o pulso luminoso terá a percorrer uma distância menor.

b) No referencial do sismólogo, um dos observadores está fixo no referencial em relação ao qual uma antena receptora, localizada no ponto médio entre dois vulcões, está em repouso.

O observador detecta os *flashes* da erupção ao mesmo tempo, de modo que, para ele, as emissões foram simultâneas.

4.2.6.6. Análise e discussão dos resultados dos testes 5.3

Nesta análise, infelizmente, podemos apenas contar com as respostas de dois alunos da turma A que compareceram A_2 e A_4 . Podemos concluir que suas noções sobre referenciais na TRR evoluíram, embora as respostas não possam ser consideradas integralmente como científicas aceitas. Os alunos A_2 e A_4 respondem o item (a):

a) no referencial solidário ao jato a erupção do Monte Belano ocorre depois que no Monte Albano. A detecção dos sinais pelo jato se deu ao mesmo tempo, mas isso não garante que a erupção também foi simultânea. (A_2)

a) Para um observador no jato, a Terra está se movendo com uma velocidade $c/2$ da esquerda para direita, porém a origem dos pulsos não se desloca junto com a Terra. **Quando o jato estiver passando pelo laboratório ele registra o pulso do Monte Albano primeiro e o pulso do Monte Belano será registrado depois.** (A_4)

A última frase (em negrito) escrita pelo aluno A_4 revela o equívoco que ele cometeu em se referir ao registro (já estava definido no problema que o registro fora simultâneo) em lugar de emissão dos sinais.

Da turma B, sete alunos concluíram os testes, B_2 , B_3 , B_4 , B_5 , B_8 , B_9 e B_{10} . Destes, B_2 e B_3 participaram de todas as atividades.

O aluno B_2 , conforme podemos acompanhar, já havia apresentado noções relativísticas em questões anteriores. Ele respondeu e também se utilizou de imagens para representar seu raciocínio. Podemos concluir que suas respostas foram as mais próximas possíveis da região relativística, conforme podemos verificar pela transcrição:

a) No referencial solidário ao jato, que se encontra com velocidade $(-c/2)$ em relação ao solo e detecta as erupções ao mesmo tempo, por ser um observador inteligente, conclui que os eventos não foram simultâneos (Belano entra em erupção depois)".
 b) No referencial do sismólogo, que encontra-se em repouso em relação ao solo e equidistante dos vulcões, as erupções ocorreram ao mesmo tempo (são simultâneas) (B_2)

Comparando as respostas do aluno B_3 , que também participou de todas as atividades, vemos que este ainda permaneceu com dificuldades quanto à recepção e à ocorrência de eventos em relação a um referencial em movimento.

O aluno B₉, embora não tenha participado de uma das atividades, apresenta alguma noção sobre referenciais em movimento, mesmo não apresentando a justificativa adequada cientificamente:

a) para o referencial solidário ao jato, a erupção do Monte B ocorre depois que o Monte Albano, pois ele está indo na direção do Monte Albano. b) Ocorre ao mesmo tempo para o sismólogo, pois ele está equidistante dos dois montes. (B₉)

Os demais continuaram apresentando problemas graves em suas concepções, quanto aos referenciais em movimento (item a). Observamos que o item (b) foi respondido em primeiro lugar. Para as respostas que envolvem o referencial dos vulcões (item b), todos concordam em emissões simultâneas para detecção ao mesmo tempo.

4.2.6.7. O perfil conceitual de referencial dos alunos

Ao final da análise, elaboramos a tabela 1, com a lista de alunos e suas respectivas concepções em cada teste aplicado. Esta tabela consiste na utilização de uma legenda diferenciando as três regiões do perfil conceitual de referencial por cor, seja senso comum (amarelo), newtoniana (verde) e relativística (vermelho). Cada linha da tabela compreende a evolução conceitual do aluno, que será descrita detalhadamente. Esta evolução é mapeada pelas respectivas respostas aos testes, cuja numeração encontra-se na primeira linha da tabela, conforme podemos visualizar.

Tabela 1: Apresentação do perfil conceitual dos alunos

Alunos	Testes															
	1.1a	1.1.b	1.2a	1.2b	1.2.c	1.3a	1.3b	2.1a	2.1b	2.1.c	2.1.d	5.1	5.2	5.3a	5.3.b	
A1	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
A2	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
A3	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
A4	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B1	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B2	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B3	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B4	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B5	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B6	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B7	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B8	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B9	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B10	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							
B11	Verde	Verde	Amarelo	Amarelo	Amarelo	Vermelho	Amarelo	Vermelho	Amarelo							

Legenda
Verde
Amarelo
Vermelho
Cinza

Na primeira linha, o aluno A₁, apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nas respostas dos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está fixo no referencial da antena, ele apresenta concepções na região relativística, porém no teste 1.3b, no qual o observador está em

repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, referencial considerado em movimento, a resposta foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1 e 5.2, ele apresentou concepções de senso comum. Esse aluno não realizou o pós-teste final, por motivo de doença.

O aluno A_2 apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial no qual a antena está em repouso, ele apresentou concepções na região relativística, porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística, enquanto nos demais, 2.1b, c e d, no referencial considerado em movimento, a resposta foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1 e 5.2, o estudante apresentou concepções de senso comum. No teste 5.3a, no referencial considerado em movimento, a resposta continuou sendo de senso comum, e no teste 5.3b, em relação ao referencial no qual o observador está em repouso em relação à antena na Terra, a resposta foi na região relativística.

O Aluno A_3 apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2 a, b e c (MN) na região de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística. Porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, em relação ao referencial considerado em movimento, a resposta foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1 e 5.2, ele apresentou concepções de senso comum. Esse aluno não realizou o pós-teste final, por motivo de doença.

O aluno A_4 apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística, porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial

considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística, enquanto nos demais, 2.1b, c e d, em que o referencial é considerado em movimento, a resposta foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, no teste 5.1 ele apresentou concepções na região de senso comum para o referencial no qual o observador está em repouso em relação ao jato, porém no teste 5.2, que se referia ao referencial do assistente em pé na base do Monte Albano, a concepção corresponde à região relativística. Esse aluno não realizou o pós-teste final também por motivo de doença.

O aluno B₁ apresentou as respostas do teste 1.1a e b e 1.2 a, b e c (MN) na região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nos demais testes, por motivo de estágio, este aluno não pode participar do curso.

O aluno B₂ apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região newtoniana. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial no qual a antena está em repouso, ele apresentou concepções na região relativística. Porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística, assim como nos demais 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, no teste 5.1 o estudante apresentou concepções na região de senso comum para o referencial no qual o observador está em repouso em relação ao jato, assim como no teste 5.2, que se referia ao referencial do assistente que está na base do Monte Albano. No teste final 5.3a e b, as concepções apresentadas correspondem à região relativística.

O aluno B₃ apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística, enquanto no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística, enquanto nos demais, 2.1b, c e d, referencial considerado em

movimento, a resposta foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, testes 5.1, 5.2 e 5.3, ele apresentou concepções na região de senso comum.

As respostas do aluno B₄ aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) correspondem à região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística, enquanto no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2 e 5.3, o estudante apresentou concepções na região de senso comum.

O aluno B₅ apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) que correspondem à região de senso comum. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial no qual a antena está em repouso, ele apresentou concepções na região relativística, enquanto no teste 1.3 b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2 e 5.3, ele apresentou concepções na região de senso comum.

O aluno B₆ apresentou respostas aos testes 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) que correspondem à região de newtoniana e de senso comum, respectivamente. Este aluno não participou dos testes da mecânica relativística, 1.3a e b. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma do trem, a concepção apresentada corresponde à região relativística, enquanto nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região revelada foi de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2 e 5.3, o estudante apresentou concepções na região de senso comum.

O aluno B₇ apresentou respostas do teste 1.1 a e b e 1.2 a, b e c (MN) na região de senso comum. Nas respostas aos testes sobre a mecânica relativística, para o teste 1.3a, cujo observador está no referencial da antena, o estudante apresentou concepções na região

relativística. Porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. Ele não participou dos demais testes da mecânica relativística devido ao seu estágio.

O aluno B₈ apresentou as respostas do teste 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região de newtoniana e de senso comum, respectivamente. Ele não participou do teste 1.3a e b. No pós-teste 2.1a, em que o observador está em repouso em relação à plataforma, a concepção apresentada está na região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região é de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2 e 5.3, apresentou concepções na região de senso comum.

O aluno B₉ apresentou respostas do teste 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes sobre a mecânica relativística, para o teste 1.3a, em que o observador está parado no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística. Porém no teste 1.3b, no qual o observador está em repouso no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. No pós-teste 2.1a, no qual o observador está em repouso em relação à plataforma, a concepção apresentada está na região relativística, enquanto nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região é de senso comum. Nos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2, o estudante apresentou concepções na região de senso comum e relativística, respectivamente. Já no pós- teste 5.3a, sua concepção foi de senso comum, devido ao movimento considerado deste referencial; todavia, em relação ao referencial no qual o observador está em repouso em relação à superfície da Terra, sua concepção foi relativística.

O aluno B₁₀ apresentou as respostas do teste 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região de senso comum e newtoniana, respectivamente. Ele não participou dos testes 1.3a e b. No pós-teste 2.1a, em que o observador está em repouso em relação à plataforma, a concepção apresentada está na região relativística. Já nos demais, 2.1b, c e d, cujo referencial é considerado em movimento, a região é de senso comum. Ele não participou dos testes referentes à relatividade da simultaneidade, 5.1, 5.2. Já no pós- teste 5.3, sua concepção foi de senso comum para o referencial considerado em movimento, porém em relação ao outro, no qual o observador está em repouso em relação à superfície da Terra, sua concepção é relativística. As faltas deste aluno também se justificaram por causa de seu estágio.

O aluno B₁₁ apresentou respostas do teste 1.1a e b e 1.2a, b e c (MN) na região newtoniana e de senso comum, respectivamente. Nas respostas aos testes da mecânica relativística, para o teste 1.3a, em que o observador está parado no referencial da antena, ele apresentou concepções na região relativística. Porém no teste 1.3b, em que o observador está parado no referencial considerado em movimento, sua resposta foi de senso comum. Ele não participou dos demais testes, e suas faltas se deram também em razão de estágio.

4.2.7. Atividade 7 - Revisão geral e apresentação do perfil conceitual de referencial

Na sétima atividade, discutimos as respostas do teste anterior (5.3), que envolve relatividade da simultaneidade. A ilustração do movimento foi feita com a respectiva animação (5.8). Esta discussão envolveu todos os conceitos até então apresentados.

Na **animação 5.8** (detecção simultânea de dois sinais luminosos por observadores fixos em dois referenciais distintos), um dos observadores está fixo no referencial em relação ao qual uma antena receptora, localizada no ponto médio entre dois vulcões, está em repouso. O observador detecta os *flashes* da erupção ao mesmo tempo, de modo que, para ele, as emissões foram simultâneas. Outro observador, solidário ao referencial do jato, também detecta os *flashes* simultaneamente. Mas para este último, o sistema se move da esquerda para direita e, pelo fato de a origem do pulso luminoso ser independente do movimento da fonte, ele conclui que o sinal proveniente do Monte Albano tem de percorrer uma distância maior até o detector (Figura 34). Assim, para ele, a erupção do Monte Belano ocorreu depois do que a da outra montanha, pois nesta o pulso luminoso terá a percorrer uma distância menor.

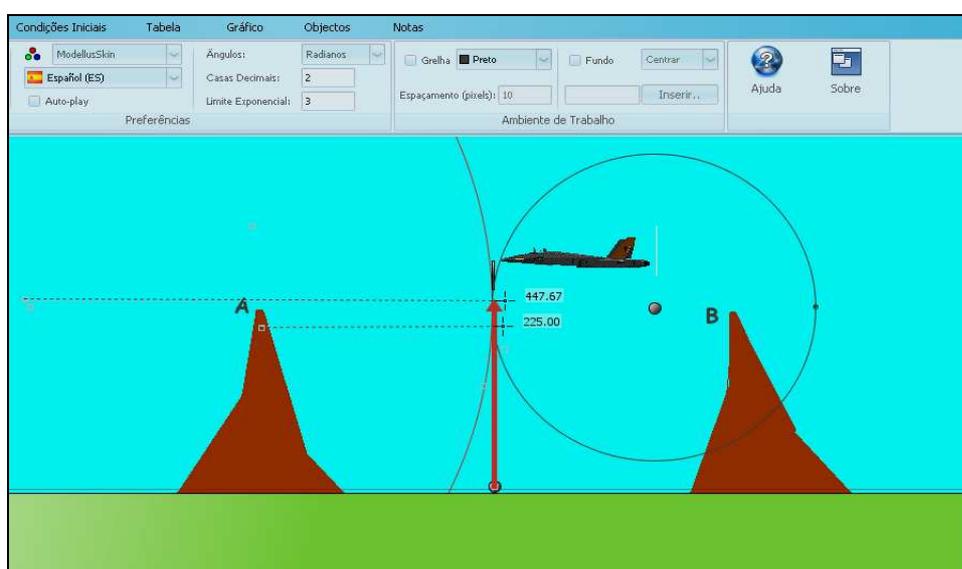


Figura 34- Animação 5.8 - Recepção dos sinais simultâneas nos dois referenciais

Nesta atividade, contamos com a presença dos alunos da turma A que haviam faltado à aula anterior. Com eles, procuramos fazer uma argüição acerca do teste anterior. A dificuldade de percepção ficou evidente no que diz respeito ao referencial do jato. Para estes alunos, foi construída uma tabela semelhante à tabela 1, apresentada em slides, onde puderam ter a noção de seu desenvolvimento conceitual.

Para a turma B, a mesma atividade foi desenvolvida. Para estes, foi apresentado o perfil conceitual, impresso, de cada um, individualmente.

Após uma revisão rápida que envolveu a re-apresentação das animações anteriores (5.5, 5.6, 5.7), referentes à relatividade da simultaneidade, partimos para discutir a metodologia que usa o modelo de perfil conceitual, comentando as referências Mortimer (1995, 2000) e Ayala & Frezza (2007). Explicamos e diferenciamos as três regiões do perfil conceitual de referencial, que são: de senso comum, galeliana/newtoniana e relativística. Além disso, procuramos enfatizar o referencial teórico utilizado. Nesse aspecto, a explicação da base teórica da metodologia é importante para os alunos de Licenciatura em Física. Essa base, além do modelo de perfil conceitual, consiste na teoria de aprendizagem significativa de Ausubel e na epistemologia de Bachelard.

Quanto aos resultados finais, podemos concluir que permanece a dificuldade nas respostas relacionadas ao ponto de vista de observadores solidários ao referencial considerado em movimento, e que concepções do senso comum permanecem. Sob uma perspectiva de promover a tomada de consciência do significado real que este conceito tem nas duas teorias, concluímos que este trabalho obteve êxito.

4.3. Avaliação do curso pelos alunos

Na turma A, em questionamento informal, perguntamos aos alunos qual eram as suas opiniões sobre o curso. As respostas evidenciaram que o objetivo de promover a tomada de consciência e a diferenciação do conceito de referencial, nas duas mecânicas, foi atingido. Além disso, um aluno da turma A comentou que, a partir da nossa primeira atividade, em especial a da ultrapassagem dos carros, houve uma mudança na sua maneira de perceber os movimentos relativos. Esse fato se deve às animações que descrevem os referenciais em movimento relativo, em especial aquelas em que o observador está solidário ao referencial que

se move em relação ao outro. Um exemplo disso é a animação 1.5, onde o carro B anda para trás (velocidade relativa negativa).

Na turma B, também perguntamos quais eram suas opiniões a respeito do curso. Eles responderam que gostaram do curso, porém concordaram que houve pouco tempo para um aprendizado mais significativo. No entanto, concluíram que o nosso objetivo foi atingido, quanto à tomada de consciência sobre a diferenciação da noção de referencial nas duas teorias. Disseram também que, apesar de já terem estudado a TRR em semestres anteriores, acabaram esquecendo-se do assunto e que, neste aspecto, puderam fazer uma revisão.

CONCLUSÃO

Primeiramente devemos salientar que o sucesso de todo trabalho, entre eles o de pesquisa em ensino, se deve à definição do problema a ser considerado. Foi através deste que buscamos por outros trabalhos de pesquisa que envolvesse teorias, planejamentos e metodologias de interesse. Dos relatos de resultados encontrados, e, também, considerando as dificuldades comprovadas por experiência própria, conclui-se que o problema da noção de referencial na aprendizagem das duas mecânicas envolvidas (MN e TRR) é realmente sério. A aprendizagem significativa da TRR torna-se praticamente impossível sem que se consiga por parte do estudante a real diferenciação dos conceitos de referencial envolvidos nas duas teorias. Foi através deste problema que buscamos todos os elementos necessários para alcançar os objetivos estabelecidos.

Todo trabalho que trata da formação de professores de Física tem um objetivo maior, qual seja, o ensino de Física no Ensino Médio. Embora os currículos atuais ainda não dêem a atenção devida à FM&C, temos certeza de que um professor bem preparado para estes temas tornará as aulas de Física mais atraentes para seus estudantes, podendo, até mesmo, motivá-los na escolha de uma profissão científica ou, então, oferecer uma Física que seja efetivamente útil para sua cidadania. Por exemplo, poucos professores sabem associar a TRR à uma tecnologia tão atual quanto a do GPS. Nesta perspectiva, complementamos com a pesquisa do Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (INEP) quando argumenta que *“o que afasta os jovens da escola, é mais o desinteresse do que a necessidade de trabalhar”*. Entretanto, o papel do professor vai além do mero domínio dos conteúdos e de motivar o interesse dos alunos. Sua formação inicial, assim como sua formação continuada, inclusive com respeito às ferramentas digitais são exigências para um ensino de qualidade. São estas ferramentas os instrumentos principais que possibilitam uma aula mais atraente e com assuntos ligados ao cotidiano do aluno. Além disso, o mundo físico e o virtual são facilmente interligados pelas novas tecnologias, possibilitando a representação de modelos considerados muito abstratos. Sendo assim, é na escola, através da mediação do professor, que o estudante deve receber o suporte para uma prática dessas tecnologias associada à aprendizagem.

Quanto ao uso das novas tecnologias neste trabalho, foi através da construção e da utilização de animações que conseguimos ilustrar de maneira tão clara e atraente os conceitos altamente abstratos envolvidos na TRR. A partir daí, pudemos atestar a idéia de serem instrumentos de grande potencial no aprendizado significativo dos movimentos relativos, tanto

na MN quanto na TRR. Enfatizamos a vantagem do seu uso em situações de alto nível de abstração e em situações difíceis de ser representadas convencionalmente, tão somente fazendo uso de figuras estáticas ou desenhos em quadro-negro, como, por exemplo, no caso dos famosos “experimentos de pensamento” de Einstein. Além disso, consideramos que estas animações produzidas por modelagem computacional com o *software Modellus*, ao serem construídas, colaboram para uma aprendizagem mais significativa do que se somente exploradas. Embora os alunos não tenham participado da construção destas, procuramos disponibilizá-las, após as atividades, para que pudessem ser exploradas por eles. Nestes modelos, ficam visíveis, além dos movimentos, os modelos matemáticos, gráficos, tabelas de dados, vetores, entre outros, mencionados nas explicações e discussões em sala de aula. Este *software*, que é de uso livre, ofereceu todas as condições necessárias para a representação dos experimentos propostos. Sendo assim, no que se refere à formação de professores, pensamos que este trabalho pode colaborar com a inserção da FM&C no Ensino Médio e dar uma visão do que deva ser o uso das novas tecnologias no ensino, ou seja, a representação do mundo físico através de modelos virtuais.

Outro aspecto considerado importante é o resultado de aprendizagem, quando o aluno de mestrado profissional, que é professor, planeja e constrói o material didático. Essa é uma experiência especial, porém isso não impede que ela seja repassada para os estudantes participantes do curso. Muito pelo contrário, durante as atividades muitas experiências de planejamento, tais como construção das animações, foram repassadas e comentadas com os alunos.

No que se refere ao trabalho de elaboração e aplicação do curso, cumpridas todas as etapas, a parte mais importante está relacionada aos resultados finais sobre a noção de referencial. Podemos concluir que, apesar de nosso empenho e dedicação, e da motivação que os alunos demonstraram em aprender, as dificuldades enfrentadas por eles são muito fortes. Conforme revelado pelo perfil conceitual da maioria destes, continua a existir dificuldade nas respostas relacionadas ao ponto de vista de observadores solidários ao referencial que se move. Além disso, também fica visível que as concepções de senso comum permaneceram ao final do curso. Outra dificuldade importante enfrentada pelos estudantes foi a de descrever qualquer evento do ponto de vista de dois ou mais observadores inerciais. Desta forma, este trabalho confirma os resultados das experiências vivenciadas pelo professor, nas aulas de Introdução à TRR, da UFPel, descritas em Ayala & Frezza (2007).

Sob uma perspectiva de explicitar as concepções e promover uma tomada de consciência dos estudantes sobre a noção exata do conceito de referencial na TRR, concluímos que este trabalho obteve êxito. A avaliação dos alunos sobre o curso evidencia que este objetivo foi atingido. Além disso, os estudantes comentaram que houve uma mudança na maneira de eles conceberem os movimentos relativos do cotidiano, entre os quais o de uma simples ultrapassagem de carro.

Consideramos que a curta duração do curso e também da presença inconstante de alguns alunos, por diversos motivos, dificultou uma aprendizagem mais significativa, pois este curso consiste de uma seqüência de conceitos que, interligados, auxiliam na formação da estrutura cognitiva do aluno. Quanto a isso, devemos deixar claro que a ausência de alguns alunos acontecia por motivos de estágios ou de doença, nunca por falta de motivação. Mesmo se tratando de turmas reduzidas, podemos comprovar, através da tabela 1, que apresenta o perfil conceitual dos alunos, a possibilidade de uma evolução conceitual com respeito ao conceito trabalhado. Por isso, o curso foi apenas uma experiência-piloto de algo que pode ser considerado como uma introdução mais aprofundada às disciplinas de TRR nos cursos de Licenciatura em Física. A intenção, no futuro, é desenvolver um mini-curso que possa ser aplicado a alunos, em eventos de Ensino de Física. Além disso, este curso deve colaborar para enfrentar os obstáculos considerados à aprendizagem desta teoria. Consideramos que o material elaborado será de grande utilidade para estes alunos e também para outros professores de Física. Estes poderão acessá-lo na *Home Page* deste Programa de Pós Graduação, que deve conter as animações como o produto educacional, assim como, a descrição do curso, nesta dissertação. Além da internet, também disponibilizamos as animações em um CD-ROM.

O estudo a respeito deste conceito proporcionou a oportunidade de conhecer várias outras teorias de aprendizagem que tratam da importância da construção de conceitos científicos e a sua utilização nas escolas. Com isso, concluímos o quanto é importante, principalmente na formação de professores, a tomada de consciência de um conceito, ou seja, do seu real significado e da diferenciação entre o que pode ser de senso comum e o que precisa ser científico, para que sejam utilizados em contextos apropriados. Além disso, outra preocupação, na formação de professores, é a utilização da linguagem escrita. Esta, que é um dos meios de expressão dos pensamentos e significados, deve ser clara, objetiva e correta quanto à forma, para que um leitor possa entender.

REFERÊNCIAS

AYALA FILHO, A.L.& FREZZA, J.S. *A Construção de um Perfil Conceitual de Referencial na Aprendizagem da Teoria da Relatividade*. In: Anais do II Encontro Estadual de Ensino de Física. Porto Alegre: IF UFRGS. 2007. p 117- 123

ÁLVES, L. *Geração Digital Native, Cursos On-line e Planejamento: um Mosaico de Idéias*. In: Desenvolvimento Sustentável e Tecnologias da Informação e comunicação. Edufba Salvador, v1, p.145-160, 2007.

BARROS, A.; MONTE, E.M.; ARAÚJO, I.G. et all. *Sobre a contração de Lorentz e Fitzgerald*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo. v.27, n.4 p.621-623.2005.

D' AGOSTIN, A. *Física Moderna e Contemporânea: com a Palavra Professores do Ensino Médio*. Curitiba, 2008. Dissertação (Mestrado em Educação da Universidade Federal do Paraná). Biblioteca Digital. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=135401>. Acesso em: 2 maio 2009.

EINSTEIN, A. *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*. In: Textos Fundamentais da Física Moderna, v. 1, 5ª edição, O Princípio da Relatividade. Reproduzido de Ann. D. Phys. 17.1905. Tradução de Mário José Saraiva. Porto: Fundação Calouste, 1971. 257 p.

ESCOBAR, C.; SHULZ, P. *Especial Einstein*. Revista Pesquisa online. Suplemento Especial. p. 1-2. Nov.2008. Disponível em: <<http://revistapesquisa.fapesp.br/?art=3697&bd=1&pg=1&lg=>> .Acesso em: 12 janeiro 2009.

GOMES, H. J. P.; OLIVEIRA, O. B. *Obstáculos Epistemológicos no Ensino de Ciências: um Estudo de suas Influências nas Concepções de Átomo*. Rev. Ciência & Cognição, Curitiba, v.12 p.96-109. Departamento de Teoria e Prática de Ensino, Setor de Educação, UFPR. 2007. Disponível em: <<http://www.cienciasecognicao.org>>. Acesso em: 19 novembro 2009.

FELIPE, G.; BARROSO, M. & PORTO, C. M. *Simulações Computacionais no Ensino de Relatividade Restrita*. In: Anais do XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física. 2005. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xvi/sys/resumos/T0171-2.pdf>>. Acesso em: 30 agosto 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & KRANE, K. *Física 4*. v. 4, 5ª edição Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004. 384 p.

HALLIDA, Y.D.; RESNICH, R. & WALKER, J. *Fundamentos de Física Óptica e Física Moderna*. v.4. 7ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007. 404 p.

HECKLER, V.; SARAIVA, M. F. O. & OLIVEIRA, K. S. *Uso de Simuladores, Imagens e Animações como Ferramentas Auxiliares no Ensino/Aprendizagem de Óptica*. Rev. Brasileira de Ensino Física, São Paulo, vol.29, n.2, p 267-273. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172007000200011&script=sci_arttext>. Acesso em: 30 agosto 2008.

KARAM, R.; CRUZ, S & COIMBRA, D. *A Abordagem das Relatividades em Sala de Aula*. 2006. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/x/sys/resumos/T0084-1.pdf>>. Acesso em: 20 de junho 2009.

LOPES, A. R. C. *Bachelard: o Filósofo da Desilusão*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v.13 ,n.3, p.248-273, 1996.

MEDEIROS, A.; MEDEIROS, C. F. *Possibilidades e Limitações das Simulações Computacionais no Ensino da Física*. Rev. Bras. Ensino Fís., São Paulo, vol.24, n. 2, p. 77-86. 2002. Disponível em:<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442002000200002>. Acesso em 30 agosto 2008.

MELO, D.S. *Aprendizagem do Conceito de Relatividade da Simultaneidade, Através do Uso de um Aparato Experimental*. 2008. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências UFRPE. Biblioteca Digital. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html?idtese=20081225003011012P1>>. Acesso em: 2 maio 2009.

MOREIRA, M.A. *Teorias de Aprendizagem*. São Paulo: EPU. 1999.195 p.

_____. *Gaston Bachelard*. Notas de Aula Preparadas para a Disciplina História e Epistemologia de Física do Currículo de Licenciatura em Física da UFRGS. Porto Alegre. 2005. 10 p.

MORTIMER E.F. *Construtivismo, Mudança Conceitual e Ensino de Ciências: para onde vamos?* In: III Escola de Verão de Prática de Ensino de Física, Química e Biologia. Serra Negra:10 a 15 de outubro de 1994. 1995. p.1-22.

_____. *Linguagem e Formação de Conceitos no Ensino de Ciências*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000. 383 p.

MOURÃO, R.R.F. *Explicando a Teoria da Relatividade e a visita de Einstein no Brasil*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1997.

PANSE, S., RAMADAS, J. & KUMAR, A. *Aternative Conceptions in Galilean Relativity: Frames of Reference*..Research Reports. Institute Journal.Sci.Educ.HBCSE, Mumbai v.16,n.1, p. 63-82.1994.

PÍON LIGADO NA FÍSICA [Home Page]. Disponível em: <<http://pion.sbfisica.org.br/pdc/index.php/por>>. Acesso em: 30 jul.2008.

RICCI T.F.& OSTERMANN F. *Relatividade restrita no ensino médio: Contração de Lorentz-Fitzgerald e a aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física*. C.B.E. F. v19- n.2 p.176-190. 2002.

RICCI T. F. *Teoria da Relatividade Especial* . 2000.Disponível em: < <http://www.if.ufrgs.br/~ricci/textos/relatividaderestrita/relatividadegalileana.html> > Acesso em: 25 março 2009

SANTOS, C.A. *Se não fosse o Relógio Atômico...* . Revista Ciência Hoje Online. 2008. Disponível em:<<http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/Se-nao-fosse-o-relogio-atomico/?searchterm=gps>>. Acesso em : 05 maio 2009.

SCHERR, R. E; SHAFFER, P. S. & VOKOS, S. *Student Understanding of Time: Special Relativity, Simultaneity and Reference Frames* Phys. Edu. Res. Am. J. Phys. Suppl.v.69, n.24, p. S24-S35.2001.

_____. *The Challenge of Changing deeply held Student beliefs about the Relativity of Simultaneity*. Am. J. Phys. Suppl.v.70, n.12, p. 1238-1248. 2002.

TIPLER P.A. *Física para cientistas e engenheiros*, v.4, 3ªedição. Rio de Janeiro:Editora Guanabara Koogan,1995. 451 p.

VILLANI, A; PACCA, J.L.A. *Concepções Espontâneas sobre Velocidade da Luz*. Int. J. Sci. Educ.USP. São Paulo, v.9- n.1, 55-56.1987.

ZELADA, G. *Narrativa Visual: Arte e Ciência Unidas para Representar um Novo Mundo*. São Paulo. File 2002: Eletronic Language International Festival. 2001. Disponível em: <<http://www.file.org.br/filemeio/abstrats.htm#gian>> e <<http://www.mamutemidia.com.br/>>. Acesso em: 30 agosto 2008.

APÊNDICE I

Produto educacional- CD ROM, contendo 30 animações produzidas com o Software Modellus-4.01

No CD ROM, acessar a página de abertura (abertura. index.html). Nesta, clique no botão para próxima página (sumário) onde encontram-se os links de acesso ao download dos arquivos das animações. Estes arquivos têm formato Modellus, na versão 4.01.

Para a visualização das animações você precisará, em seu computador, da instalação do *software Modellus* 4.01 (<<http://modellus.fct.unl.pt/>>), assim como o *Java* .