

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física



## **SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA POR MEIO DAS TICs.**

**FABIO KAZUYUKI DE SOUZA YAMASHITA**

**Manaus – AM  
2020**

Fábio Kazuyuki de Souza Yamashita

SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA CINEMÁTICA  
RELATIVÍSTICA POR MEIO DAS TICs

Dissertação apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física do Instituto Federal do Amazonas em parceria com a Universidade Federal do Amazonas, como requisito obrigatório para a obtenção do grau de mestre em ensino de Física.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo de Sousa

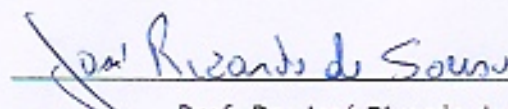
Manaus-AM  
2020

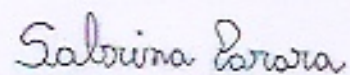



## Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

### Ata da 38ª Defesa de Dissertação

Aos vinte e um dias do mês de dezembro, do ano de dois mil e vinte, às dez horas, no Auditório III do Instituto Federal do Amazonas/IFAM/CMC, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando Fábio Kazuyuki de Souza Yamashita, intitulada "Sequência Didática para o ensino da Cinemática Relativística por meio de Tic", do curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das instituições de Ensino superior Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelos professores Dr. José Ricardo de Sousa (UFAM), Drª. Sabrina Silva Carara (UFMT) e Dr. José Anglada Rivera (IFAM), sendo presidida pelo primeiro. O professor José Ricardo de Sousa, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou o interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, cinco (5) vias impressas e encadernadas no formato capa dura, e duas vias digitais em formato PDF, em CD, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução Nº.47 - CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Ricardo de Sousa  
Presidente- UFAM

  
\_\_\_\_\_  
Profª. Drª. Sabrina Silva Carara  
Membro Externo-UFMT

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Anglada Rivera  
Membro Interno - IFAM

---

**Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro**

---

Y19s Yamashita, Fábio Kazuyuki de Souza.  
Sequência didática para o ensino da cinemática relativística por meio das TICs / Fábio Kazuyuki de Souza Yamashita. – Manaus, 2021.  
69 p. : il. color.

Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Universidade Federal do Amazonas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus* Manaus Centro, 2021.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo de Sousa.  
Produto educacional incluso como apêndice.

1. Física - ensino. 2. Cinemática. 3. Aprendizagem significativa. 4. Tecnologias de informação e comunicação. I. Sousa, José Ricardo de. (Orient.) II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Universidade Federal do Amazonas. IV. Título.

CDD 531.112

---

Dedico este trabalho à Deus, por me mostrar a cada desafio que o impossível é só uma maneira de descrever algo que não conseguimos entender ainda.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me dares muito mais do que eu preciso, e por me abençoares muito mais do que eu mereço.

Agradeço a minha princesa Fernanda, que nunca mediu esforços para me ajudar.

Aos meus colegas do mestrado que também foram fundamentais na minha chegada até aqui. Em especial ao Ivan, Aristeu, Paulo e Erivelton.

Aos professores do MNPEF polo 04 IFAM/UFAM, pela inspiração que me proporcionaram e pela confiança a mim depositada.

Ao meu orientador, que sempre se prontificou a me ajudar, não só neste trabalho mais como também em vários outros casos oportunizado durante o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio a esse programa de mestrado.

E a todos que diretamente ou indiretamente fizeram parte dessa formação o meu muito obrigado.

## RESUMO

### SEQUÊNCIA DIDÁTICA PARA O ENSINO DA CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA POR MEIO DAS TICs.

A Teoria da Relatividade Especial (TRR) de Albert Einstein revolucionou a forma como entendíamos conceitos por muito tempo considerados absolutos como espaço e o tempo. Com definições consideravelmente contra intuitivas, a TRR se tornou um dos pilares da Física Moderna Contemporânea (FMC) e proporcionou uma gama de tecnologias que se fazem presentes hoje em nosso cotidiano. Tendo em vista a importância desses conhecimentos na formação de cidadãos críticos capazes de compreender e associar informações relacionados a FMC, esse trabalho tem como objetivo propor e aplicar, em duas turmas do primeiro ano do ensino médio de uma escola pública estadual, uma sequência didática para o ensino da cinemática relativística. Essa sequência didática foi fundamentada na Teoria de Aprendizagem Significativa de David Ausubel associada a tecnologias de informação e comunicação (TIC). A aprendizagem foi avaliada por meio de avaliações formativas que ocorreram durante as aulas e uma avaliação somativa que ocorreu no início e término da aplicação da sequência didática. A proposta possibilitou a discussão e a compreensão de conhecimentos acerca do tema abordado e através dos testes avaliativos aplicados aos alunos, demonstrou ser eficaz e aplicável em qualquer escola com pouco recurso tecnológico.

Palavras-chave: Ensino da teoria da cinemática relativística, Tecnologias de Informação e Comunicação, Aprendizagem significativa.

## **ABSTRACT**

### **TEACHING SEQUENCE FOR TEACHING RELATIVE KINEMATICS THROUGH ICT**

Albert Einstein's Theory of Special Relativity (TRR) revolutionized the way we understood concepts for a long time considered absolute as space and time. With considerably counter intuitive definitions, TRR has become one of the pillars of Modern Contemporary Physics (FMC) and has provided a range of technologies that are present today in our daily lives. In view of the importance of this knowledge in the formation of critical citizens capable of understanding and associating information related to FMC, this work aims to propose a didactic sequence that, based on David Ausubel Theory of Meaningful Learning and the use of information and communication technologies (ICT), enables the teacher to debate and develop knowledge about relativistic kinematics with his high school students.

**Keywords:** Teaching the theory of relativistic kinematics, Information and Communication Technologies, Meaningful learning.



## FIGURAS

Figura 1 - Transformações de Coordenadas de Galileu.....	23
Figura 2 - Um feixe de luz (L) é emitido pela espaçonave com velocidade c.....	25
Figura 3 - Esquema do experimento de Michelson e Morley .....	26
Figura 4 - Estação Espacial.....	30
Figura 5 - Passagem da nave pela estação espacial .....	30
Figura 6 - Registro do clarão emitido pelo maçarico 2 .....	30
Figura 7 - Registro dos clarões pelo detector de luz da estação.....	31
Figura 8 - Registro do clarão emitido pelo maçarico 1 .....	31
Figura 9 - João a bordo do trem mede o intervalo de tempo $\Delta t_0$ .....	32
Figura 10 - Pedro mede o intervalo de tempo $\Delta t$ .....	32
Figura 11 – Ilustração dos raios cósmicos atingindo a atmosfera da Terra .....	35
Figura 12 - Localização a partir de um satélite .....	37
Figura 13 - Localização a partir de dois satélites .....	38
Figura 14 - Localização a partir de três satélites .....	38
Figura 15 - Qual delas é a avó? .....	41
Figura 16 - João e Pedro e o comprimento da plataforma da estação de trem.....	42
Figura 17 – Aparência visual das caixas retangulares .....	44
Figura 18 – Transformações de Lorentz.....	44
Figura 19 - GPS – Slide 2 .....	42
Figura 20 - O princípio da relatividade na eletrodinâmica - Slide 9 .....	52
Figura 21 - Exemplo 2 – O efeito da relatividade especial no GPS - Slide 21.....	53
Figura 22 - Cena do filme Interestelar - Slide 23.....	54
Figura 23 - Qual delas é a avó? - Slide 24 .....	54
Figura 24 - Exemplo 4: Qual a velocidade da luz referente a Terra? – Slide 30 .....	55

## FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Aula 1.....	50
Fotografia 2 - Aula 2.....	52
Fotografia 3 - Aula 3.....	56

## **GRÁFICOS**

Gráfico 1 - Percentual de acerto das questões. Turma - 1º ano 1 .....	62
Gráfico 2 - Percentual de acerto das questões. Turma - 1º ano 2.....	62

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
Objetivo Geral .....	13
Objetivos Específicos .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1 A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel .....	15
2.2 Alguns trabalhos sobre o ensino da relatividade especial no ensino médio.....	17
2.3 Sequência didática .....	18
2.4 Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) no ensino de física .....	21
<b>3 TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA</b> .....	23
3.1 As transformações de Galileu Galilei .....	23
3.2 As transformações de Galileu e a velocidade da luz.....	24
3.3 O experimento de Michelson e Morley .....	26
3.4 Os postulados da Teoria da Relatividade Especial .....	28
3.5 O conceito de Simultaneidade segundo Einstein .....	30
3.6 Relatividade nos intervalos de tempo.....	31
3.7 Os Múons .....	34
3.8 O efeito da relatividade especial no GPS .....	37
3.9 Paradoxo dos Gêmeos.....	40
3.10 Qual delas é a avó? .....	41
3.11 Relatividade do comprimento .....	42
3.12 As transformações de Lorentz.....	44
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	48
4.1 O planejamento das aulas (ou a sequência didática) .....	48
<b>5. FASES DE APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA</b> .....	50
5.1 Descrição da Aula 1 .....	50
5.2 Descrição da Aula 2 .....	52
5.3 Descrição da Aula 3 .....	55
<b>6 ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	57
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	64
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	65
<b>APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A Teoria da Relatividade Restrita (TRR) de Albert Einstein, publicada em 1905, gerou uma série de mudanças na forma como os cientistas da época compreendiam conceitos sobre movimentos relativos na ausência de campos gravitacionais (HALLIDAY e col., 2009, p. 147). Hoje, mais de 100 anos após a sua publicação, temos uma gama de tecnologias oriundas dessa teoria que fazem parte do nosso dia a dia tais como: energia nuclear, tomografia, GPS, entre outras (YAM, 2004). Além disso, a TRR abriu portas para a criação de uma segunda teoria que foi elaborada pelo próprio Einstein, denominada Teoria da Relatividade Geral (TRG). Nesta, a gravitação Newtoniana é reformulada, nos possibilitando compreender uma série de fenômenos além de expandir as fronteiras do conhecimento humano sobre o universo (RODRIGUES, 2001, p. 21).

Apesar das implicações que essa teoria ocasionou na vida que temos hoje, atualmente seu estudo não é contemplado por alunos do ensino médio, embora exista a orientação dos Parâmetros Curriculares Nacional (PCN) de Física quanto ao redirecionamento para o ensino de uma Física Moderna Contemporânea (FMC) no ensino médio (BRASIL, 2000, p. 8). Tendo em vista a relevância desses conhecimentos na formação de cidadãos críticos capazes de perceber, compreender e relacionar informações acerca de fenômenos associados a FMC, a orientação do PCN de Física e a possível adequação desses conteúdos ao currículo do ensino médio de Física, pretende-se com este trabalho elaborar uma sequência didática para o ensino da cinemática relativística para alunos do ensino médio.

Com o advento da internet, do rápido alcance as informações, e do desenvolvimento acelerado das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), compreendemos que o uso dessa ferramenta se tornou significativa em contextos educacionais (GARCIA e col., 2012). Almeida (2019), define TICs como: *“como todo e qualquer tipo de tecnologia que trate informação e auxilie na comunicação, podendo ser na forma de hardware, software, rede ou telemóveis em geral”*. Essas novas tecnologias de informação transformaram-se em alternativas de metodologia de educação e suporte de ensino em sala de aula. As TICs, por sua vez, possibilitam aos alunos conhecerem um novo formato de comunicação e transmissão de novos conhecimentos, isto deve valorizar o ensino-aprendizagem e incentivar o desenvolvimento de sua formação (SILVA, 2018). No entanto, o uso isolado das

tecnologias de informação não representa progresso de ensino, logo para sua real efetivação, esta ferramenta deve ser associada a didáticas pedagógicas que visam um melhor processo de ensino-aprendizagem (MODROW e SILVA, 2013).

Dessa forma, pensamos em aliar algumas tecnologias de informação e comunicação como vídeos, simuladores e animações com a teoria de aprendizagem significativa de Ausubel para a elaboração de uma sequência didática para o ensino da cinemática relativística para alunos do ensino médio. Ausubel propôs uma teoria educacional que relaciona novas informações de maneira não-arbitrária à conhecimentos prévios do sujeito, por estruturas cognitivas, em outras palavras, o elemento mais importante que promove o aprendizado significativo é aquilo que o indivíduo já conhece (PELIZZARI e col., 2002).

Considerando os pontos abordados acima, elaboramos uma sequência didática fundamentada na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel associado ao uso das TICs com o objetivo de responder a seguinte questão: Como o uso das tecnologias de informação e comunicação pode contribuir com o ensino da cinemática relativística no ensino médio? A partir disso, estabelecemos para esse estudo os seguintes objetivos:

### **Objetivo Geral**

✓ Desenvolver uma sequência didática para o ensino da cinemática relativística por meio da TIC para alunos do 1º ano do ensino médio.

### **Objetivos Específicos**

✓ Verificar os conhecimentos prévios dos alunos acerca da cinemática relativística;

✓ Elaborar/catalogar e organizar TICs como vídeos, simuladores e animações para o ensino da cinemática relativística;

✓ Verificar se a utilização da teoria da aprendizagem significativa ajudou na aprendizagem dos conteúdos pelos alunos.

A estrutura da dissertação está definida da seguinte forma: no capítulo 2 trataremos da fundamentação teórica referente a teoria de aprendizagem significativa

de David Ausubel, a análise dos trabalhos publicados, a sequência didática e tecnologias de informação e comunicação. No capítulo 3 discutiremos os conceitos físicos deste trabalho relacionados a cinemática relativística. Em seguida, discorreremos no capítulo 4 a metodologia utilizada. Nos capítulos 5 e 6 abordaremos as fases do trabalho aplicado e a análise dos resultados obtidos. Finalizando o trabalho, temos as considerações finais, referências usadas na dissertação e, como apêndice, o produto educacional.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel

É essencial explicar inicialmente que o processo de aprendizagem significativa requer por meio do aluno uma atuação mais participativa, pois esta metodologia irá incorporar novos conteúdos para este indivíduo, onde este relacionará com seu conhecimento pré-existente, de maneira oposta, esse novo conteúdo é assimilado isoladamente (PELIZZARI e col., 2002).

Com os inúmeros problemas enfrentados pelos professores em sala de aula, o psicólogo norte-americano David Paul Ausubel (1918-2008) preocupou-se em elaborar uma teoria de ensino significativa que contribuísse com o contexto educacional. Segundo Ausubel, Novak e Hanesian (1980):

A essência do processo de aprendizagem significativa é que as ideias expressas simbolicamente são relacionadas às informações previamente adquiridas pelo aluno através de uma relação não arbitrária e substantiva (não literal). Uma relação não arbitrária e substantiva significa que as ideias são relacionadas a algum aspecto relevante existente na estrutura cognitiva do aluno, como por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito ou uma proposição. (AUSUBEL e col., 1980, p. 34).

Assim, para Ausubel e col., (1980), a aprendizagem dita significativa é aquela que está diretamente relacionada aos conhecimentos prévios dos sujeitos. Desta maneira, quando o assunto compreendido pelo aluno não consegue interligar-se a conteúdos anteriores conhecidos, Ausubel denomina este método de ensino como aprendizagem mecânica.

A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel é, de modo geral, fundamentada na estrutura cognitivista, que por sua vez, é a interação do assunto compreendido em uma construção mental ordenada (SILVA e SCHIRLO, 2014). O cognitivismo é um fragmento da psicologia que se ocupa em entender o desenvolvimento da compreensão, armazenamento e a utilização do conhecimento acerca da cognição (MOREIRA e MASINI, 2006).

Silva e Schirlo (2014), destacam que a estrutura cognitiva é o local onde se armazena o conhecimento absoluto e organiza todas as informações advinda da



aprendizagem do indivíduo. Compreende-se que a organização cognitiva do aluno é importante para o conhecimento de novos conteúdos científicos, pois, por meio desta interação formarão em conjunto uma nova relação que se associarão com uma parte do conhecimento específico, designada por Ausubel de **subsunçor** (SILVA e SCHIRLO, 2014).

Para Ausubel (1973), denomina-se **subsunçor** a estrutura específica em que uma nova informação é capaz de integrar ao cérebro humano, que por sua vez possui uma extrema organização de hierarquia conceitual, do qual acumula as experiências adquiridas anteriormente pelo indivíduo. Esclarecendo o conceito de subsunçor, em Física, por exemplo, se os alunos já apresentarem na sua estrutura cognitiva os conceitos de cinemática clássica, logo estes conceitos servirão de subsunçores para os conceitos relacionados a cinemática relativística (SILVA e SCHIRLO, 2014).

Mas se os subsunçores não estiverem existentes para facilitar a aprendizagem significativa, como é viável criá-los? Esta é uma indagação pertinente na teoria de Ausubel em relação princípio dos subsunçores. Nestes casos, onde existe pouco ou nenhum conhecimento prévio nos alunos, ocorre o que Ausubel intitula de Aprendizagem Mecânica (PELIZZARI e col., 2002). Ausubel, no entanto, recomenda o uso de organizadores prévios para acelerar o processo de desenvolvimento de subsunçores. Organizadores prévios, em gerais, são materiais iniciais expostos antes mesmo do material concreto ser aprendido. A utilização desses organizadores prévios é um método para intencionalmente manipular a estrutura cognitiva, com o intuito de viabilizar a aprendizagem significativa, ou seja, servirá de apoio para uma nova aprendizagem e levará ao progresso de conceitos de subsunçores que possibilitará a aprendizagem posterior (MOREIRA, 1979).

Seguindo esta linha de raciocínio, Ausubel aponta três tipos distintos de aprendizagem significativa: a **representacional**, de **conceitos** e **proposicional**. A aprendizagem representacional é a aprendizagem significativa mais simples, da qual as demais dependem. Nesta os símbolos passam a ter significados para os sujeitos, referente aquilo que de fato significa (MOREIRA, 1995).

A aprendizagem de conceitos, eventualmente é semelhante a representacional, nesta os conceitos são representados por símbolos específicos, mas, são comuns ou

genéricos, representam abstrações dos atributos essenciais dos referentes (MOREIRA, 1995).

A aprendizagem proposicional é oposta a representacional, pois esta tem a função de compreender o significado de ideias em forma de proposição, ou seja, aprender o sentido das palavras pronunciadas verbalmente através dos conceitos de uma proposta, não apenas de aprender o significado das palavras isoladamente (MOREIRA, 1995).

Diante do que foi exposto inicialmente, a Teoria de Ausubel enfatiza a aprendizagem cognitiva ou, de modo específico a aprendizagem significativa. Nela um novo conhecimento se associa de forma não tendenciosa a estrutura cognitiva do indivíduo (Ausubel, 1973). Dessa forma, é interessante que os professores disponham do conhecimento desta teoria para o desenvolvimento de ensino-aprendizagem que se dispõe a desenvolver em sala de aula (SILVA e SCHIRLO, 2014).

## **2.2 Alguns trabalhos sobre o ensino da relatividade especial no ensino**

### **médio.**

A busca por uma metodologia adequada do tema TRR no ensino médio não é algo novo. Na verdade, diversas pesquisas já foram realizadas na área a fim de propor alternativas da inserção desse conteúdo no ensino médio, tendo em vista as orientações do PCN e a importância do tema na formação de cidadãos com capacidade de compreender e formar opinião sobre temas relacionados à TRR. No trabalho de Capelari (2016), por exemplo, a inserção foi realizada em duas turmas do 2º e 3º ano de uma escola privada do Paraná. O conteúdo foi abordado em seis aulas com duração de 30 min cada. A metodologia usada foi da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Um fato a salientar é que Capelari usou metodologias distintas para verificar se haveria alguma diferenciação na compreensão do conteúdo por parte dos alunos. Em uma das turmas, as aulas foram ministradas de forma tradicional, ou seja, sem nenhum recurso diferenciado. Na outra turma foi utilizado as Tecnologias de Comunicação e Informação (vídeos, simuladores e planilhas). O resultado deste trabalho mostrou que a turma com aulas tradicionais teve um rendimento inferior em relação a turma na qual foram utilizados os recursos tecnológicos. Ou seja, podemos

supor que o ensino da TRR a alunos do ensino médio não só é possível como o uso de tecnologias possibilita melhores resultados quando comparados a métodos tradicionais.

Júnior (2018) também fez uso de recursos tecnológicos como vídeos e aplicativos em sua proposta de ensino de TRR a alunos do primeiro ano do ensino médio. Todavia, como recurso pedagógico, utilizou uma metodologia de ensino ativa denominada “Instrução pelos Colegas” (IpC). Aplicou seu produto educacional em uma escola pública de Jequié na Bahia num período de oito aulas de 50 min de duração. Os resultados, segundo o autor, foram gratificantes e mostraram que o uso de tecnologias associado ao IpC possibilitou não só a aprendizagem da TRR mais também a experiência nos alunos de uma nova forma de aprender.

Como contraponto a metodologias que fazem uso de tecnologias de informação, Júnior (2016), em seu produto educacional fez uma abordagem histórica e conceitual para inserir a TRR no ensino médio. Além disso, usou a Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel em conjunto com a Teoria dos Mapas Conceituais de Joseph Novak como referência na transposição didática. O local de aplicação foi em uma escola Estadual Profissional de Juazeiro no estado da Bahia, com alunos de três cursos técnicos: Edificações, Agente Comunitário de Saúde e Enfermagem. Embora o número de aulas tenha sido maior (12 horas-aula em cada turma), que os demais já mencionados, o autor ressalta que talvez sejam necessárias mais horas para reforçar as aulas sobre mapas conceituais, pois durante a aplicação do produto alguns alunos demonstram dificuldades na elaboração dos mapas conceituais.

Vemos que embora esses trabalhos se diferenciem no que se refere aos recursos didáticos, teóricos da educação ou séries escolhidas para a inserção, eles conseguiram obter êxito em sua proposta e mais que isso, conseguiram inovar em uma área tão carente de inovação.

### **2.3 Sequência didática**

A sequência didática, segundo Zabala (1998) nada mais é do que um conjunto de práticas associadas e organizadas com propósito de atingir determinados resultados educacionais pré-estabelecidos através de um planejamento.

Devido a aparente similaridade, por vezes a sequência didática é confundido com o plano de aula, portanto, é relevante atentar para a diferença entre os dois. O

plano de aula trata das atividades relacionadas a uma única aula, enquanto que a sequência didática está relacionada a todas as atividades de uma unidade temática que pode ser trabalhado em mais de uma aula (LIMA, 2018).

É interessante notar algumas práticas adotadas no processo de ensino. Segundo Bini e col., (1977), uma sequência didática de um modelo tradicional de aula tem como base as quatro etapas abaixo:

1. Exposição do conteúdo;
2. Aquisição individual do assunto através do livro didático;
3. Revisão da matéria através de atividades repetitivas sem qualquer ajuda externa que possibilite o debate;
4. Atribuição de nota por parte do professor ou professora.

Para um método não-tradicional como no caso do método de “estudo do meio”, Zabala (1998, p. 55) ressalta alguns pontos característicos:

- a) *atividade motivadora relacionada com uma situação conflitante da realidade experiencial dos alunos;*
- b) *explicação das perguntas ou problemas;*
- c) *respostas intuitivas ou hipóteses;*
- d) *seleção e esboço das fontes de informação e planejamento da investigação;*
- e) *coleta, seleção e classificação dos dados;*
- f) *generalização das conclusões tiradas;*
- g) *expressão e comunicação.*

Note que o segundo método é bem mais complexo. Devido a essa complexidade talvez venhamos a indagar se não seria esse método melhor em termos de resultados em comparação ao primeiro. No entanto, segundo Zabala (1998) o que deveríamos nos questionar é se tal sequência didática é mais apropriada ou menos apropriada, pois cada uma delas têm uma concepção satisfatoriamente assertiva, portanto, ambas podem ter alguma aplicação de acordo com as carências educacionais dos alunos.

De uma maneira geral, ao pensar em fazer uma sequência didática, ou até mesmo para analisar uma sequência didática, Zabala (1998, p. 63) afirma que

devemos questioná-las observando tais perguntas. Na sequência didática existem atividades:

- a) *Que nos permitam determinar os conhecimentos prévios que cada aluno tem em relação aos novos conteúdos de aprendizagem?*
- b) *Cujos conteúdos são propostos de forma que sejam significativos e funcionais para os alunos?*
- c) *Que possamos inferir que são adequadas ao nível de desenvolvimento de cada aluno?*
- d) *Que representem um desafio alcançável para o aluno, quer dizer, que levam em conta suas competências atuais e as façam avançar com a ajuda necessária; portanto, que permitam criar zonas de desenvolvimento proximal e intervir?*
- e) *Que evoquem um conflito cognitivo e promovam a atividade mental do aluno, necessária para que estabeleça relações entre os novos conteúdos e os conhecimentos prévios?*
- f) *Que promovam uma atitude favorável, ou seja, que sejam motivadoras em relação à aprendizagem dos novos conteúdos?*
- g) *Que estimulem a autoestima e o autoconceito em relação às aprendizagens que se propõem, isto é, que o aluno possa sentir que em certo grau aprendeu, que seu esforço valeu a pena?*
- h) *Que ajudem o aluno a adquirir habilidades relacionadas com o aprender a aprender, que lhe permitam ser cada vez mais autônomo em suas aprendizagens?*

Esses procedimentos de sequência didática citados acima, são claramente essenciais no que se refere às investigações de ensino-aprendizagem, pois é justamente essa metodologia que proporciona uma mudança na prática docente, o que envolverá uma maior interação entre professor e aluno (CABRAL, 2017). Lima (2018), acredita que através dessa técnica, haja um desenvolvimento na adequação do ensino, e que as necessidades dos alunos sejam conhecidas, permitindo que o professor intervenha no momento ideal.

Por fim, é de suma relevância que ao se elaborar uma sequência didática para qualquer conteúdo determinado, o professor tenha um real conhecimento dele para

que este seja capaz de desempenhar esses procedimentos com critérios bem estabelecidos de modo que a finalidade desta metodologia seja concluída com êxito (LIMA, 2018). Desta maneira, as diferentes etapas da sequência didática devem se harmonizar e se constituir solidariamente entre si para que o estudante tenha de fato a sensação de algo coesivo que está aprendendo e perceba o progredir da sua aprendizagem (GONÇALVES e FERRAZ, 2016).

## **2.4 Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) no ensino de física**

Sabemos que as transformações ocorridas no mundo nas últimas décadas foram impulsionadas fortemente pelas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC). Os setores da economia que conseguiram inserir com eficácia as TICs nas suas atividades conseguiram aprimorar seus processos, possibilitando assim uma melhor tomada de decisão.

Mas afinal o que são as TICs? Para Almeida (2019): *“A expressão remete a todo e qualquer tipo de tecnologia que trate informação e auxilie na comunicação, podendo ser na forma de hardware, software, rede ou telemóveis em geral”*.

Segundo Mendes (2008), as Tecnologias da Informação e Comunicação podem ser definidas como a associação de vários recursos tecnológicos que possibilitam a automação e a comunicação entre os diferentes métodos presentes nos negócios, na pesquisa científica e no ensino.

Nas escolas vemos o uso das TICs nas secretarias, auxiliando na organização de boletins e nas informações dos alunos. Na sala de aula, ocasionalmente professores utilizam o Data Show. No entanto, para incorporar a TIC na sala de aula é fundamental o uso de estratégias que possibilitem o melhor aproveitamento dos recursos tecnológicos, pois conforme Silva (2010, p.4) *“é necessário saber o que usar, como utilizar e saber para que está usando”*.

O uso da TIC em sala de aula, se bem aplicado, pode proporcionar uma forma de aprendizagem mais próxima da realidade cotidiana do aluno que, hoje em dia, faz uso de diversos tipos de dispositivos eletrônicos conectados ou não a internet. Afinal, quem nunca viu crianças que se quer sabem ler, brincando no celular ou tablets, acessando jogos e resolvendo desafios? É uma realidade cada vez mais comum e mostra o potencial educacional inserido nessas tecnologias. Contudo, seria imprudente dizer que somente com o uso das TICs em sala de aula resolveremos os problemas educacionais pois “[...] se ensinar dependesse só de tecnologias, já

teríamos achado as melhores soluções há muito tempo. Elas são importantes, mas não resolvem as questões de fundo” (MORAN e col., 2007, p. 12).

Dessa forma, a utilização das TICs não associada a um propósito educacional se torna uma ferramenta desnecessária. Para Brasil (2008):

“Embora se considere importante o uso de uma tecnologia, vale lembrar que esse uso se torna desprovido de sentido se não estiver aliado a uma perspectiva educacional comprometida com o desenvolvimento humano, com a formação de cidadãos, com a gestão democrática, com o respeito à profissão do professor e com a qualidade social da educação” (BRASIL, 2008).

Contudo, o uso das TICs pode ser um instrumento valioso se estiver relacionado a um objetivo educacional bem definido, possibilitando ao professor expor situações com mais clareza e mais rapidez, tornando a aula mais compreensível e dinâmica. Segundo Lara e col., (2013), o aspecto mais citado por seus alunos após a aplicação de seu projeto intitulado “Ensino de Física mediado por Tecnologias de Informação e Comunicação: Um Relato de Experiência” não foi o recurso didático em si, mas o ambiente de dúvidas e discussões que esses recursos proporcionaram. Ou seja, a utilização das TICs em sala de aula com objetivos determinados e bem planejada pelos professores é uma estratégia eficiente que favorece o desenvolvimento de ensino-aprendizagem.

### 3 TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Em 27 de Abril de 1900, Lord Kelvin, em uma conferência, proferiu que existiam apenas dois problemas a serem resolvidos na Física Clássica. Tais problemas estavam relacionados a não detecção do “vento do éter” e ao problema da partição da energia. No entanto, a fim de revolver esses dois problemas, cientistas acabaram desenvolvendo um conjunto de teorias que compõem o que chamamos hoje de Física Moderna (CARUSO & OGURI, 2006). A teoria da relatividade, constituída pela relatividade restrita/especial e pela relatividade geral, junto com a Mecânica Quântica formam a base da Física Moderna. A teoria da relatividade restrita (TRR), assunto a ser tratado nesse capítulo, será iniciado com alguns trabalhos de Galileu Galilei tendo em vista suas importantes contribuições para a compreensão do movimento dos corpos.

#### 3.1 As transformações de Galileu Galilei

Suponha dois referenciais inerciais  $S$  e  $S'$ , onde  $S'$  se move com velocidade  $\vec{v}$  em relação a  $S$  ao longo do eixo  $x - x'$ . Por definição um referencial é dito inercial quando é válido nele a lei da inércia, isto é, um corpo livre de forças agindo sobre ele permanece em repouso ou em movimento retilíneo uniforme.

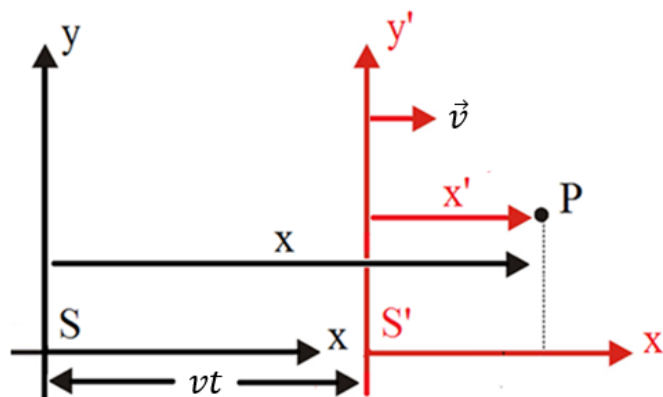


Figura 1 - Transformações de Coordenadas de Galileu. Fonte: Autoria Própria

Admitindo que quando  $t = 0$  as duas origens dos sistemas coincidam, então, após um certo tempo  $t$ , a distância entre  $S$  e  $S'$  é igual a  $vt$ . A posição de um ponto  $P$



pode ser descrita usando as coordenadas de  $S$  ( $x, y, z$ ) ou  $S'$  ( $x', y', z'$ ), através das seguintes relações:

$$\begin{cases} x = x' + vt \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (3.1)$$

conhecidas também como **transformações Galileanas** para coordenadas.

Derivando com relação ao tempo as coordenadas, obtemos

$$\begin{cases} v_x = v'_x + v \\ v_y = v'_y \\ v_z = v'_z \end{cases} \quad (3.2)$$

que é a transformação Galileana para velocidades (NUSSENZVEIG, 1998).

Derivando, novamente, com relação ao tempo a expressão (3.2) detemos

$$\vec{a} = \vec{a}'. \quad (3.3)$$

Ou seja, a segunda lei de Newton no referencial  $S'$  assume a forma

$$F' = m'a'. \quad (3.4)$$

Note que a segunda Lei de Newton é covariante por transformações de Galileu. É por isso que o princípio da relatividade de Galileu diz que *as leis da mecânica têm a mesma forma em referenciais inerciais*, ou seja, é impossível identificar um movimento retilíneo uniforme de um referencial inercial em relação a outro exclusivamente através das leis da mecânica (NUSSENZVEIG, 2002).

### 3.2 As transformações de Galileu e a velocidade da luz

Em meados do século XIX, James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstra que a luz são ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo com uma velocidade  $c = 1/(\sqrt{\epsilon_0\mu_0})$ , onde  $\epsilon_0$  é a constante dielétrica do vácuo e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo (NUSSENZVEIG, 1998).

No entanto, a descoberta de Maxwell trouxe consigo uma dúvida que será exemplificado com a seguinte questão: suponha um foguete (referencial  $S'$ ) se

movendo em relação a Terra (referencial S) com velocidade  $v = 1000 \text{ m/s}$ . Em um certo instante esse foguete emite um feixe luz com velocidade  $c$  em relação ao foguete, conforme ilustrado na figura 2, isto é,  $v'_x = c$ .

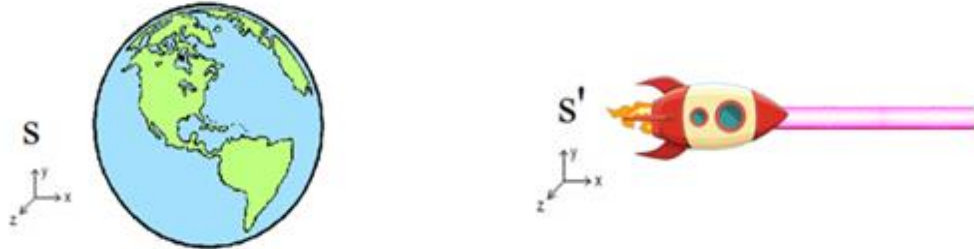


Figura 2 - Um feixe de luz (L) é emitido pela espaçonave com velocidade  $c$ . Fonte: Próprio autor.

Observe que se aplicarmos as transformações de Galileu para obter a velocidade, Eq. (3.2), o feixe de luz em relação a Terra viajará com uma velocidade  $v_x$  dada por

$$v_x = c + 1000 \text{ m/s}. \quad (3.5)$$

A velocidade da luz em relação a Terra ( $v_x$ ) será diferente da prevista por Maxwell ( $c$ ), logo, de acordo com o referencial adotado obtém-se diferentes resultados para a velocidade da luz. Deveria então existir um referencial inercial privilegiado no qual a velocidade da luz é isotrópica<sup>1</sup> (NUSSENZVEIG, 1998).

Havia no passado a crença na existência de um meio não material que preenchia todo o universo, esse meio, chamado de **éter**, seria o suporte pelo qual as ondas eletromagnéticas se propagariam no vácuo e, portanto, a velocidade da luz ( $c$ ) obtida por Maxwell seria referente ao éter assim como o som se propaga no ar (DAMASIO e PEDUZZI, 2017). A comprovação da existência do éter foi objeto de trabalho de vários físicos experimentais. Caso o éter existisse, deveria então ser possível detectar o movimento absoluto da Terra em relação a este meio (CARUSO e OGURI, 2006).

---

<sup>1</sup> A mesma em todas as direções.

### 3.3 O experimento de Michelson e Morley

Os físicos experimentais Albert Michelson (1852 - 1931) e Edward Morley (1838-1923) realizaram no final do século XIX diversos experimentos para observar, segundo as leis da cinemática clássica, a diferença de tempo que um raio de luz demoraria para percorrer uma determinada distância perpendicular ao movimento da Terra em sua órbita em torno do Sol, em comparação com o tempo que a luz demoraria para percorrer a mesma distância em uma direção paralela ao movimento da Terra em torno do Sol (CARUSO & OGURI, 2006).

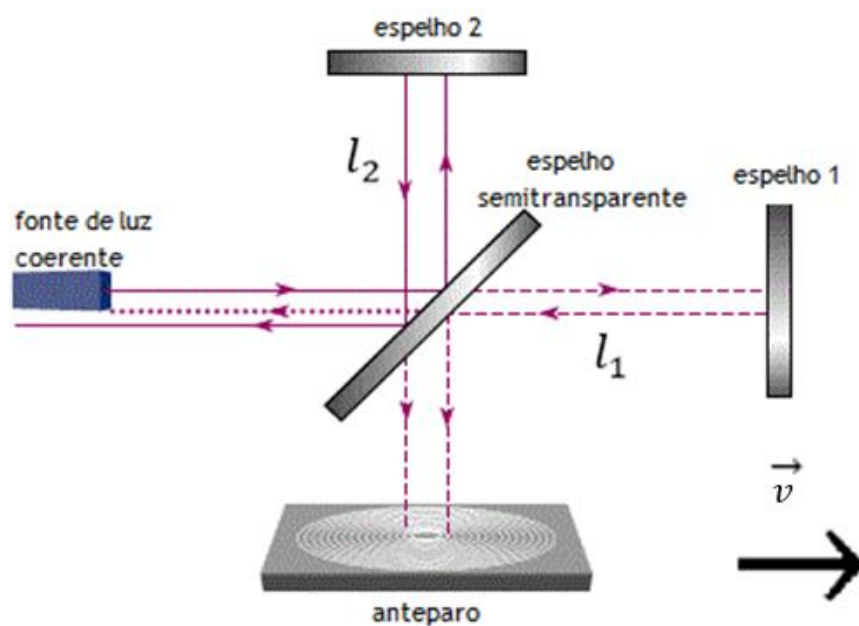


Figura 3 - Esquema do experimento de Michelson e Morley. Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interferometrodemichelson.gif>

Supondo que  $t_1$  é o tempo que a luz demora no trajeto 1 (trajeto paralelo ao movimento orbital da Terra),  $l_1$  é o braço do comprimento do interferômetro e  $v$  é a velocidade da Terra e relação ao éter

$$t_1 = \frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v}$$

ou

$$t_1 = \frac{2l_1}{c} (1 - \beta^2)^{-1}, \quad (3.6)$$

onde  $\beta = v/c$ . Como  $\beta^2 \ll 1$ , podemos usar a aproximação de 1ª ordem do Binômio de Newton na Eq. (3.6). Da aproximação temos que  $(1 + x)^n \approx (1 + nx)$ , se  $|x| \ll 1$ . No nosso caso  $x = -\beta^2$ , assim aproximamos (3.6) por

$$t_1 \cong \frac{2l_1}{c}(1 + \beta^2).$$

Devido ao movimento da Terra, o tempo que a luz demora para percorrer o trajeto 2, é dado por

$$\left(\frac{ct_2}{2}\right)^2 = \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2 + (l_2)^2,$$

ou

$$t_2 = \frac{2l_2}{c} \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (3.7)$$

Usando novamente a aproximação binomial de Newton, reescrevemos (3.7) por

$$t_2 \cong \frac{2l_2}{c} \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right). \quad (3.8)$$

Assim, a diferença de caminho entre os raios 1 e 2 é dado, por

$$\delta = c\Delta t = c(t_1 - t_2)$$

ou

$$\delta = 2(l_1 - l_2) + \beta^2(2l_1 - l_2). \quad (3.9)$$

Ao girar 90° o equipamento e realizar os cálculos para essa nova configuração, temos que o tempo gasto para os raios 1 e 2 chegarem no anteparo serão dadas por

$$t'_1 \cong \frac{2l_1}{c} \left(1 + \frac{1}{2}\beta^2\right), \quad (3.10)$$

e

$$t'_2 \cong \frac{2l_2}{c} (1 + \beta^2). \quad (3.11)$$

A nova diferença de caminho entre os braços 1 e 2 do interferômetro será dada por

$$\delta' = c\Delta t' = c(t'_1 - t'_2),$$

ou

$$\delta' = 2(l_1 - l_2) + \beta^2(l_1 - 2l_2). \quad (3.12)$$

Com a rotação do equipamento e usando os dados dos experimentos realizados, em 1881,  $l_1 \approx l_2 \approx 1,2 \text{ m}$ ,  $\lambda = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$  (luz amarela) e  $\beta^2 \approx 10^{-8}$ , o deslocamento das franjas de interferência deveria ser

$$\delta_m = \frac{\delta - \delta'}{\lambda} = \frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^2,$$

ou

$$\delta_m = 0,04. \quad (3.13)$$

Contudo, o deslocamento obtido nos experimentos realizados foi de apenas 0,02 franjas. Em 1887, o experimento foi realizado novamente usando  $l_1 \approx l_2 \approx 11 \text{ m}$ . O resultado esperado era um deslocamento de aproximadamente 0,4 franjas. No entanto, o resultado obtido novamente foi diferente do esperado (0,01 franjas) (NUSSENZVEIG, 1998).

Com isso, o resultado do experimento de Michelson e Morley, que fazia uso das transformações de Galileu e que tinha por objetivo observar o movimento relativo da Terra em relação ao éter, foi negativo (CARUSO e OGURI, 2006).

É importante ressaltar que tanto antes quanto depois dos experimentos de Michelson e Morley vários experimentos foram realizados por diferentes cientistas utilizando distintos princípios, todavia, nenhum deles obteve resultados que confirmassem o movimento relativo da Terra em relação ao éter (MARTINS, 2005).

### 3.4 Os postulados da Teoria da Relatividade Especial

Em 1905, Einstein publica um artigo denominado “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento”, onde propõe algumas ideias sobre as inconsistências entre o eletromagnetismo e as transformações de Galileu (NUSSENZVEIG, 2002). Sua teoria, posteriormente intitulada como a teoria da relatividade especial tem como base dois postulados:

- Princípio da relatividade restrita - As leis da Física são as mesmas em qualquer referencial inercial;
- Princípio da invariância da velocidade da luz - A velocidade da luz no vácuo não depende da velocidade da fonte e deve ser sempre a mesma em qualquer referencial inercial.

Para Galileu, as leis da mecânica eram as mesmas em todos os referenciais inerciais (NUSSENZVEIG, 2002). Einstein, no entanto, diz em seu primeiro postulado que não só as leis da mecânica, mas sim as leis da Física são as mesmas para todos os referenciais inerciais (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009). Conhecido como o princípio da relatividade, esse postulado supõe que caso houvesse alguma lei Física diferente, esta poderia ser usada para diferenciar um referencial inercial do outro (YOUNG & FREEDMAN, 2016). No segundo postulado Einstein reafirma as equações de Maxwell como leis Físicas e, portanto, válida em todos os referenciais inerciais. Como consequência disso, a velocidade da luz deveria ser  $c$  em todos os referenciais inerciais, independente do seu estado de movimento (NUSSENZVEIG, 2002; YOUNG & FREEDMAN, 2016).

Note que, Einstein não aborda a necessidade da existência do éter para a propagação da luz no vácuo. Diferentemente de Lorentz e Poincaré, que não viam nenhum problema em aceitar a existência do éter, a visão empirista de Einstein à época o fazia acreditar que a física só deveria tratar de grandezas observáveis e mensuráveis (MARTINS, 2005).

Todavia, em 1920, após a criação da relatividade geral, a convite de Ehrenfest em uma conferência sobre o éter e a relatividade na universidade de Leyden na Holanda, Einstein faz o seguinte comentário a respeito do éter:

“Recapitulando, podemos dizer que de acordo com a teoria geral da relatividade, o espaço é dotado de qualidades físicas; neste sentido, portanto, existe um éter. De acordo com a teoria da relatividade geral, espaço sem éter é impensável; pois em tal espaço não haveria propagação de luz, nem possibilidade de padrões de espaço e tempo (réguas e relógios), nem portanto intervalos de espaço-tempo no sentido físico. Mas esse éter não pode ser pensado como dotado da qualidade dos meios ponderáveis, que consistem em partes que podem ser seguidas ao longo do tempo. A ideia de movimento não pode ser aplicada a ele” (Einstein, 1920,p. 32. Aput, Martins, 2005).

### 3.5 O conceito de Simultaneidade segundo Einstein

Para compreender esse conceito vamos supor uma experiência de pensamento. Suponha que um comandante de uma estação espacial aguarda a passagem de uma nave que viaja com  $3/5$  da velocidade da luz (figura 4).

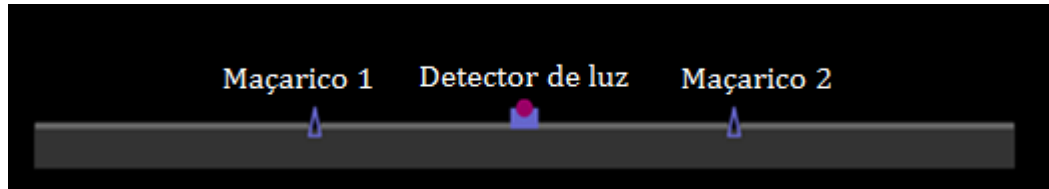


Figura 4 - Estação Espacial - Fonte: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/simultaneidade.swf>

Nessa estação espacial existe um detector de luz que está no ponto médio de dois maçaricos que foram programados para acender ao mesmo tempo. No momento em que o gravador de dados de voo da nave espacial passa pelo detector de luz da estação espacial, os maçaricos acendem simultaneamente (Figura 5).

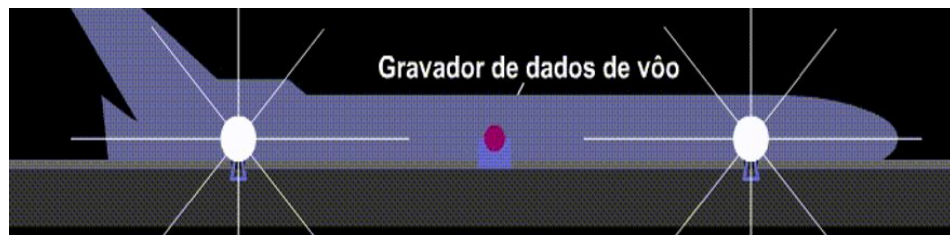


Figura 5 - Passagem da nave pela estação espacial.  
Fonte: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/simultaneidade.swf>

No entanto, devido a nave se movimentar no sentido do maçarico 2, o gravador de dados de voo detecta primeiro o clarão emitido pelo maçarico 2 (figura 6).

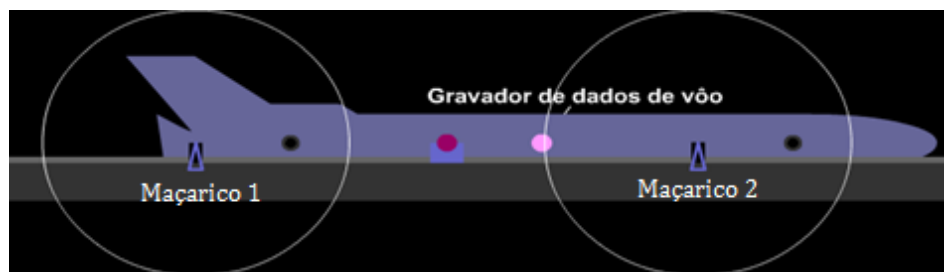


Figura 6 - Registro do clarão emitido pelo maçarico 2.  
Fonte: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/simultaneidade.swf>

Observe que na estação espacial, o detector de luz registra simultaneamente os clarões emitidos pelos maçaricos (figura 7).

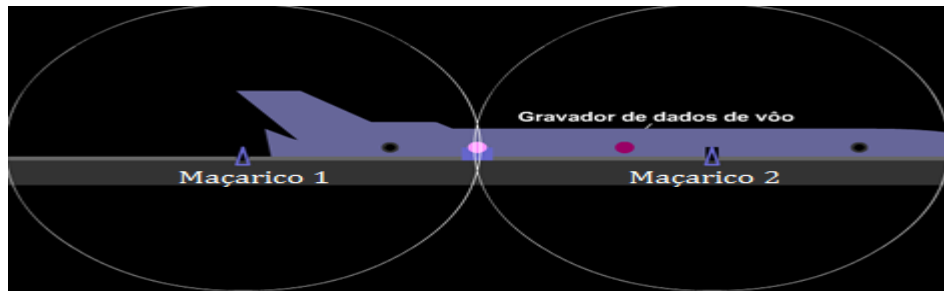


Figura 7 - Registro dos clarões pelo detector de luz da estação.  
Fonte: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/simultaneidade.swf>

Posteriormente, o gravador de dados de voo recebe o clarão emitido pelo maçarico 1 (figura 8).



Figura 8 - Registro do clarão emitido pelo maçarico 1.  
Fonte: <https://www.ifi.unicamp.br/~fauth/simultaneidade.swf>

Com isso, os pesquisadores na nave deverão concluir que o maçarico 2 foi acionado primeiro. Para o comandante da estação espacial, os dois maçaricos foram acionados simultaneamente, tendo em vista que os clarões emitidos pelos dois maçaricos foram detectados no mesmo instante. Einstein chegou à conclusão que simultaneidade não é um conceito absoluto, ou seja, eventos simultâneos em um referencial não necessariamente serão simultâneos em outro referencial (YOUNG & FREEDMAN, 2016).

### 3.6 Dilatação do tempo

Para entender a relatividade nos intervalos de tempo, vamos supor a seguinte experiência de pensamento. Imagine um “trem”, cujo o vagão tem 9 metros de altura e que se move com velocidade  $v \ll c$ . No chão do trem existe um dispositivo que emite um fóton em direção ao teto e que, ao atingir um espelho no teto, reflete e retorna até o dispositivo.



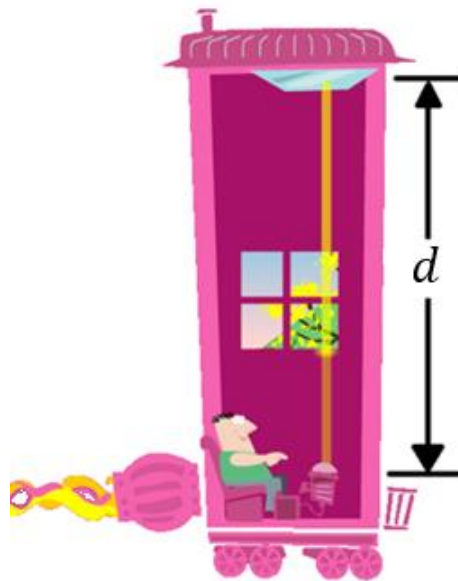


Figura 9 - João a bordo do trem mede o intervalo de tempo  $\Delta t_0$ .  
 Fonte: <http://novaescola.org.br/arquivo/animacoes/trem-einstein.html>

João, a bordo do trem (referencial  $S'$ ), verifica que o tempo que a luz demorou para sair e retornar ao dispositivo, que é dado por

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c}, \quad (3.14)$$

onde  $d$  é a altura do vagão.

Para Pedro, ao visualizar essa experiência do lado de fora do trem (referencial  $S$ ), verifica que a luz faz uma trajetória que se parece com os lados de um triângulo retângulo, conforme está esquematizado na figura 10.

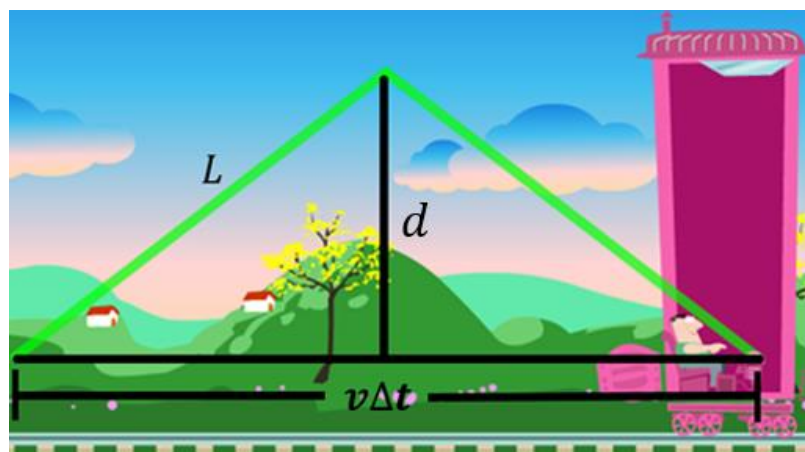


Figura 10 - Pedro mede o intervalo de tempo  $\Delta t$ .  
 Fonte: <http://novaescola.org.br/arquivo/animacoes/trem-einstein.html>

Assim, o tempo que o pulso de luz demora para realizar essa trajetória (referencial S) é dada por

$$\Delta t = \frac{2L}{c}. \quad (3.15)$$

Usando o teorema de Pitágoras, temos que

$$L = \sqrt{d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2}, \quad (3.16)$$

logo, a Eq. (3.15) ficará reescrita na forma

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{d^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2}. \quad (3.17)$$

Explicitando  $d$  na Eq. (3.14)

$$d = \frac{c\Delta t_0}{2},$$

e substituindo em (3.17), ficamos com

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{\left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2},$$

ou

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (3.18)$$

Como  $v < c$ , então da Eq. (3.18) temos  $\Delta t > \Delta t_0$ . Isso significa que para Pedro (referencial S), a variação de tempo que o pulso leva para ir e voltar até o dispositivo é maior do que a variação de tempo obtida por João que está dentro do trem (referencial S'). Esse fenômeno é chamado de **dilatação do tempo** (YOUNG & FREEDMAN, 2016).

A expressão (3.18) muitas vezes é escrita da seguinte forma:

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0, \quad (3.19)$$

onde  $\Delta t_0$  é a variação de tempo medido por um observador em repouso em relação a eventos que ocorrem no mesmo lugar e é denominado de intervalo de tempo próprio (YOUNG & FREEDMAN, 2016), e o símbolo  $\gamma$  é chamado de **fator de Lorentz**, definido por

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (3.20)$$

onde  $\beta = v/c$ .

Observe que só é possível ter um valor real para  $\gamma$  se  $v < c$ , logo, pela TRR a velocidade com que um objeto se move tem um valor limite. Além disso, esse fenômeno (dilatação do tempo) só é perceptível para  $v > 0,1c$ , onde  $\gamma$  é significativamente maior que 1. Para velocidades do nosso cotidiano essa dilatação do tempo é imperceptível e a noção Newtoniana de tempo ( $\Delta t = \Delta t_0$ ) é válida (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

### 3.7 Os Múons

No final do século XIX foram realizados vários experimentos para verificar se na ausência de radiação o gás era um sistema não condutor. Embora o gás estivesse isolado de fontes de radiação, este sempre apresentava residuais de ionização inexplicáveis pela teoria (FAUTH, e col., 2007). Em 1910, Theodor Wulf, utilizando um eletroscópio, verificou que no alto da torre Eiffel (300 metros de altura) a radiação era mais intensa. Entre 1911 e 1913, Victor Hess, munido de detectores, realizou voos a quilômetros de altura. Em um desses voos, verificou que a radiação era 16 vezes maior que a do solo da Terra. Além disso, observou que a radiação não era proveniente do Sol, tendo em vista que embora um de seus voos tenha sido realizado num eclipse solar, ainda sim detectou radiação sem mudanças. Concluiu então que a radiação era descendente e em 1936 Victor Hess ganhou um prêmio Nobel pela descoberta dos **raios cósmicos** (ANJOS e SHELLARD, 2004). Os raios cósmicos são então essas estranhas partículas que chegam de todos os lugares do universo e bombardeiam a Terra constantemente. Sua energia pode variar em até 100 bilhões

de vezes. Ou seja, se um micrograma de um raio cósmico energético atingisse a Terra, o impacto seria proporcional a de um asteroide com a massa do monte Everest viajando a 200.000 km/h (ANJOS e SHELLARD, 2004).

Pierre Auger descobriu em 1938, a partir de detectores no solo dos Alpes que, a interação dessa radiação cósmica de alta energia com os elementos da atmosfera terrestre permite o surgimento de partículas secundárias, que se deslocam com altas velocidades interagindo novamente ou decaindo, formando assim novas partículas. Pierre denominou esse fenômeno de “chuveiros aéreos extensos” (ANJOS e SHELLARD, 2004).

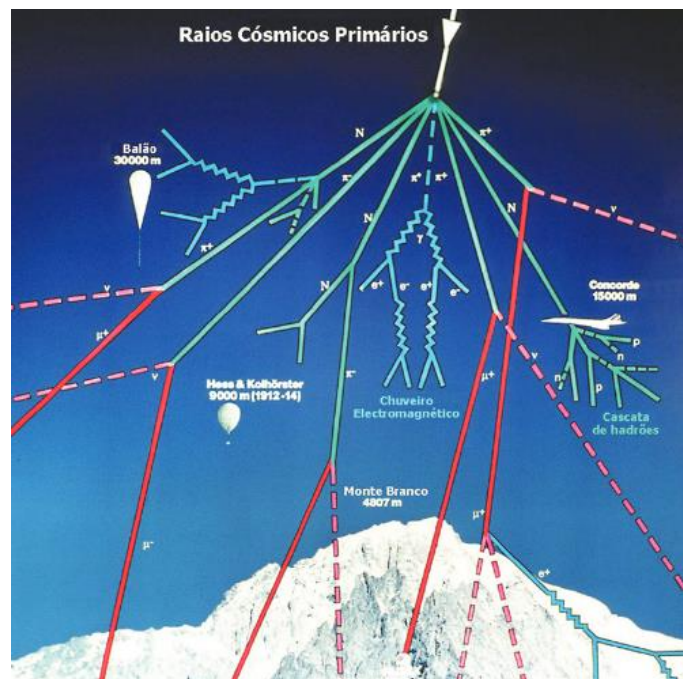


Figura 11 - Ilustração dos raios cósmicos atingindo a atmosfera da Terra. Fonte: [https://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic\\_Rays/Muons.htm](https://cosmic.lbl.gov/SKliewer/Cosmic_Rays/Muons.htm)

A partícula Múon, oriunda dessas interações, foi descoberta, em 1937, por Street e Stevenson, e configura ser uma partícula instável que decai em um elétron, um neutrino e um anti-neutrino (FAUTH, e col., 2011). Seu tempo médio de vida em laboratório é de aproximadamente  $\tau_{\mu} = 2,2 \mu\text{s}$  e seu surgimento ocorre a aproximadamente 15 km de altura (FAUTH, e col., 2007).

Os Múons são detectados na superfície da Terra com uma velocidade média de aproximadamente  $v = 0,9998c$ , isto é,  $v = 299.732.500 \text{ m/s}$ . Dado a distância em que são criados era de se esperar que seu tempo de vida fosse de aproximadamente

$$\tau = \frac{15000 \text{ m}}{299.732.500 \text{ m/s}} \approx 50,04 \mu\text{s}. \quad (3.21)$$

Contudo, vemos que para isso, seu tempo de vida deveria ser 22,75 vezes maior do que o tempo de vida médio do Múon medido em laboratório ( $\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$ ). Utilizando a equação de decaimento radioativo

$$N(t) = N_0 e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (3.22)$$

o número de Múons  $N(t)$  que chegariam na superfície da Terra no instante  $t$  será dado por

$$N = N_0 e^{\frac{-22,75\tau}{\tau}}$$

ou

$$\frac{N}{N_0} \approx \frac{132}{1.000.000.000.000}. \quad (3.23)$$

Ou seja, pela mecânica clássica, praticamente nenhum Múon chegaria à superfície da Terra.

No entanto, aplicando a relatividade especial vemos que o tempo médio de vida do Múon medido por referencial S na Terra será dilatado em relação ao tempo mensurado em um laboratório ( $\tau_\mu = 2,2 \mu\text{s}$ ). Portanto, usando a Eq. (3.18) obtemos

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{(0,9998c)^2}{c^2}}} \approx 50,00\tau. \quad (3.24)$$

Substituindo a Eq. (3.24) em (3.23), obtemos

$$N = N_0 e^{\frac{-22,75\tau}{\tau}}$$

ou

$$\frac{N}{N_0} = e^{\frac{-22,75\tau}{50,00\tau}} \approx 0,634. \quad (3.25)$$

Utilizando a relatividade especial, 63% dos Múons criados a 15 km de altura da superfície da Terra chegam ao solo, em concordância com os dados experimentais (FAUTH, e col., 2007, 2011).

### 3.8 O efeito da relatividade especial no funcionamento do GPS

O *Global Positioning System*, ou Sistema de Posicionamento Global, mas conhecido como GPS, tem a capacidade de determinar com grande precisão a posição de um objeto na superfície da Terra. Sua grande utilidade na área de navegação tornou seu uso indispensável na sociedade atual.

Seu funcionamento consiste na emissão de um sinal de rádio emitido pelo satélite que contém informações acerca da localização e do instante em que o sinal foi emitido. O receptor, de posse dessas informações, calcula a distância linear a partir da diferença entre o instante em que o sinal foi emitido e o instante em que o sinal foi recebido. Supondo uma diferença de tempo de 0,01 s, então

$$\Delta S = c\Delta t$$

ou

$$\Delta S = 3.000 \text{ km}, \quad (3.26)$$

uma distância de aproximadamente 3.000 km entre o satélite e o receptor (ZANOTTA, e col., 2011).

Contudo, a partir de apenas um satélite, não é possível ter a localização exata visto que o receptor pode estar em qualquer lugar do círculo sobre a superfície terrestre (Ver figura 12).

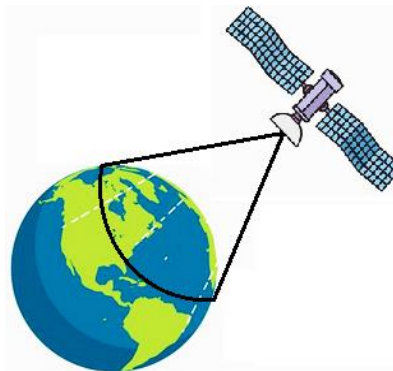


Figura 12 - Localização a partir de um satélite. Fonte: Autoria própria.

A partir de dois satélites, a intersecção entre os dois círculos sobre a superfície terrestre proporcionada pelos dois sinais possibilita dois pontos possíveis de localização (ver figura 13).

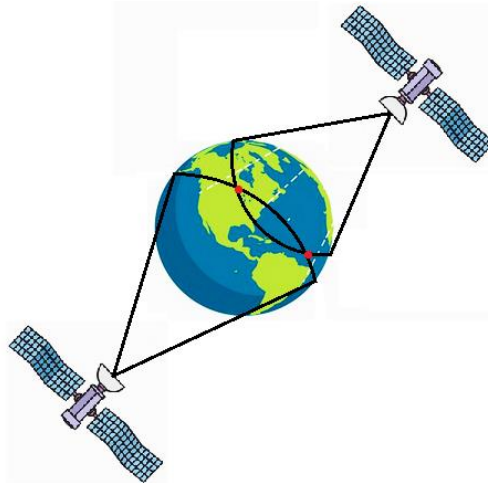


Figura 13 - Localização a partir de dois satélites. Fonte: Autoria própria.

Com três satélites a intersecção entre os três círculos sobre a superfície terrestre possibilita a localização do receptor na superfície da Terra (ver figura 14).

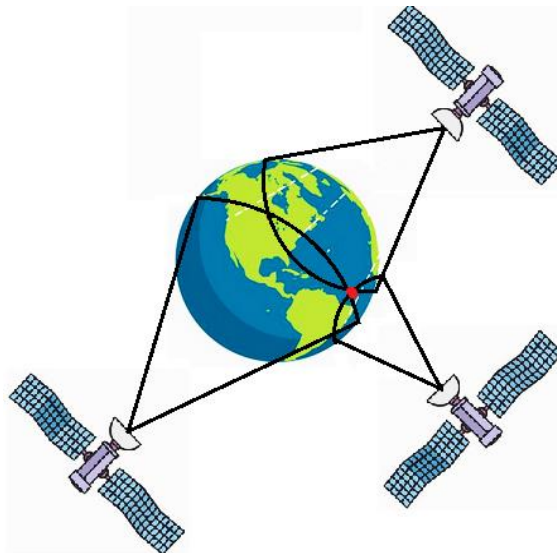


Figura 14 - Localização a partir de três satélites. Fonte: Autoria própria.

Note que para o cálculo da distância entre o satélite e o receptor é necessário obter a diferença de tempo que o sinal demorou para sair do satélite e chegar no

receptor. Portanto, é necessário que tanto o relógio do receptor quanto o relógio do satélite estejam sincronizados. Além disso, é necessário que a precisão seja da ordem da grandeza da velocidade da luz. Os satélites utilizam relógio atômico<sup>2</sup> o que possibilita, assim, a precisão necessária. No entanto, para os receptores isso não é viável. Por isso, para minimizar esse erro, é essencial o sinal de mais um satélite na localização do receptor. Dessa forma, para o funcionamento pleno do GPS, precisa-se que ao menos quatro satélites estejam ao alcance do receptor. O sistema de posicionamento global conta hoje com 24 satélites orbitando o planeta Terra a fim de que ao menos 4 satélites estejam ao alcance do receptor não importando a sua localização sobre a superfície da Terra (ZANOTTA e col., 2011).

Como os satélites estão a uma distância considerável da superfície da Terra e se movem em altas velocidades, tanto a teoria da relatividade geral quanto a teoria da relatividade restrita contribuirão para o preciso funcionamento do GPS. Pela teoria da relatividade geral, o tempo terá uma marcha mais devagar no referencial da Terra em comparação ao tempo no referencial do satélite. Já pela teoria da relatividade restrita, devido ao movimento orbital do satélite, o tempo terá uma marcha mais devagar para o referencial do satélite em relação a um referencial na Terra. Combinando esses dois efeitos, quando o satélite alcançar a órbita pré-estabelecida, o tempo em seu referencial terá uma marcha mais rápida em comparação ao tempo no referencial da Terra (CARARO e col., 2010). Para corrigir essa discrepância, é realizado uma redução na frequência dos relógios dos satélites ainda em solo (ZANOTTA e col., 2011).

No intuito de explicitar didaticamente o efeito que a relatividade especial causa no funcionamento do GPS, veremos o seguinte exemplo. Suponha um satélite orbitando a Terra a uma velocidade de  $v = 3874 \text{ m/s}$ . Após um período de 24 horas na Terra, isto é,  $\Delta t = 86400$  segundos, no satélite terá se passado

$$\Delta t_0 = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

---

<sup>2</sup> É um relógio que usa como padrão de referência a frequência de oscilação da energia de um átomo. Assim temos que a cada 9.192.631.770 oscilações do átomo de césio-133 o relógio entende que se passou um segundo (PIRES, 2019).



$$\Delta t_0 = 86.399,99999 \text{ s}. \quad (3.27)$$

Ao calcularmos a diferença de tempo transcorrido na Terra e no satélite, obtemos

$$\delta t = \Delta t - \Delta t_0 = 86400 \text{ s} - 86.399,99999 \text{ s} = 7,2 \mu\text{s}. \quad (3.28)$$

Considerando essa diferença de tempo, após 24 horas, um sinal emitido pelo satélite até um receptor na Terra terá um erro de aproximadamente igual a

$$d = c\delta t = (299.792.458 \text{ m/s})(0,0000072 \text{ s}) = 2158 \text{ m}. \quad (3.29)$$

Dessa forma, vemos que sem a correção prevista pela teoria da relatividade especial, o GPS apresentaria um erro considerável (GRIN, 2015), não desejável para o equipamento construído para medir com precisão a localização terrestre.

### 3.9 Paradoxo dos Gêmeos

A dilatação do tempo prevista na TRR deu origem ao seguinte paradoxo: suponha duas irmãs gêmeas, Raquel e Rute. Raquel é astronauta e certo dia é escolhida pela NASA para fazer uma viagem ao espaço. Nessa jornada, Raquel viajará por alguns anos a uma velocidade próxima da luz. Ao término dessa jornada, as duas irmãs gêmeas se encontrarão. Rute, após uns cálculos, verifica que depois da viagem estará muito mais velha do que Raquel.

No entanto, surge aí o seguinte paradoxo, como uma estará em movimento uniforme em relação a outra, logo, as duas podem chegar a mesma conclusão. Isto é, assim como Ruth pode dizer que Raquel estará mais nova ao término da viagem, Raquel poderá realizar os mesmos cálculos e dizer que é Rute que estará mais nova ao fim da jornada.

Entretanto, analisando com mais atenção o caso, é possível notar que existe uma diferença entre os sistemas de referência das duas irmãs. Para Raquel atingir essa velocidade, ela passou por uma aceleração em boa parte do tempo da viagem, além de ter dado o retorno em um certo ponto da viagem, o que produz consequentemente uma aceleração. Ou seja, seu sistema de referência não foi inercial em todo o percurso, mas somente em parte dele. Isto é, Rute está correta ao afirmar que está muito mais velha do que sua irmã após a viagem (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

### 3.10 Qual delas é a avó?



Figura 15 - Qual delas é a avó?. Fonte: <https://www.vix.com/pt/bdm/comportamento/6-licoes-que-uma-mae-deveria-ensinar-para-sua-filha>

Embora a resposta pareça óbvia, se atentarmos para a TRR veremos que para saber qual delas é a avó precisaremos saber se alguma delas viajou por um determinado tempo com velocidade relativística.

Para exemplificar essa situação, imagine que a jovem da figura acima, quando tinha 20 anos teve uma filha e logo em seguida viajou pelo espaço a 99,5% da velocidade da luz por um período de 100 anos medido pelo referencial da Terra. Devido a dilatação do tempo, para a jovem terá se passado

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ou

$$\Delta t_0 = 100 \sqrt{1 - \frac{(0,995c)^2}{c^2}} \approx 10 \text{ anos.} \quad (3.30)$$

Logo, quando retornasse à Terra, ela estaria com 30 anos. Por outro lado, sua filha estaria com 100 anos, e supondo que aos 20 anos tivesse dado à luz a uma criança, após esse período de 100 anos, ela estaria com 80 anos. Portanto, vemos que se levarmos em conta os efeitos da relatividade especial, não podemos afirmar

que a senhora da figura é a avó sem antes conhecermos seu histórico (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

### 3.11 Contração do comprimento

Vamos realizar um outro experimento de pensamento para entender como o comprimento de um objeto pode estar correlacionado ao referencial que está sendo usado para medir o objeto.

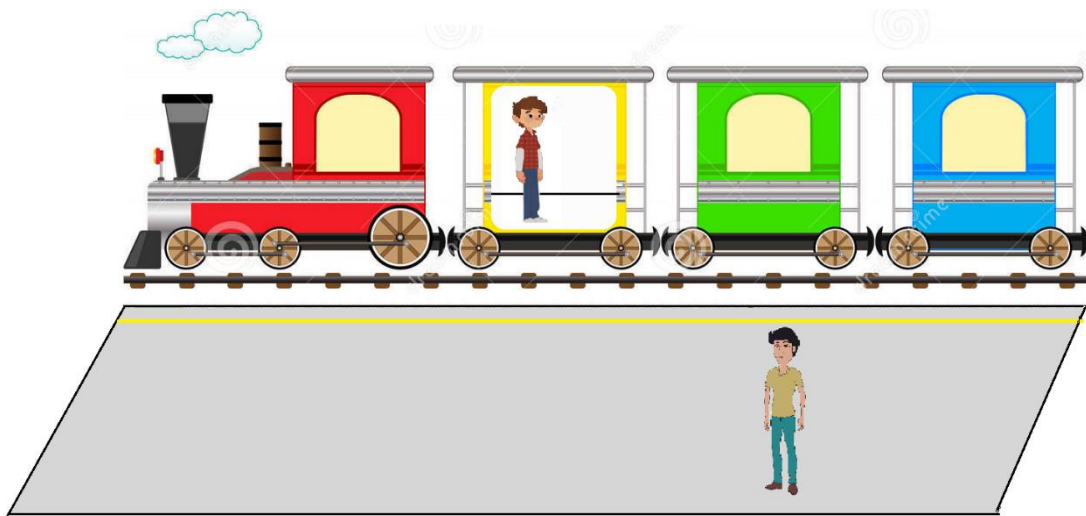


Figura 16 - João e Pedro e o comprimento da plataforma da estação de trem. Fonte: Autoria própria.

Suponha que João e Pedro desejam medir o comprimento de uma plataforma de uma estação de trem. João está dentro de um trem (referencial  $S'$ ) e utilizando um cronômetro registra o tempo que demorou para passar pelo início e pelo fim da plataforma. Ciente da velocidade do trem, João obtém o comprimento da plataforma através da seguinte equação

$$L = v\Delta t_0. \quad (3.31)$$

Note que João utiliza a expressão de intervalo de tempo próprio ( $\Delta t_0$ ) visto que para ele, os eventos “passar pelo início da plataforma” e “passar pelo final da plataforma” ocorrem no mesmo lugar. Pedro, que está na plataforma (referencial  $S$ ), pode obter o comprimento dela utilizando uma trena, por exemplo. Para ele, a plataforma terá um comprimento próprio tendo em vista que ele está parado em relação a plataforma, assim obtém

$$L_0 = v\Delta t. \quad (3.32)$$

Desta maneira, dividindo as expressões (3.31) e (3.32), obtemos

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\Delta t_0}{\Delta t}.$$

Usando (3.19) ficamos com

$$L = \frac{L_0}{\gamma}. \quad (3.33)$$

Da Eq. (3.33), como  $\gamma > 1$ , temos  $L < L_0$ . Ou seja, um objeto no referencial S' que se move com velocidade uniforme em relação a S terá seu comprimento na direção do movimento reduzido para um observador no referencial S. Esse fenômeno é denominado como **contração de comprimento de Lorentz-FitzGerald**<sup>3</sup>. Para velocidades do nosso cotidiano, isto é, quando  $v \ll c$ , obtemos  $L \approx L_0$ . Ou seja, para baixas velocidades, as transformações Galileanas fornecem resultados precisos (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

É interessante salientar que Lorentz e FitzGerald, no intuito de explicar o motivo da não detecção do movimento absoluto da Terra em relação ao Éter no experimento de Michelson e Morley, deduziram tais equações com a justificativa de que devido o movimento da Terra pelo éter, o braço do interferômetro interagia com o éter e sofria de alguma forma um empacotamento de moléculas. No entanto, pela TRR, não existe essa contração absoluta, mas sim relativa. Isto é, depende do referencial utilizado nas medições. De outra forma, assim como existe a relatividade da medida do tempo, existe a relatividade da medida de comprimento entre referenciais inerciais (OSTERMANN e RICCI, 2002).

Somente em 1965, através do trabalho de Scott e Viner foi possível compreender como seria a aparência visual de um objeto que subtende um ângulo de visão grande em relação ao observador. Na figura abaixo temos a aparência visual de caixas retangulares com profundidade de 4 unidades de comprimento. Vemos que o resultado obtido na medição difere do resultado que se vê (OSTERMANN e RICCI, 2002).

---

<sup>3</sup> Em homenagem aos físicos George Francis FitzGerald (1851-1901) e Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) que, embora por suspeitas diferentes, deduziram antes de Einstein a equação de contração de comprimento (OSTERMANN e RICCI, 2002).

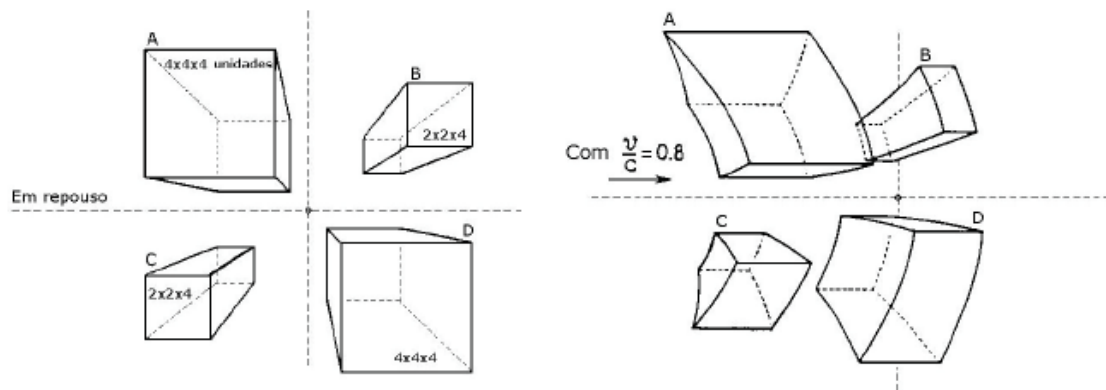


Figura 17 - Aparência visual de caixas retangulares. Fonte: (OSTERMANN e RICCI, 2002).

### 3.12 As transformações de Lorentz

Vimos na seção 3.2 que de acordo com a velocidade da fonte, obtemos diferentes valores para a velocidade da luz. Para resolver essa inconsistência com os postulados da TRR, as transformações de Galileu precisariam ser substituídas por uma transformação que possibilitasse obter o mesmo valor para a velocidade da luz independente do estado de movimento da fonte. Tais transformações ficaram conhecidas como as transformações de Lorentz. A partir delas, é possível não só obter o mesmo valor para a velocidade da luz ( $c$ ), mas também perceber que a posição e o momento em que um evento ocorre para um referencial  $S$  pode não ser o mesmo para um referencial  $S'$  que se move em relação a  $S$ . Veremos a seguir uma forma de deduzir essa transformação.

Suponha novamente um sistema de referência  $S'$  que se move em relação a  $S$  (ver figura 17) e que, quando  $t = t' = 0$ , as duas origens coincidem. Após um passar um certo tempo, temos  $x = vt + x'$ .

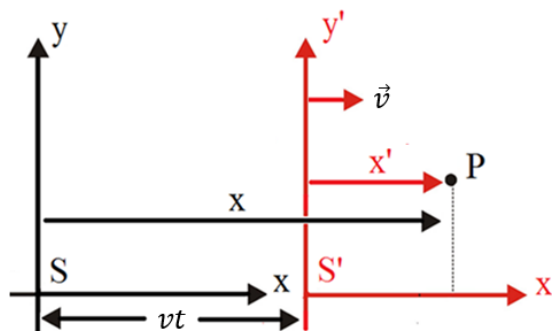


Figura 18 - Transformações de Lorentz. Fonte: Autoria Própria.

Note que  $x'$  é o comprimento próprio para  $S'$ , no entanto, para  $S$  ela se contrai por um fator  $1/\gamma$ , desta maneira escrevemos

$$x = vt + x' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

ou explicitando  $x'$  na equação acima, obtemos

$$x' = \gamma(x - vt). \quad (3.34)$$

Como as transformações de  $S$  para  $S'$  e  $S'$  para  $S$  devem ter a mesma forma, então escrevemos

$$x' = -vt' + x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3.35)$$

Comparando as Eqs. (3.34) e (3.35), obtemos

$$\gamma(x - vt) = -vt' + \frac{x}{\gamma}$$

ou

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad (3.36)$$

ou seja, o tempo não é absoluto como na relatividade de Galileu. Em resumo, as transformações de Lorentz de  $S$  para  $S'$  serão dadas por

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y = y' \\ z = z' \\ t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right). \end{cases} \quad (3.37)$$

A transformação inversa, isto é, do referencial  $S'$  para  $S$  é dada por,

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t = \gamma(t' + vx'/c^2). \end{cases} \quad (3.38)$$

Note que para baixas velocidades ( $v \ll c$ ), as equações acima se reduzem as transformações de Galileu. As transformações de Lorentz mostram que espaço e tempo não são coisas distintas, mas sim, interligadas. E devido a essa interdependência, o conjunto de coordenadas  $(x, y, z, t)$  são conhecidos como coordenadas do espaço-tempo de um evento (YOUNG e FREEDMAN, 2016).

Poderíamos estar interessado em obter a diferença da coordenada de um par de eventos (1 e 2) medidos no referencial S'

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1, \quad (3.39)$$

usando a primeira equação de (3.37) vemos que essa diferença é dada por

$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v\Delta t). \quad (3.40)$$

Da mesma forma podemos obter

$$\Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2}\right). \quad (3.41)$$

Portanto, as Eqs. (3.40) e (3.41) fornecem a diferença entre pares de eventos medidos por um observador em S'. Se quiséssemos o contrário, isto é, a diferença entre pares de eventos medidos por um observador em S teríamos,

$$\begin{cases} \Delta x = \gamma(\Delta x' + v\Delta t'), \\ \Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{v\Delta x'}{c^2}\right). \end{cases} \quad (3.42)$$

Note também que ao dividirmos as Eqs. (3.40) e (3.41) podemos obter

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\gamma(\Delta x - v\Delta t)}{\gamma\left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2}\right)},$$

ou

$$\frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t} - v\right)}{\left(1 - \frac{v\Delta x}{c^2\Delta t}\right)}. \quad (3.43)$$

Note que quando  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\Delta x/\Delta t \rightarrow v_x$ , assim como  $\Delta t' \rightarrow 0$ ,  $\Delta x'/\Delta t' \rightarrow v'_x$ , portanto

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{vv_x}{c^2}}. \quad (3.44)$$

Realizando o mesmo processo usado para obter (3.44) podemos obter

$$v_x = \frac{v'_x + v}{1 + \frac{vv'_x}{c^2}}. \quad (3.45)$$

Dessa forma, obtemos as transformações de Lorentz para a velocidade de S para S' (Eq. 3.44) e de S' para S (Eq. 3.45).

Suponha um pulso de luz no referencial S do laboratório ( $v_x = c$ ), da Eq. (3.44) podemos obter a velocidade da luz em relação ao referencial S', que é dado por

$$v'_x = \frac{c - v}{1 - \frac{vc}{c^2}} = c,$$

como esperado do postulado da relatividade de Einstein (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).



## **4 METODOLOGIA**

A aplicação desse projeto foi realizada com duas turmas do 1º ano do ensino médio de uma escola pública de Itacoatiara, interior do Amazonas: 1º ano turma 1 com 35 alunos e o 1º ano turma 2 com 32 alunos. Ao todo foram ministradas 3 aulas de 45 minutos cada. As tecnologias de informação e comunicação utilizadas foram: vídeos, simuladores e animações. Durante essas três aulas foram realizadas avaliações formativas para estimular a participação dos alunos durante a aula e também coletar os conhecimentos prévios e as possíveis dúvidas durante o processo. Também foi realizado uma avaliação somativa no início da primeira aula e no final da terceira aula. A avaliação somativa foi composta por 6 questões, na qual 3 eram questões objetivas e 3 eram questões subjetivas.

### **4.1 O planejamento das aulas (ou a sequência didática)**

#### **Aula 1**

##### **Objetivos:**

Apresentar o funcionamento do GPS; demonstrar as limitações da cinemática clássica.

##### **Procedimento didático:**

Planejamos iniciar a aula com a apresentação do tema, seguida de uma avaliação somativa sobre o assunto do projeto para verificar os conhecimentos prévios dos alunos sobre o conteúdo. A avaliação formativa ocorrerá durante todo o processo no intuito de utilizá-lo como ponto de debate com a turma.

Após a avaliação somativa, iniciaremos a aula perguntando da turma se alguém já ouviu falar sobre a TRR e sobre o que ela se trata. Em seguida, verificaremos se a turma já ouviu falar no GPS e se sabe o seu funcionamento. Esses questionamentos têm como finalidade explorar os conhecimentos pré-existentes (subsunçores) acerca do assunto. Em seguida, será apresentado um vídeo que aborda o funcionamento do GPS. Desejando mostrar as limitações da cinemática clássica será apresentado para a turma o problema do Múon e a relação que este tem com o GPS. Em seguida, apresentaremos uma cena do filme Alexandria para comentar o princípio de Galileu. Além disso, apresentaremos as transformações de Galileu e complementaremos essa parte com um exemplo. Aplicaremos as transformações de velocidade de Galileu na

Eletrodinâmica e mostraremos a incompatibilidade da Eletrodinâmica com o princípio de Galileu. Em seguida, falaremos sobre o Éter e o experimento de Michelson e Morley.

## **Aula 2**

### **Objetivos**

Apresentar aos alunos os postulados da relatividade especial e suas implicações.

### **Procedimento didático:**

Na segunda aula, apresentaremos os postulados da Relatividade Especial e os conceitos de simultaneidade e relatividade do tempo. Para exemplificar esses conceitos resolveremos o problema do Múon e mostraremos a implicação da relatividade especial no funcionamento do GPS. Para estimular reflexões acerca do conceito de relatividade do tempo, abordaremos o paradoxo dos Gêmeos e em seguida trabalharemos o exemplo “Qual delas é a avó?”. Utilizaremos uma cena do filme Interestelar como base para debate da relatividade do tempo. Além disso, discutiremos sobre a relatividade do comprimento e assim finalizaremos a segunda aula com um exemplo.

## **Aula 3**

### **Objetivo:**

Apresentar as transformações de Lorentz e aplicar uma avaliação somativa.

### **Procedimento didático:**

Na terceira e última aula será apresentado as transformações de Lorentz, seguido de exemplos para consolidar os conceitos abordados. Em seguida, realizamos uma breve revisão dos tópicos abordados nas últimas 3 aulas e por fim aplicamos uma avaliação somativa.

## 5 FASES DE APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.

### 5.1 Descrição da Aula 1

Iniciamos explicando o projeto à turma e em seguida aplicamos uma avaliação somativa a fim de obter os conhecimentos prévios dos alunos.



Fotografia 1- Aula 1. Fonte: (Própria, 2019)

Após a avaliação somativa, realizamos durante as 3 aulas uma avaliação formativa através de perguntas durante a aula com o intuito de saber o que os alunos já conheciam sobre o assunto. Questionamos se os alunos já ouviram falar na teoria da relatividade especial de Albert Einstein e se sabiam do que se tratava essa teoria. Vários alunos disseram que já tinham ouvido falar na teoria, mas não sabiam do que se tratava. Posteriormente, questionei se eles sabiam o que era o GPS. A maioria da turma respondeu que sim. Ao questionar se sabiam como o GPS funcionava. Apenas um aluno, que iremos nomear como A1, respondeu que era através do satélite. Logo após, exibimos o vídeo 1 que tinha como conteúdo uma breve explicação sobre o funcionamento do GPS. O propósito desse vídeo era mostrar a relevância do tema e o impacto deste na vida do aluno.

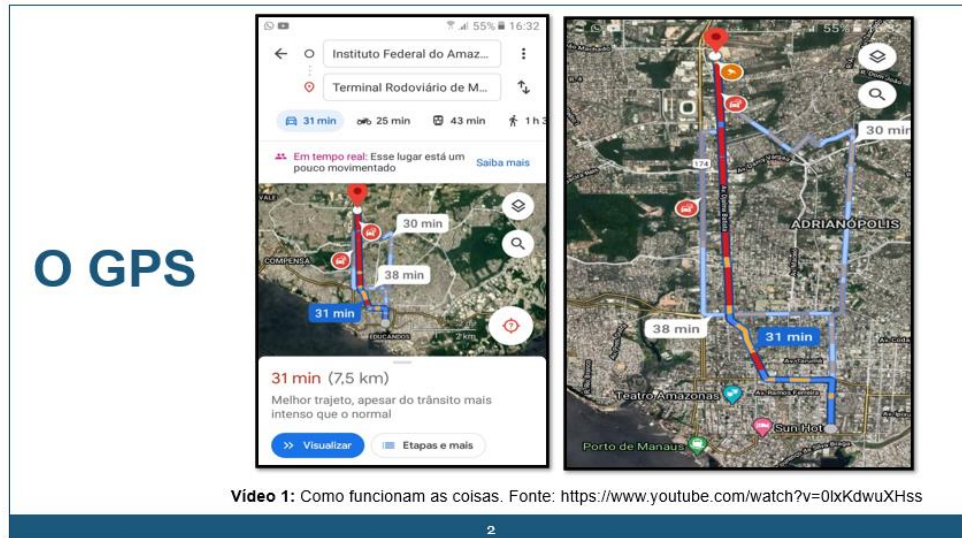



Figura 19 – GPS- Slide 2. Fonte: (Própria, 2019)

Em seguida, fizemos uma breve explicação sobre raios cósmicos e sobre a partícula Múon. Nessa parte mostramos que dado o tempo de vida do Múon, seria impossível observar na superfície da Terra essas partículas, no entanto não é o que acontece. Após a explicação do *problema do Múon*, questionei os alunos como é possível encontrar o Múon na superfície da Terra? Comentei também que havia uma relação direta entre a resolução do problema do Múon e o funcionamento do GPS, porém, seria necessário o conhecimento de uma nova teoria física que possibilitasse obter a incógnita acerca do Múon e compreender uma etapa crucial no funcionamento do GPS que o vídeo não havia abordado. Após a explicação da situação-problema, iniciamos a introdução do assunto principal a partir do aspecto mais geral da teoria, por esse motivo, exibimos um trecho do filme Alexandria que serviu como base para explicar o princípio de Galileu. Posteriormente, apresentamos as transformações de Galileu, seguido de um exemplo sobre velocidade relativa. O conteúdo apresentado até então estava de acordo com o que os alunos já haviam estudado em cinemática clássica. Depois, abordamos a descoberta referente a velocidade da luz de James Maxwell para que pudéssemos aplicar as transformações de Galileu e mostrar a divergência entre as duas teorias.

**O princípio da relatividade na eletrodinâmica**



$v_{S'/S} = 1000 \text{ m/s}$

Qual a velocidade da luz em relação a Terra?

Transformações Galileanas para velocidades ( $S'$  para  $S$ )

$$v_x = v'_x + v$$

$$v_{L/S} = c + 1000$$

**Fig. 5:** Um feixe de luz (L) é emitido pela espaçonave com velocidade  $c$ . Fonte: Próprio autor.

9

Figura 20 – O princípio da relatividade na eletrodinâmica - Slide 9. Fonte: (Própria, 2019)

Finalizamos a primeira aula abordando o conceito do éter e o experimento de Michelson e Morley.

## 5.2 Descrição da Aula 2

Na segunda aula, apresentamos os postulados da TRR e os conceitos de simultaneidade e relatividade do tempo, bem como o limite na qual um ser humano pode se mover segundo a relatividade especial.



Fotografia 2 - Aula 2. Fonte: (Própria, 2019)

Para exemplificar, resolvemos o problema do Múon que ficou em aberto na primeira aula e mostramos a relatividade do tempo em partículas que se movem com velocidades próximas a da luz. Aplicamos os conceitos de relatividade do tempo no funcionamento do GPS e explicamos como o movimento do satélite em órbita pode provocar erros na localização de uma pessoa na Terra.

**Exemplo 2 - O efeito da relatividade especial no GPS**

$$\Delta t_0 = 86400 \sqrt{1 - \frac{(3874)^2}{(299.792.458)^2}} \longrightarrow \Delta t_0 = 86.399,99999 \text{ s}$$

$$\Delta t - \Delta t_0 = 86400 \text{ s} - 86.399,99999 \text{ s} = 0,0000072 \text{ s} = 7,2 \mu\text{s}$$

Considerando essa diferença de tempo, após 24 horas, um sinal emitido pelo satélite até um receptor na Terra terá um erro de aproximadamente

$$d = c\Delta t = (299.792.458 \text{ m/s})(0,0000072 \text{ s})$$

$$d = 2158 \text{ m}$$

21

Figura 21 – Exemplo 2 – O efeito da relatividade especial no GPS - Slide 21. Fonte: (GRIN, 2015)

Abordamos duas questões para reflexão acerca do conceito de relatividade do tempo, a primeira foi sobre o paradoxo dos Gêmeos que tinha como propósito mostrar ao aluno em qual tipo de referencial a TRR poderia ser aplicada. Em seguida trouxemos para a aula um exemplo que tinha como objetivo mostrar as possíveis implicações da TRR em nossa vida. Antes de comentar esse exemplo, usamos um trecho do filme *Interestelar* (2014) que mostra o personagem Joseph Cooper retornando de uma viagem espacial, e que após ficar exposto a campos gravitacionais muito maiores em comparação a sua filha (Murphy Cooper) que permaneceu na Terra, sofreu com os efeitos da relatividade do tempo, tendo seu relógio biológico desacelerado, reencontrando sua filha muito mais velha do que ele.



Figura 22 – Cena do filme Interestelar – Slide 23. Fonte: (Própria, 2019)

Após o término do vídeo, questionei os alunos se eles haviam notado algo estranho na cena. Alguns alunos disseram que a senhora havia chamado o homem de pai e isso era estranho porque ela aparentava ser muito mais velha do que ele. Expliquei a eles a causa da cena (pai estar biologicamente mais novo do que a filha) e mencionei que apesar da dilatação do tempo no filme ter uma origem diferente (pois estava relacionando a teoria da relatividade geral de Einstein), a cena seria igualmente possível caso o personagem (Joseph Cooper) tivesse viajado por um tempo suficiente a velocidades próximas a da luz.

A cena do filme serviu como base para que os alunos tivessem mais subsunções para responder a seguinte questão ilustrada na figura abaixo



Figura 23 – Qual delas é a avó? - Slide 24. Fonte: (Própria, 2019)

Alguns alunos riram com a pergunta pois a resposta parecia óbvia. Quando insisti na pergunta, a grande maioria disse que a avó era claramente a senhora do lado direito da imagem. Um fato interessante nessa parte da aula foi que apenas um aluno respondeu corretamente dizendo que a avó era a moça do lado esquerdo. Por coincidência era o aluno mais “agitado” da turma. Quando eu disse que apenas uma pessoa havia respondido corretamente todos ficaram surpresos em saber que a avó era a moça do lado esquerdo e também em saber que havia sido justamente o mais “inquieto” da turma a responder corretamente à pergunta. Alguns alunos perguntaram: “Mas porquê?”. Após explicar as causas que levariam a essa situação na qual a avó é a moça do lado esquerdo, os alunos aparentemente compreenderam, ou pelo menos aceitaram que com base na TRR, isso poderia ser possível. Esse exemplo mostrou a dificuldade que os alunos tiveram de levar em consideração possibilidades contra intuitivas. Por fim, abordamos a relatividade do comprimento e finalizamos a aula 2 com um exemplo.

### 5.3 Descrição Aula 3

Na terceira e última aula, abordamos as transformações de Lorentz e realizamos uma avaliação somativa com as mesmas questões usadas no início da primeira aula. No caso das transformações de Lorentz para a velocidade, utilizamos o mesmo exemplo usado para demonstrar a discordância entre as transformações de Galileu e a Eletrodinâmica.

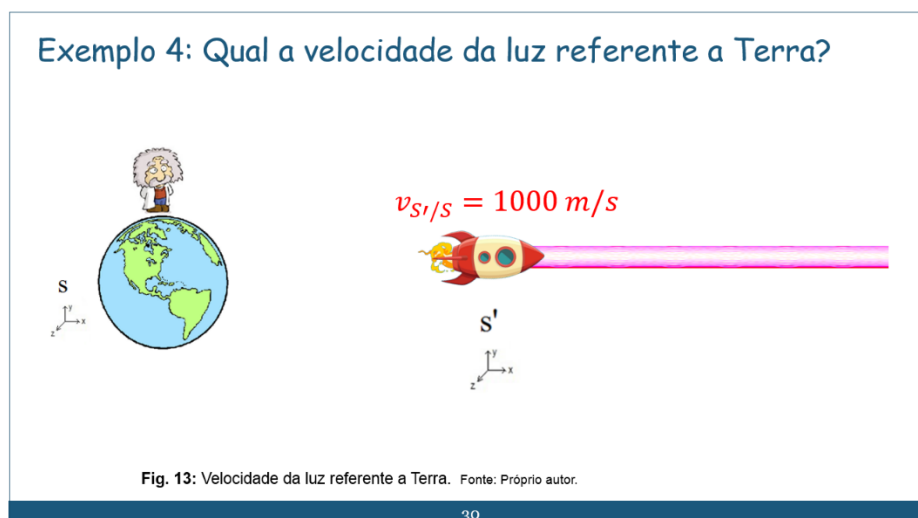


Figura 24 – Exemplo 4: Qual a velocidade da luz referente a Terra? - Slide 30. Fonte: (Própria, 2019).



Assim, conseguimos demonstrar aos alunos que independente da velocidade da fonte de luz, a velocidade da luz é  $c$ . Nesse momento, alguns alunos demonstraram surpresa, pois havia uma certa descrença de que conseguiríamos obter um resultado em acordo com os postulados da relatividade especial. Em seguida, fizemos uma breve revisão do que foi comentado nas últimas três aulas e finalizamos a aula com a mesma avaliação aplicada no início da aula 1.



Fotografia 3 - Aula 3. Fonte: (Própria, 2019)

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante as aulas os alunos das duas turmas participaram de uma avaliação formativa a fim de verificar seus conhecimentos prévios sobre o assunto (subsunçores) e estimular o debate sobre o tema em sala de aula. Abaixo consta algumas questões que fizeram parte da avaliação formativa:

1. Alguém já ouviu falar na teoria da relatividade de Albert Einstein?
2. Alguém sabe do que se trata essa teoria?
3. Alguém já ouviu falar no GPS?
4. Alguém sabe como funciona o GPS?
5. Diante do exposto, como é possível encontrar Múons na Terra?
6. Qual a velocidade do míssil em relação a Terra? (Slide 8)
7. Qual a velocidade da luz em relação a Terra? (Slide 9)
8. Qual dos Gêmeos de fato ficou mais velho? (Figura 28 - Slide 32)
9. Alguém notou algo estranho nessa cena? (Vídeo 4 - Slide 33).
10. Nessa imagem, temos uma moça e uma senhora abraçadas. Com base no que foi exposto até agora referente a teoria da relatividade especial. Qual delas é a avó? (Figura 29 do slide 34)

No geral, as respostas obtidas para cada questão foram:

### Questão 1

Vários alunos disseram que já tinham ouvido falar da teoria da relatividade de Albert Einstein.

### Questão 2

A maioria dos alunos disseram não saber do que se trata a teoria.

### Questão 3

Todos os alunos disseram conhecer o GPS.

### Questão 4

Um aluno disse que o GPS funciona por meio do satélite.

### Questão 5

Os alunos não souberam responder.

#### Questão 6

Os alunos não souberam responder.

#### Questão 7

Novamente, embora não terem respondido, os alunos aparentemente compreenderam a velocidade da luz variaria de acordo com a velocidade da fonte emissora.

#### Questão 8

Os alunos não conseguiram responder à questão do paradoxo dos gêmeos.

#### Questão 9

Alguns alunos deram respostas do tipo: “A senhora chamou o homem de pai”.

#### Questão 10

A grande maioria respondeu que a avó era a senhora de cabelo branco. Outros ficaram calados e expressavam dúvidas. Apenas um aluno disse que a avó era a moça.

O uso de uma avaliação formativa durante as aulas foi bastante útil pois permitiu tirar a dúvida dos alunos em pontos cruciais do assunto. Além disso, possibilitou o debate em sala de aula de questões relacionadas ao tema, possibilitando o direcionamento da atenção da turma para a aula.

A partir das respostas das questões 1 e 2 percebe-se que apesar dos alunos não compreenderem a TRR de Albert Einstein, seu nome é familiar. Isso provavelmente se deve aos diversos meios de obter informações que as gerações atuais dispõem. Esse fato mostra a relevância em propor alternativas de ensino que possibilitem a discussão e disseminação de conteúdos de Física Moderna.

A partir das questões 3 e 4 vemos que embora os alunos conheçam o GPS não sabem onde a Física se aplica nessa tecnologia. Essa é uma realidade que precisa ser mudada. Segundo o PCN, precisamos cada vez mais trazer aos alunos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea dada a importância desses conhecimentos na

formação de cidadãos críticos capazes de perceber, compreender e relacionar informações (BRASIL, 2000, p. 8).

A questão 5 teve como propósito mostrar o limite da mecânica newtoniana. Por isso, a resposta dada pelos alunos era a esperada. Nas questões 6 e 7, vimos que embora os alunos não tenham conseguido responder (talvez por insegurança), a lógica das transformações de Galileu não lhes pareceu tão complexa após a resolução da questão na lousa.

A questão 8 tinha como propósito servir como “gancho” para explicar que a relatividade especial só era válida em referenciais inerciais, portanto, o fato de os alunos não terem conseguido responder era razoável, tendo em vista o grau de complexidade.

Com base na resposta da questão 10 vimos a dificuldade que os alunos tiveram em tomar como possibilidade respostas que fossem contra intuitivas. Embora a questão 9 ter mostrado que a relatividade do tempo poderia implicar em situações imagináveis, apenas um aluno levou em consideração os conhecimentos obtidos sobre relatividade do tempo e respondeu corretamente à questão 10.

Além da avaliação formativa, os alunos também participaram de uma avaliação somativa na forma de prova no início da primeira aula e no final da terceira aula. A prova foi composta por 6 questões (ver abaixo) nas quais 3 questões eram objetivas e 3 questões eram discursivas.

#### Questão 1

Hoje sabe-se que a luz tem velocidade de aproximadamente 300.000.000 m/s, que é uma velocidade muito grande, porém finita. A teoria moderna que admite a velocidade da luz constante em qualquer referencial e, portanto, torna elásticas as dimensões do espaço e do tempo é:

- a) a teoria da relatividade.
- b) a teoria da dualidade onda – partícula.
- c) a teoria atômica de Bohr.
- d) o princípio de Heisenberg.

e) a lei da entropia

### Questão 2

Nos dias atuais, há um sistema de navegação de alta precisão que depende de satélites artificiais em órbita em torno da Terra. Para que não haja erros significativos nas posições fornecidas por esses satélites, é necessário corrigir relativisticamente o intervalo de tempo medido pelo relógio a bordo de cada um desses satélites. A Teoria da Relatividade Especial prevê que, se não for feito esse tipo de correção, um relógio a bordo não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em repouso na superfície da Terra, mesmo sabendo-se que ambos os relógios estão sempre em perfeitas condições de funcionamento e foram sincronizados antes do o satélite se lançado.

Se não for feita a correção relativística para o tempo medido pelo relógio de bordo:

- a) ele se adiantará em relação ao relógio em Terra enquanto ele for acelerado em relação à Terra.
- b) ele ficará cada vez mais adiantado em relação ao relógio em Terra.
- c) ele atrasará em relação ao relógio em Terra durante metade de sua órbita e se adiantará durante a metade da outra órbita.
- d) ele ficará cada vez mais atrasado em relação ao relógio em Terra

### Questão 3

Em 2005, Ano Mundial da Física, comemorou-se o centenário da Teoria da Relatividade de Albert Einstein. Entre outras consequências esta teoria poria fim à ideia do éter, meio material necessário, semelhantemente ao som, através do qual a luz se propagava. O jargão popular “tudo é relativo” certamente não se deve a ele, pois seus postulados estão fundamentados em algo absoluto: a velocidade da luz no vácuo – 300.000 km/s. Hoje sabe-se que:

- I. O som propaga-se no vácuo.
- II. A luz propaga-se no vácuo.
- III. A velocidade da luz no vácuo é a velocidade limite do universo.

É (são) verdadeira(s):

- a) todas
- b) nenhuma
- c) somente II
- d) II e III
- e) somente III

#### Questão 4

Um astronauta é colocado a bordo de uma espaçonave e enviado para uma estação espacial a uma velocidade constante  $v = 0,8c$ , onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. No referencial da espaçonave, o tempo transcorrido entre o lançamento e a chegada na estação espacial foi de 12 meses. Qual o tempo transcorrido no referencial da Terra, em meses?

#### Questão 5

Um referencial que se move a uma velocidade de  $0,6c$  mediu o comprimento de uma placa de trânsito e obteve a medida de 30 cm. O tamanho dessa placa em relação a um referencial em repouso é?

#### Questão 6

Uma partícula está se movendo ao longo do eixo  $x'$  do referencial  $S'$  com uma velocidade de  $0,40c$ . O referencial  $S'$  está se movendo com uma velocidade de  $0,60c$  em relação ao referencial  $S$ . Qual é a velocidade da partícula no referencial  $S$ ?

Os resultados obtidos das duas turmas (1º ano 1 e 1º ano 2) constam nos gráficos abaixo:

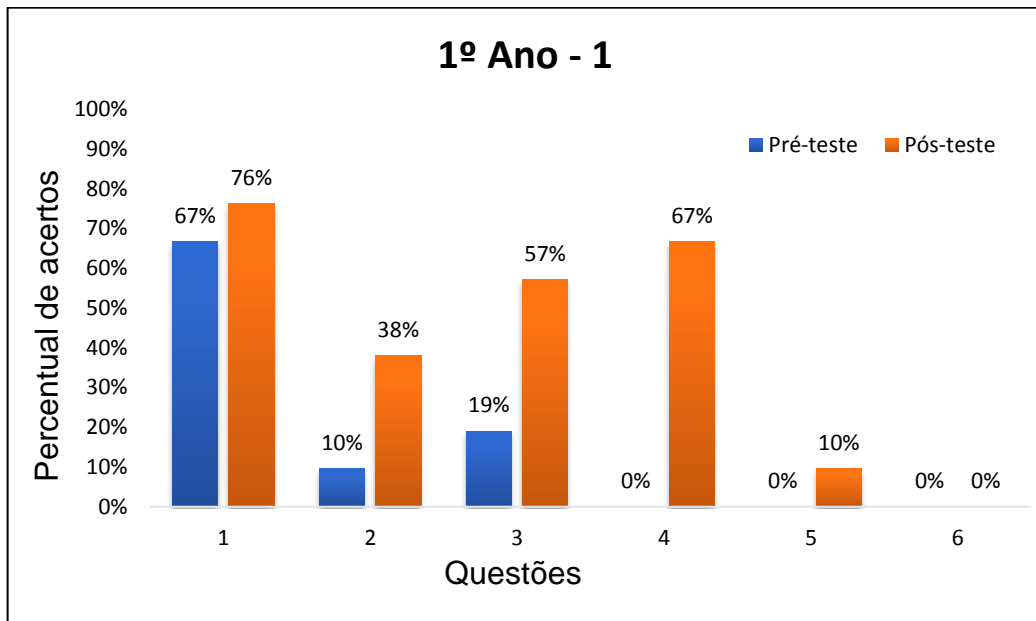


Gráfico 1 - Percentual de acerto das questões. Turma - 1º ano 1. Fonte: Própria (2019)

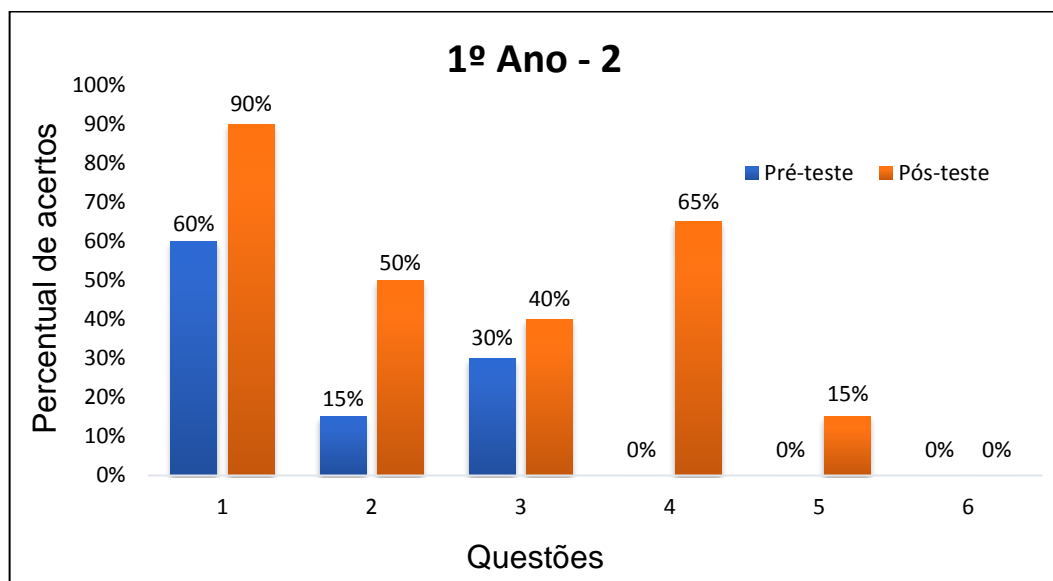


Gráfico 2 - Percentual de acerto das questões. Turma - 1º ano 2. Fonte: Própria (2019)

A partir dos resultados da avaliação somativa podemos ver que as questões que tratam da *relatividade do espaço* (questão 5) e das *transformações de Lorentz para as velocidades* (questão 6) não foram solucionadas corretamente, mesmo após as aulas. Como o tema relacionado a questão 4 (relatividade do tempo) fora trabalhado

por mais tempo com os alunos em comparação aos temas referente as questões 5 e 6, supomos que a causa do resultado obtido nas questões 5 e 6 tenha sido o insuficiente tempo em que esses assuntos foram desenvolvidos em sala de aula. Por isso, sugiro disponibilização de mais tempo para esses dois assuntos a fim de obtermos melhores resultados.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabemos que as gerações atuais dispõem dos mais diversos meios de obter informações. Conhecimentos que antes eram restritos a comunidade acadêmica, hoje podem ser obtidos através de um documentário de televisão, por exemplo. Sem dúvida, as tecnologias de informação e comunicação existentes atualmente são a ponte que interliga as pessoas e compartilha os mais variados tipos de informação entre os mais diversos lugares do mundo. Portanto, a utilização, por parte do professor, dessas tecnologias para possibilitar novas formas de aprendizagem parece razoável em meio a uma geração de alunos imersa nesse mundo.

Portanto, no intuito de fornecer uma resposta a questão “Como o uso das tecnologias de informação e comunicação pode contribuir com o ensino da cinemática relativística no ensino médio”, elaboramos uma sequência didática que, fundamentada na teoria de aprendizagem de David Ausubel, fizesse uso das TICs em pontos cruciais do tema.

Como resultado da aplicação da sequência didática vimos que a utilização das TICs associado a teoria de aprendizagem significativa proporcionou uma aula onde os alunos puderam participar e expor suas opiniões em sala de aula. Como consequência, a participação proporcionou um clima de descoberta e não apenas um momento de cópia de conteúdo da lousa. A utilização dos conhecimentos prévios (subsunçores) dos alunos para lhes apresentar novos conceitos teve papel fundamental no bom desenvolvimento das aulas e na aprendizagem significativa dos conteúdos pelos alunos.

Tendo em vista o resultado do projeto, senti a necessidade de mais tempo para trabalhar as transformações de Lorentz. Um ponto positivo percebido foi que, vídeos quando bem usados em momentos específicos da aula, despertam a atenção e curiosidade para o assunto abordado. Além disso, percebi através da participação e do entusiasmo de alguns alunos em sala de aula que a TRR deve cada vez mais fazer parte dos assuntos estudados no ensino médio. Instigar a curiosidade do aluno com um conteúdo relativamente contra intuitivo mostra uma faceta da Física pouco conhecida.

Por fim, agradeço ao professor Franciney e a direção da escola pela gentileza em ceder as turmas para a aplicação do projeto.

## REFERÊNCIAS

- ANJOS, J.; SHELLARD, R. C. **Raios Cósmicos: energias extremas no universo**. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), julho de 2004.
- ALMEIDA, Hugo. **Mas afinal de contas, o que é TICs?**. Instituto Senai de Inovação. Julho de 2019. Disponível em: < <https://isitics.com/2019/07/01/mas-afinal-de-contas-o-que-e-tics/> >. Acesso em: 01/01/2021.
- AUSUBEL, D. P. **Algunos aspectos psicológicos de la estructura del conocimiento**. Buenos Aires: El Ateneo, 1973.
- AUSUBEL, David P; NOVAK, Joseph D; HANESIAN, Helen. **Psicologia educacional**. Tradução Eva Nick. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.
- BINI, G. et al. (orgs.) **Los Libros de texto en América Latina**. México: Nueva Imagen, 1977.
- BRASIL. **Guia de tecnologias educacionais**. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica, Brasília, 2008.
- BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM)**. Ministério da Educação. Brasília: MEC, Secretária de Educação Básica, 2000.
- CABRAL, N, F. **Sequências didáticas: estrutura e elaboração**. Belém: SBEM, / SBEM-PA, 2017.
- CAPELARI, D. **Uma sequência didática para ensinar Relatividade Restrita no ensino médio com o uso de tic**. Dissertação (Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física-Polo Campo Mourão) Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- CARARO, A. C.; FERREIRA, L. D. D.; AFONSO, G. B. **Correções relativísticas sobre a medida de tempo GPS**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 16, no 1, p.156-176, jan-mar, 2010
- CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna – Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- DAMASIO, F.; PEDUZZI, L. O. Q. **Afinal, Einstein usou ou não os dados experimentais para propor sua relatividade restrita? Com a palavra, ele mesmo**. Física na Escola, v. 15, n. 1, 2017. Disponível em: < <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol15-Num1/a02.pdf> >. Acesso em: 30/12/2019.
- FAUTH, A. C.; GROVER, A. C.; CONSALTER, D. M.; **Medida da Vida Média do Múon**. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 32, n.4, 4502, 2011.
- FAUTH, A. C.; KEMP, E.; GRIZOLLI, W. C.; CONSALTER, D.M.; GONZALEZ, L.F.G.; **Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço**

**dos múons da radiação cósmica.** Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 29, n. 4, p. 585-591, 2007.

GARCIA, D. N. M.; NORTE, M. B.; MESSIAS, R. A. L.; **Tecnologias de Informação e Comunicação: Tics Aplicadas à Le.** Secretaria Estadual da Educação de São Paulo (Seesp). Unesp - Universidade Estadual Paulista, 2012.

GONÇALVES, A, V.; FERRAZ, M. R. R. **Sequências Didáticas como instrumento potencial da formação docente reflexiva.** DELTA, vol.32, n.1, São Paulo, 2016.

GRIN, Nicolas. **How does special relativity affect the GPS?** YouTube. 5 out. 2015. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=BTbl3D65ObU> >. Acessado em: 29 mar. 2020.

HALLIDAY; RESNICK; WALKER. **Fundamentos de Física: óptica e física moderna.** Rio de Janeiro: LTC. v. 8, 2009.

JÚNIOR, D. G. F. **Uma sequência didática para a abordagem da Relatividade Especial na educação básica com a utilização pelos colegas.** Dissertação (Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) Universidade Estadual de Santa Cruz, 2018.

JÚNIOR, P. J. F. A. **Uma Proposta de Inserção da Relatividade Restrita no ensino médio.** Dissertação (Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2016.

LARA, A. L.; MANCIA, L. B.; SABCHUK, L.; PINTO, A. E. A.; SAKAGUTI, P. M. Y. **Ensino de Física Mediado por Tecnologias de Informação e Comunicação: Um Relato de Experiência.** XX Simpósio Nacional de Ensino de Física – SNEF– São Paulo, 2013.

LIMA, D. F.; **A Importância da Sequência Didática como Metodologia no Ensino da Disciplina de Física Moderna no Ensino Médio.** Rev. Triângulo. Uberaba, MG. v. 11, n. 1, 2018.

MARTINS, ROBERTO de A. **Física e história: o caso da teoria da relatividade.** [Physics and history, a case study: the theory of relativity] Ciência e Cultura 57 (3): 25-29, jul./set. 2005.

MARTINS, ROBERTO de A. **O éter ou o nada** -GHTC.2006. Disponível em:<[WWW.ghc.usp.br/server/pdf/sci-Am-eter-2.PDF](http://WWW.ghc.usp.br/server/pdf/sci-Am-eter-2.PDF)>. Acesso em 02 de jan. de 2021.

MENDES, A. TIC – **Muita gente está comentando, mas você sabe o que é?** Portal iMaster, mar. 2008. Disponível em: < <https://imasters.com.br/devsecops/tic-muita-gente-esta-comentando-mas-voce-sabe-o-que-e> >. Acesso em: 01 fev. 2020.

MODROW, E. S. M.; Silva, M. B. **A Escola e o Uso das Tic: Limites e Possibilidades.** In: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor PDE, 2013.

MORAN, J.M.; MASETTO, M.T.; BEHRENS, M.A. (Ed.). **Novas tecnologias e mediações pedagógicas**. 13. ed. São Paulo: Papirus, 2007.

MOREIRA, M. A. **A Teoria de Aprendizagem de David Ausubel como Sistema de Referência para a Organização de Conteúdo de Física**. Revista Brasileira de Física, v. 9, n. 1, 1979.

MOREIRA, M. A. **Ensino e aprendizagem: enfoques teóricos**. São Paulo, Editora Moraes, p. 61-73, 1995.

MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. S. **Aprendizagem significativa: a teoria de David Ausubel**. 2. ed. São Paulo: Centauro, 2006.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física básica: Mecânica**. 4ª ed. São Paulo: Blucher, vol.1, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física básica: Ótica, Relatividade, Física Quântica**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, vol.4, 1998.

OSTERMANN, F.; RICCI, T.F. **Relatividade Restrita no Ensino Médio: Contração de Lorentz-FitzGerald e Aparência Visual de Objetos Relativísticos em Livros Didáticos de Física**. Rev. Cad. Brás. Ens. Fís., v. 19, n.2: p. 176-190, ago. 2002.

PELIZZARI, A; KRIEGL, M. L; BARON, M. P; FINCK, N. T. L; DOROCINSKI, S. I. **Teoria da Aprendizagem Significativa Segundo Ausubel**. Rev. PEC, Curitiba, v.2, n.1, p.37-42, 2002.

PIRES, C. M. S. **O segundo - ontem, hoje e amanhã**. Rev. Gazeta de Física, v. 42, n. 3, 2019.

RODRIGUES, C. D. O. **Inserção da Teoria da Relatividade no Ensino Médio: Uma nova proposta**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2001.

SILVA, C. G. da. **A Importância do Uso das TICS Na Educação**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 08, Vol. 16, pp. 49-59, 2018.

SILVA, O. M. M. da. **Análise do uso das mídias na prática pedagógica dos professores de uma escola pública da rede estadual de ensino do estado de Alagoas**. In: ENCONTRO DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO DE ALAGOAS (EPEAL) Disponível, 5, 2010, Maceió. Anais eletrônicos... Alagoas: EPEAL, 2010, p1-10. Disponível em <<https://docplayer.com.br/18619279-Analise-do-uso-das-midias-na-pratica-pedagogica-dos-professores-de-uma-escola-publica-da-rede-estadual-de-ensino-do-estado-de-alagoas.html>> . Acesso em 01/02/2020.

SILVA, S. de C. R. da; SCHIRLO, A. C. **Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel: Reflexões para o Ensino de Física Ante a Nova Realidade Social**. Imagens da Educação, v. 4, n. 1, p. 36-42, 2014.

YAM, P. **Einstein no dia-a-dia**. Scientific American Brasil, n. 29, pp. 90-95, 2004.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: Ótica e Física Moderna**. 14 ed. São Paulo: Person Education do Brasil, 2016.

ZABALA, A. **A Prática educativa: como ensinar**. Trad. Ernani F. da F. Rosa – Porto Alegre: ArtMed, 1998.

ZANOTTA, D. C.; CAPELLETTO, E.; MATSUOKA, M. T.; **O GPS: unindo ciência e tecnologia em aulas de física**. Revista Brasileira de Ensino de Física. v. 33, n. 2, 2313, 2011.

# **APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL**