



UTILIZAÇÃO DE UM *E-BOOK* COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA  
O ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Luis Eduardo de Oliveira Pontes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador:  
Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins

Marabá  
Abril de 2020

UTILIZAÇÃO DE UM *E-BOOK* COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA  
O ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Luis Eduardo de Oliveira Pontes

Orientador:  
Prof. Dr. Tiago Carvalho Martins

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física

Aprovada por:

---

Prof. Dr. Tarciso Silva de Andrade Filho

---

Prof. Dr. Jonatas Barros e Barros

---

Prof. Dr. Wellison Peixoto Bastos

Marabá  
Abril de 2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Biblioteca Setorial Campus do Tauarizinho da Unifesspa**

---

Pontes, Luis Eduardo de Oliveira

Utilização de um e-book como ferramenta educacional para o ensino da teoria da relatividade especial / Luis Eduardo de Oliveira Pontes ; orientador, Tiago Carvalho Martins. — Marabá, PA : [s. n.], 2020.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Marabá, 2020.

1. Física (Ensino médio) - Estudo e ensino. 2. Relatividade especial (Física). 3. Livros eletrônicos. 4. Tecnologia educacional. 5. Ensino - Metodologia. I. Martins, Tiago Carvalho, orient. II. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física. III. Título.

CDD: 22. ed.: 530.07

---

Elaborado por Alessandra Helena da Mata Nunes - CRB2/586

Dedico esta dissertação a minha mãe Elisângela Pontes e a meu pai Adonias Pontes, que muito me apoiaram durante o processo de produção deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e por tudo o que nela tem ocorrido, a meus pais e família como um todo e a meu orientador pela ideia do produto educacional.

## RESUMO

### UTILIZAÇÃO DE UM *E-BOOK* COMO FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA O ENSINO DA TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Luis Eduardo de Oliveira Pontes

Orientador:  
Tiago Carvalho Martins

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA) no Curso de Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Considerando a crescente nos conhecimentos científicos contemporâneos e suas influências no entendimento do mundo atual, a presença cada vez mais marcante das tecnologias no cotidiano e a necessidade de conectar o estudante e adaptá-lo a essa realidade, este trabalho foi desenvolvido com a finalidade de fornecer alternativas metodológicas para o processo de ensino e aprendizagem da Física Moderna, com foco na Teoria da Relatividade Especial, no Ensino Médio. Foi elaborado um *E-book*, a ser aplicado em uma sequência de aulas, atividades e leituras, que, em conjunto, norteiem a aprendizagem, contextualizando o conhecimento trabalhado de modo a produzir sentido aos conteúdos estudados em sala de aula. Como uma TIC (Tecnologia de Informação e Comunicação), o *E-book* se mostra como uma eficaz ferramenta capaz de motivar o estudante a buscar informações e a organizar esse conhecimento, seja pelas possibilidades de ampliação das relações com aplicações no mundo atual, seja pela facilidade de acesso e gosto pessoal dos estudantes por mídias digitais, internet e socialização de informações. Os resultados obtidos são satisfatórios, e representam uma ferramenta com potencial significativo para a evolução das práticas pedagógicas.

Palavras-chave: Física Moderna, Teoria da Relatividade, E-book, TIC, Ensino Médio.

Marabá  
Abril de 2020

## **ABSTRACT**

### **THE USE OF AN E-BOOK AS AN EDUCATIONAL TOOL FOR THE TEACHING OF THEORY OF SPECIAL RELATIVITY**

Luis Eduardo de Oliveira Pontes

Supervisor:  
Tiago Carvalho Martins

Abstract of master's thesis submitted to the *Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará* (UNIFESSPA) in the Program Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF), in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

Considering the growing in the contemporary scientific knowledges and its influences in the comprehension of the actual world, even more striking of the technologies at day by day and the necessity to connect the student and adapt him to this reality, this work was developed with the goal to provide methodological alternatives to the teaching and learning process of the Modern Physics, with focus in the Theory of Special Relativity at the High School. It was made an E-book, to be applied in a sequence of classes, activities and readings, that on the set, direct the learning, context the worked knowledge in order to get sense for the studied content in the classroom. As a TIC (Technology of Information and Communication), the E-book shows itself how na effective tool able to motivate the student to search informations and organize this knowledge, whether by the possibilities to ampliate the relations with applications in the actual world, or by ease of access and personal taste of the students for digital medias, internet and socialization of information. The obtained results was satisfactory, and represent a tool with significant potential for the evolution of pedagogical practices.

Keywords: Modern Physics, Theory of Relativity, E-book, TIC, High School

Marabá  
April, 2020

## Sumário

Capítulo 1	Introdução.....	1
Capítulo 2	Física Moderna: A Teoria da Relatividade Especial.....	3
2.1	Contexto Histórico.....	3
2.1.1	A Experiência de Michelson e Morley .....	4
2.2	Teoria da Relatividade Especial.....	9
2.2.1	Os Postulados da Relatividade .....	9
2.2.2	As Transformações de Galileu e Lorentz.....	10
2.2.3	Adição Relativística de Velocidades .....	14
2.2.4	A Dilatação do Tempo .....	15
2.2.5	A Contração do Espaço.....	22
2.2.6	Energia Relativística .....	23
2.2.7	Relação da Energia com a Quantidade de Movimento Relativístico .....	25
2.2.8	Teorema da Energia Cinética Clássico e Relativístico .....	26
2.2.9	Introdução à Teoria da Relatividade Geral .....	27
Capítulo 3	Referencial Teórico.....	32
3.1	Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs).....	32
3.2	A Utilização de <i>E-books</i> na Educação.....	35
3.3	A Física Moderna no Ensino Médio.....	38
Capítulo 4	Teorias de Aprendizagem.....	42
4.1	Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud .....	42
4.2	Teoria Sóciointeracionista de Vygotsky .....	43
Capítulo 5	O Produto Educacional .....	45
5.1	Ferramentas.....	45
5.2	O <i>E-book</i> .....	47
5.3	Visualização dos Arquivos <i>EPub</i> .....	55
Capítulo 6	Metodologia de Aplicação.....	60
6.1	Sequência Didática .....	60
6.2	Cronograma.....	62
Capítulo 7	Resultados .....	65
Capítulo 8	Considerações Finais.....	88
Apêndice A	Questionários.....	90
Anexo I	Exercícios Propostos.....	93
Referências Bibliográficas	.....	98



# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento da Física ao longo dos anos permitiu ao homem ampliar seus horizontes, com a produção de mecanismos e tecnologias variadas que facilitaram a evolução em todas as esferas da sociedade. Em particular, a Física Moderna e Contemporânea causou toda uma revolução no pensamento científico, com rupturas dos paradigmas vigentes, que culminaram em uma substancial redefinição de conceitos, essenciais para o progresso científico.

Devido a sua tão fundamental importância, a Física Moderna precisa de uma maior difusão e valorização de conhecimento. Muitos têm acesso a informações aleatórias que envolvem conhecimentos relacionados à Física Moderna, tais como em noticiários, filmes, revistas e etc., mas essas informações frequentemente aparecem sem grande contextualização e elaboração, tornando sua captação nebulosa e, conseqüentemente, sem muito proveito. Este trabalho tem como objetivo geral difundir o processo de ensino e aprendizagem da Física Moderna, em particular, da Teoria da Relatividade no Ensino Médio.

Como objetivos específicos, espera-se que o estudante seja capaz de compreender as redefinições conceituais de espaço, tempo, matéria e energia e as implicações e conseqüências oriundas dessas redefinições para a explicação dos fenômenos físicos. É importante que ele também compreenda a importância de um referencial para a observação e análise desses fenômenos e caracterizar esses referenciais. Além disso, é importante que o estudante reconheça a Teoria da Relatividade como uma base teórica de maior generalidade, que não refuta a Mecânica Clássica, mas a abrange dentro de um maior leque de situações e possibilidades, neste sentido, também espera-se que o estudante possa identificar as condições para que os efeitos da Relatividade se tornem consideráveis, e que fora dessas condições, os eventos observáveis recaem nos resultados esperados pela Mecânica Clássica.

Nesta perspectiva, optou-se pela Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud, para enfatizar as diferenças conceituais da Física Moderna em relação à Física Clássica, tendo em mente que as dificuldades enfrentadas em um campo de conhecimento não são necessariamente as mesmas em outro, e é preciso desenvolver a habilidade de relacionar todo um conjunto de conceitos para a compreensão de situações mais complexas.

Paralelamente, a Teoria de Vygotsky fornece o suporte na mediação de informações, habilitando o aluno a buscar informações novas e a organizar esse conhecimento de modo a dar sentido aos conteúdos, ampliando e desenvolvendo suas potencialidades na compreensão e resolução de situações e problemas.

Com essas abordagens em evidência, desenvolveu-se um *E-book* (livro eletrônico) como produto educacional, com o objetivo de ser uma ferramenta mediadora e facilitadora na aprendizagem, formulação e desenvolvimento de conceitos essenciais para a compreensão da Teoria da Relatividade Especial no Ensino Médio.

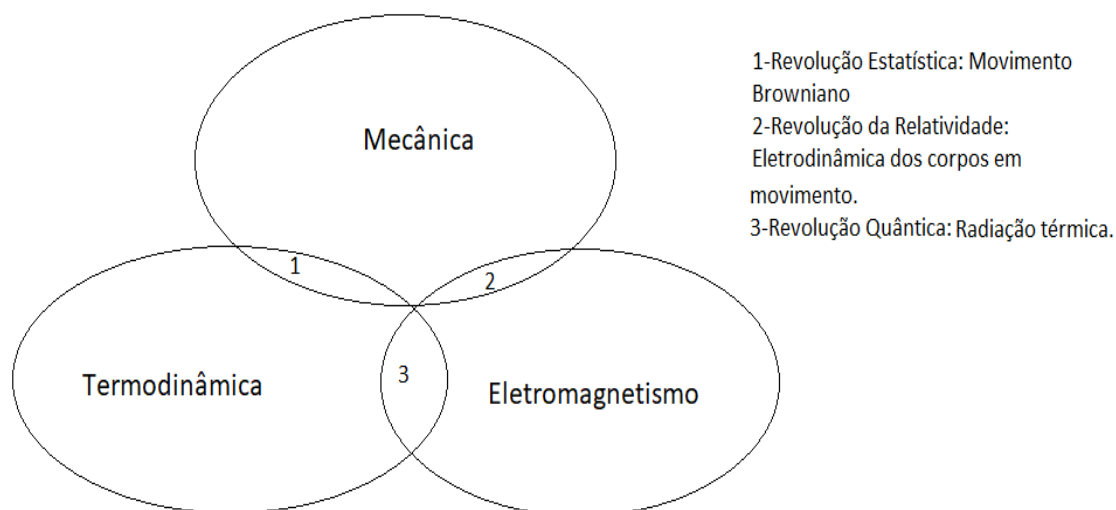
## Capítulo 2

### Física Moderna: Teoria da Relatividade Especial

#### 2.1 Contexto Histórico

Do final do século XIX ao início do século XX, muitos cientistas acreditavam que a Física já estava em fase de descobertas finais. Com o conhecimento relacionado às principais áreas da Física Clássica – Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo – fazia-se pensar que não havia mais o que ser descoberto, apenas aumentar a precisão das medidas obtidas. Entretanto, como fruto de diversas experiências e trabalhos desenvolvidos por Albert Einstein, Marie Curie, Max Planck, Niels Bohr, Antoine Becquerel, Louis de Broglie, dentre outros, alguns fenômenos possuíam questionamentos ainda não esclarecidos, problemas que ficavam na fronteira de domínio dos Campos Conceituais da Física Clássica. A figura abaixo representa a conexão entre três dos principais ramos da Física e suas regiões de fronteira, que representam os fenômenos que apresentavam problemas não totalmente solucionados:

Figura 1. Principais ramos da Física



Fonte: Física, Kazuhito & Fuke [43]

As tentativas de solucionar tais problemas serviram como ponto de partida que culminaram na produção de conhecimento – Mecânica Estatística, Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade – que hoje conhecemos como Física Moderna, uma revolução do pensamento clássico. Em 1905, Albert Einstein propôs postulados que esclareciam

certas questões de fronteira, o que trouxe consequências conceituais para o espaço e o tempo, conceitos que até então eram considerados absolutos (em se tratando de tempo) e adquiriram caráter relativo, dando forma à chamada Teoria da Relatividade Especial de Einstein.

Einstein publicou sua teoria motivado pela tentativa de uma maior compreensão da natureza do Eletromagnetismo, porém, ele estendeu e generalizou também a Mecânica Clássica, que no decorrer do processo, revelou-se como um caso especial importante de uma teoria mais geral e abrangente. No desenvolvimento da Teoria da Relatividade, Einstein avaliou os processos utilizados na realização de medidas de espaço e tempo, que por serem procedimentos que requerem o uso de sinais luminosos, naturalmente é necessário uma suposição acerca do modo como a propagação das ondas eletromagnéticas ocorre, constituindo-se numa das hipóteses centrais sobre as quais a teoria se baseia, a qual resulta numa visão completamente nova da natureza do espaço e do tempo.

Sendo a luz um fenômeno eletromagnético, um fator essencial nas medições do espaço e tempo, que formam a base da Mecânica, tem-se uma natural conexão entre Mecânica e Eletromagnetismo. Apesar disso, vivemos em um meio Newtoniano, no qual as baixas velocidades estão tão amplamente intrínsecas em nossas experiências diárias que é comum haver resistência inicial na compreensão dos novos conceitos e redefinições do espaço e do tempo. É comum afirmar que grandes teorias começam como uma heresia e terminam como um preconceito, muito em parte devido ao senso comum, algo que já era apontado por Einstein, segundo o qual *“O senso comum é aquela camada de preconceitos depositada na mente antes dos 18 anos de idade”*. Foi necessário mais de meio século de estudo, experimentação e aplicações para que a Teoria da Relatividade saísse da fase de heresia e enfim se estabelecesse como uma sólida base conceitual e prática.

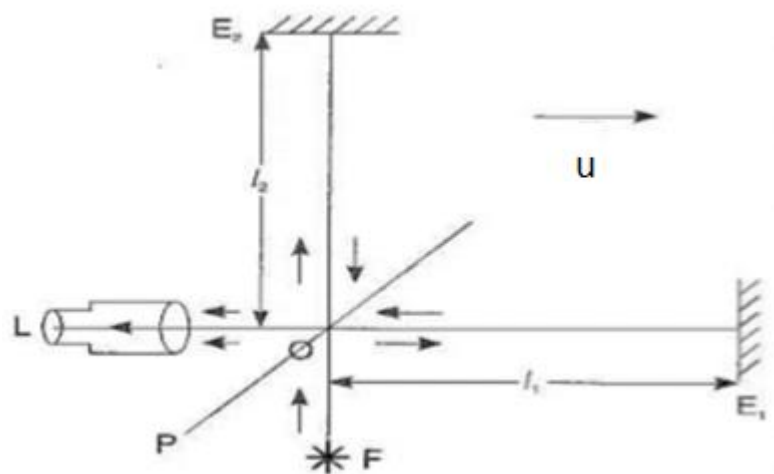
### *2.1.1 A Experiência de Michelson e Morley*

Devido à visão mecânica de mundo ser dominante no início do século XX, não se aceitava que uma onda eletromagnética pudesse se propagar no vácuo, imaginava-se que essas ondas precisavam de um meio de propagação tal como uma onda mecânica. Nesse sentido, postulou-se a existência de uma substância, nomeada de “éter”, que seria o meio mecânico no qual a luz se propagava, e no qual a sua velocidade tinha o mesmo valor em todas as direções. Porém, se o éter fosse considerado um referencial igual a

qualquer outro, verificava-se que a teoria eletromagnética de Maxwell entraria em contradição com as equações de transformação de Galileu. Para eliminar tal contradição, imaginou-se que o éter deveria ser o único referencial privilegiado em repouso absoluto, no qual as equações de Maxwell se aplicam, e para justificar a sua indetetabilidade, atribuíram-lhe propriedades incomuns como transparência perfeita e densidade zero. Em 1881, Albert Abraham Michelson e em 1887 Michelson e Edward Williams Morley utilizaram uma técnica interferométrica para medir a velocidade da luz em diferentes referenciais inerciais, com o objetivo de detectar o éter como um referencial privilegiado em repouso absoluto.

O aparato experimental está representado esquematicamente pela figura abaixo:

Figura 2. Interferômetro de Michelson e Morley



Fonte: Física Básica 4, Moysés Nussenzveig [37]. Modificada pelo autor.

Seus braços tem comprimentos  $l_1$  e  $l_2$ , **F** representa uma fonte de luz, **P** uma placa semiespelhada, **E<sub>1</sub>** e **E<sub>2</sub>** são espelhos e **L** é a luneta de observação.

Um feixe de luz de uma fonte, fixa em relação ao instrumento, é dividido em dois por uma placa semiespelhada. Esses dois feixes retornam, após refletirem nos espelhos e sofrem interferência na região da luneta de observação. A figura abaixo mostra o padrão de franjas típico que se observa no interferômetro de Michelson-Morley:

Figura 3. Franjas de Interferência

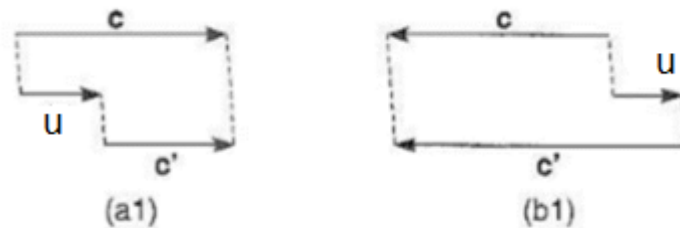


Fonte: Introdução à Física Moderna, Carlos R. A. Lima [36]

O padrão de interferência tem origem na diferença de fase entre os feixes, devido à diferença de caminho ótico e diferenças de velocidades de percurso relativamente ao éter.

Supondo que na situação da Figura 2, a Terra está se movendo em relação ao hipotético éter com uma velocidade  $u$ , na direção do espelho  $E_1$ . Como ao longo de  $l_1$  a velocidade da luz é paralela à velocidade da Terra em relação ao éter, teremos, para os percursos longitudinais:

Figura 4. Vetores de velocidade para ida e volta respectivamente na direção de  $E_1$



Fonte: Física Básica 4, Moysés Nussenzveig [37]. Modificada pelo autor.

Dessa forma, então, as velocidades de ida e volta relativas ao referencial do laboratório, serão, respectivamente:

$$c' = c - u,$$

$$c' = c + u,$$

e o tempo total para ida e volta ao longo de  $l_1$ :

$$t_1 = \frac{l_1}{c - u} + \frac{l_2}{c + u} = \frac{l_1(c + u) + l_1(c - u)}{(c - u)(c + u)},$$

que simplificada, resulta em:

$$t_1 = \frac{2l_1c}{c^2 - u^2}.$$

Dividindo numerador e denominador por  $c^2$ , pode-se obter:

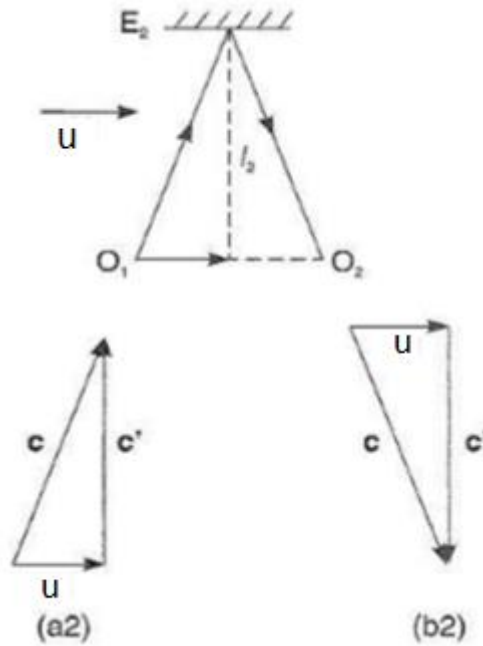
$$t_1 = \frac{2l_1}{c(1 - \beta^2)},$$

no qual,  $\beta$  representa o parâmetro adimensional de velocidades:

$$\beta = \frac{u}{c}.$$

No referencial do éter, o percurso em relação a  $l_2$  é oblíquo, pois durante o tempo de ida e volta da luz do espelho  $E_2$ , a placa terá sofrido um deslocamento, conforme a figura abaixo:

Figura 5. Vetores de velocidade para ida e volta respectivamente na direção de  $E_2$



Fonte: Moysés Nussenzveig. Modificada pelo autor.

Tanto na ida como na volta, a velocidade da luz no referencial da Terra (ou do laboratório), será:

$$c' = \sqrt{c^2 - u^2} = c\sqrt{1 - \beta^2}.$$

Logo, o tempo de percurso de ida e volta ao longo de  $l_2$  será:

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

A diferença de caminho ótico entre os dois percursos será:

$$\begin{aligned} \Delta &= ct_1 - ct_2 \\ \Delta &= c \frac{2l_1}{c(1 - \beta^2)} - c \frac{2l_2}{c\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{2l_1}{(1 - \beta^2)} - \frac{2l_2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ \Delta &= \frac{2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \left( \frac{l_1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - l_2 \right). \end{aligned}$$

Se os espelhos não forem exatamente perpendiculares entre si, essa diferença de caminho produz franjas de interferência.

Fazendo um giro de  $90^\circ$  em todo o dispositivo, os papéis dos braços do interferômetro são trocados, de modo que:

$$t'_1 = \frac{2l_1}{c\sqrt{1-\beta^2}},$$

$$t'_2 = \frac{2l_2}{c(1-\beta^2)},$$

o que gera uma diferença de caminho ótico de:

$$\Delta' = ct'_1 - ct'_2$$

$$\Delta' = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right).$$

A figura de interferência observada sofrerá um deslocamento correspondente ao caminho ótico:

$$\Delta' - \Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) - \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( \frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} - l_2 \right)$$

$$\Delta' - \Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left[ l_1 - \frac{l_2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{l_1}{\sqrt{1-\beta^2}} + l_2 \right]$$

$$\Delta' - \Delta = \frac{2}{\sqrt{1-\beta^2}} \left[ (l_1 + l_2) - \frac{(l_1 + l_2)}{\sqrt{1-\beta^2}} \right]$$

$$\Delta' - \Delta = \frac{2(l_1 + l_2)}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \right).$$

Como  $\beta \ll 1$ , podemos fazer a expansão binomial:

$$\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = (1-\beta^2)^{-1/2} \cong 1 + \frac{\beta^2}{2},$$

e o deslocamento da figura de interferência, medido em termos do número de franjas deslocadas, será então:

$$\delta m = \frac{\Delta' - \Delta}{\lambda} \cong -\frac{(l_1 + l_2)}{\lambda} \beta^2.$$

Portanto, se existe um éter, é esperado que haja um deslocamento no número de franjas de interferência até 2ª ordem em  $\beta$ , porém, o resultado, para a grande surpresa, foi o



contrário, isto é, não há deslocamento das franjas de interferência, logo, a hipótese da existência de um éter estacionário está incorreta.

Tornou-se claro o conhecimento de que as ondas eletromagnéticas se propagam, ainda que não exista um meio mecânico, e tal afirmação enfrentou grandes dificuldades de aceitação, levando a experiência a ser diversas vezes repetida, mas em todos os casos apontando para a não existência de um referencial privilegiado em repouso absoluto, isto é, a experiência concluiu a não existência do éter.

## 2.2 Teoria da Relatividade Especial

### 2.2.1 *Postulados da Relatividade*

Em 1905, em seu trabalho sobre “A Eletrodinâmica dos corpos em movimento”, Einstein, aos 26 anos, escreve que “...nenhuma propriedade dos fatos observados corresponde ao conceito de repouso absoluto; ...para todos os sistemas de coordenadas para os quais valem as equações da Mecânica, valem também as equações equivalentes da Eletrodinâmica e Ótica...A seguir nós fazemos essas suposições (que chamaremos subsequentemente de Princípio da Relatividade) e introduziremos uma hipótese adicional – uma suposição que é, à primeira vista, bastante irreconciliável com a anterior – que a luz se propaga no vácuo com a velocidade  $c$ , independente da natureza do movimento do corpo que a emite. Estas duas hipóteses são bastante suficientes para nos dar uma teoria simples e consistente da Eletrodinâmica dos corpos em movimento, baseada na teoria Maxwelliana para os corpos em repouso” enunciando, assim, os Postulados da Relatividade Especial. Posto de uma outra maneira, podemos expressar essas suposições como:

**Princípio da Relatividade:** As leis da física são as mesmas para quaisquer sistemas de referência inerciais, isto é, para observadores com aceleração nula. Dessa forma, não existe um referencial privilegiado e os processos naturais ocorrem igualmente nesses referenciais.

**Constância da Velocidade da Luz:** A velocidade da luz no vácuo possui sempre o mesmo valor para qualquer observador em sistemas de referência inerciais, e no vácuo ela vale  $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ , independente da velocidade da fonte que emite ou recebe um sinal luminoso.

O Princípio da Relatividade de Einstein vai além da Relatividade de Newton e Galileu, na medida em que inclui todas as leis da Física, e não somente as leis da

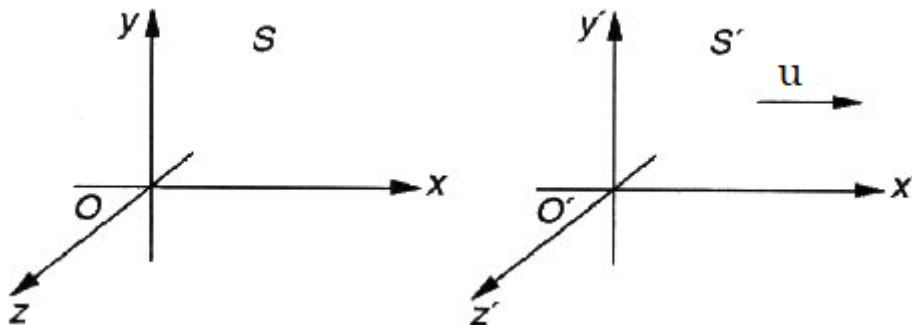
Mecânica. Ele afirma ser impossível, por meio de quaisquer medidas físicas, escolher um sistema inercial como intrinsecamente estacionário ou em movimento, pode-se apenas falar de movimento relativo de dois sistemas, logo, nenhuma experiência física de qualquer espécie realizada dentro de um sistema inercial, pode dizer ao observador qual é o movimento de seu sistema em relação a qualquer outro sistema inercial.

O segundo princípio, o qual positivamente contradiz as transformações de Galileu, é consistente com as experiências de Michelson e Morley e subsequentes. Toda a Teoria da Relatividade Especial é derivada diretamente destas duas hipóteses, e seu sucesso é julgado pela comparação com a experiência. Ela não somente explicou todos os resultados experimentais existentes, como também previu novos efeitos, os quais foram confirmados por experiências posteriores. Na formulação da teoria, foi necessário encontrar as equações de transformação entre referenciais inerciais, com a imposição da invariância da velocidade da luz; por razões históricas, tais equações ficaram conhecidas com as Transformações de Lorentz.

### 2.2.2 Transformações de Galileu e Lorentz

Na medição de um evento, ainda na Relatividade Galileana, as Leis da Física são as mesmas independente do referencial inercial adotado, porém, os resultados obtidos para um mesmo evento, variam de um sistema de referência para o outro. Tomemos dois sistemas inerciais  $S(x, y, z, t)$  e  $S'(x', y', z', t')$  que se move com velocidade  $u$  constante em relação a  $S$ :

Figura 6. Sistemas de Referência



Fonte: plato.if.usp.br. Modificada pelo autor

Pelas transformações de Galileu, os resultados obtidos para um mesmo evento medido em cada um desses referenciais se relacionam da seguinte forma, em uma dimensão:

$$\begin{aligned}x' &= x - ut, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= t.\end{aligned}$$

A transformação de velocidade segue imediatamente das diferenciações:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - u.$$

Como nas Transformações de Galileu, o tempo é absoluto, temos  $t = t'$ , de modo que as operações  $d/dt$  e  $d/dt'$  são iguais, assim:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx'}{dt'}.$$

Portanto:

$$\begin{aligned}\frac{dx'}{dt'} &= \frac{dx}{dt} - u, \\ \frac{dy'}{dt'} &= \frac{dy}{dt}, \\ \frac{dz'}{dt'} &= \frac{dz}{dt}.\end{aligned}$$

do qual se conclui que:

$$\begin{aligned}v'_x &= v_x - u, \\v'_y &= v_y, \\v'_z &= v_z,\end{aligned}$$

que corresponde ao Teorema Clássico da adição de velocidades.

Para a transformação para aceleração, temos:

$$\begin{aligned}\frac{dv'_x}{dt'} &= \frac{d}{dt}(v_x - u) = \frac{dv_x}{dt}, \\ \frac{dv'_y}{dt'} &= \frac{dv_y}{dt},\end{aligned}$$

$$\frac{dv_z'}{dt'} = \frac{dv_z}{dt}.$$

segue então que:

$$a'_x = a_x,$$

$$a'_y = a_y,$$

$$a'_z = a_z.$$

Conclui-se, então, que as medidas de aceleração de uma partícula não são afetadas pela velocidade relativa uniforme dos sistemas de referência.

Diferentes velocidades são atribuídas a uma partícula por diferentes observadores, quando estes estão em movimento relativo. Estas velocidades medidas diferem sempre pelas velocidades relativas dos dois observadores que, por se tratarem de observadores inerciais, é uma velocidade constante. Consequentemente, quando a velocidade da partícula medida por um observador se altera, essa variação será a mesma para ambos os observadores, isto é, eles medirão uma mesma aceleração. Portanto, a aceleração da partícula será a mesma em todos os sistemas de referência inerciais, que se movem um em relação ao outro com velocidade constante.

Considerando que na Mecânica Clássica a massa também não sofre alteração, teremos, para o Princípio Fundamental da Dinâmica:

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

$$\vec{F}' = m\vec{a}',$$

e como as acelerações são iguais nos referenciais S e S', decorre que:

$$\vec{F} = \vec{F}'.$$

*As leis de Newton do movimento e as equações de movimento de uma partícula são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais.* Da mesma forma, como os princípios de conservação da Mecânica Clássica, tais como o da energia e das quantidades de movimento linear e angular são também consequências das leis de Newton, decorre que *as leis da Mecânica Clássica são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais.*

Importante ressaltar que nas Leis de Newton, as partículas interagem em pares e que as forças de ação e reação estão direcionadas ao longo de uma linha reta que une essas partículas. Muitas forças têm sua intensidade como uma função apenas da separação entre as partículas, e isto permite com que essas leis também se apliquem a

forças como a de gravitação, forças de Van der Waals e eletrostáticas. Observa-se, contudo, que a Eletrodinâmica e o Eletromagnetismo não estão incluídos, pois cargas elétricas em movimento interagindo com campos magnéticos, envolvem forças cujas direções não estão ao longo da linha reta que une as cargas, além disso, estas forças, além da posição das cargas, dependem também de suas velocidades.

Posto dessa forma, as relações de transformação satisfaziam perfeitamente as explicações dos fenômenos pertencentes à Mecânica Clássica. Em contrapartida, o mesmo não ocorria para as Equações de Maxwell do Eletromagnetismo, pois as mesmas indicavam que a velocidade da luz era um invariante, qualquer que fosse o referencial adotado. Assim sendo, as Transformações de Lorentz, para os referenciais mencionados acima, se tornam:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - ut), \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \gamma\left(t - \frac{ux}{c^2}\right),\end{aligned}$$

onde o coeficiente  $\gamma$ , chamado fator de Lorentz, é definido pela expressão:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}.$$

Estas equações, aplicadas a referenciais de velocidades muito altas, concluem que a velocidade da luz permanece constante, qualquer que seja o referencial, o que vai de encontro às concepções formadas pela Física Clássica, já que neste caso, estamos habituados a trabalhar com velocidades baixas do cotidiano e não com velocidades relativísticas. As equações de transformação de Lorentz tornam-se, então, mais gerais, na medida em que o fator  $\gamma$  tende a 1 para o limite de baixas velocidades, e dessa forma, suas equações se reduzem às equações de transformação de Galileu.

As transformações de Lorentz (TL) também podem ser utilizadas para relacionar a velocidade  $\vec{v}$  de uma partícula, medida por um observador no referencial S com a velocidade  $\vec{v}'$  medida por um observador no referencial S', o qual se move com

velocidade constante  $\vec{u}$  em relação a S. De modo que, para cada componente do vetor velocidade, podemos obter, por diferenciações das TL:

$$\begin{aligned} dx' &= \gamma(dx - udt), \\ dy' &= dy, \\ dz' &= dz, \\ dt' &= \gamma\left(dt - \frac{udx}{c^2}\right). \end{aligned}$$

o que, conseqüentemente, implica em:

$$\begin{aligned} v'_x &= \frac{dx'}{dt'} = \frac{dt\left(\frac{dx}{dt} - u\right)}{dt\left(1 - \frac{u}{c^2}\frac{dx}{dt}\right)}, \\ v'_y &= \frac{dy'}{dt'} = \frac{dy}{\gamma dt\left(1 - \frac{u}{c^2}\frac{dx}{dt}\right)}, \\ v'_z &= \frac{dz'}{dt'} = \frac{dz}{\gamma dt\left(1 - \frac{u}{c^2}\frac{dx}{dt}\right)}, \end{aligned}$$

das quais resulta que:

$$\begin{aligned} v'_x &= \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}}, \\ v'_y &= \frac{v_y}{\gamma\left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)}, \\ v'_z &= \frac{v_z}{\gamma\left(1 - \frac{uv_x}{c^2}\right)}. \end{aligned}$$

### 2.2.3 Adição Relativística de Velocidades

Imaginemos um vagão, que se desloca a uma velocidade  $u$ . Dele, é lançado um projétil com velocidade  $v_0$  em relação ao vagão. A Mecânica de Galileu e Newton prevê, que a velocidade medida desse projétil em relação a um observador no solo, será:

$$v = v_0 + u.$$

Na Relatividade Especial, esta velocidade será dada por:

$$v = \frac{v_0 + u}{1 + \frac{uv_0}{c^2}}.$$

Observa-se que para velocidade baixas, muito menores que a velocidade da luz, a expressão recai no caso clássico, esperado por Galileu e Newton.

Por outro lado, se o projétil for um pulso luminoso,  $v_0 = c$ , teremos:

$$v = \frac{c + u}{1 + \frac{uc}{c^2}} = \frac{c + u}{\frac{c^2 + uc}{c^2}} = \frac{c + u}{c^2 + uc} c^2,$$

que se escreve como:

$$v = \frac{(c + u)c^2}{(c + u)c}.$$

Logo:

$$v = c,$$

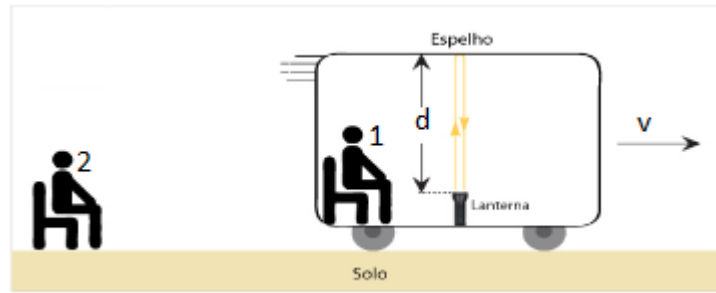
qualquer que seja a velocidade  $u$ , como já era de se esperar, já que todos os observadores inerciais devem medir a mesma velocidade  $c$  para a luz, independente do movimento da fonte. Nota-se que qualquer velocidade inferior à velocidade da luz somada relativisticamente a ela, produzirá o resultado  $c$ . De modo que a velocidade  $c$  desempenha na Relatividade Especial, o mesmo papel que a velocidade infinita desempenha no caso clássico.

#### 2.2.4 A Dilatação do Tempo

Na Física Clássica, tempo é uma grandeza de caráter absoluto, o senso comum faz com que a ideia de que o tempo flui em intervalos diferentes dependendo do referencial, não tenha aceitação intuitiva. Para que a luz tenha velocidade constante independente do movimento da fonte, foi necessária uma reinterpretação nos conceitos de tempo e espaço.

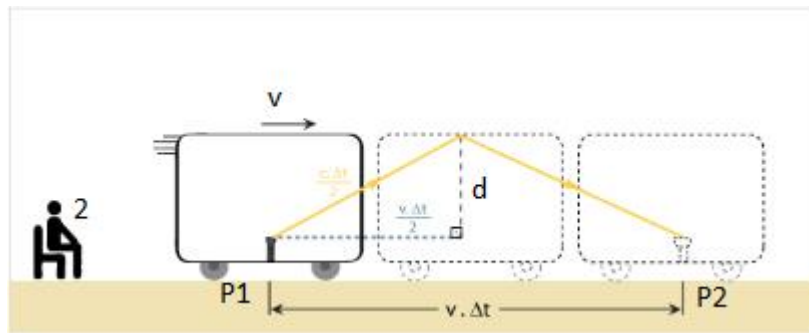
Para essa reinterpretação, vamos considerar uma experiência de pensamento, um evento imaginado, constituindo-se de um carrinho se deslocando entre dois pontos P1 e P2, com uma fonte F de luz no chão do carrinho, que emite luz até um espelho plano E no teto. Vamos analisar a situação do ponto de vista de um observador 1 (dentro do carrinho) e de um observador 2 (fora do carrinho), conforme mostram as figuras abaixo:

Figura 7. Evento. Visão do observador 1



Fonte: www.sofisica.com.br. Modificada pelo autor.

Figura 8. Evento. Visão do observador 2.



Fonte: www.sofisica.com.br. Modificada pelo autor.

Para o observador 1, o tempo para o raio de luz sair da fonte, ir ao espelho no teto e voltar é dado por:

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

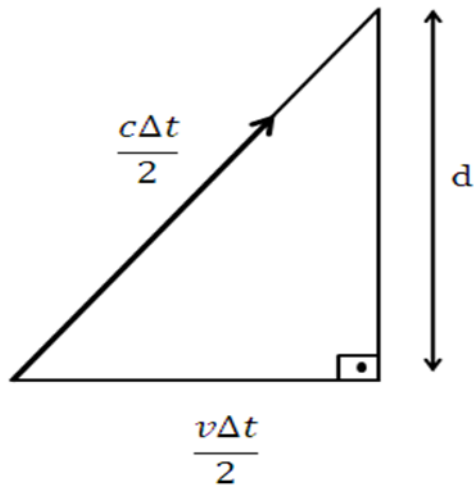
no qual  $c$  é a velocidade da luz e  $d$  é a distância da fonte ao espelho.

Para o observador 2, este tempo  $\Delta t$  é maior, visto que o percurso efetuado pela luz é maior do seu ponto de vista. O percurso total da luz para observador 2 é  $c\Delta t$ , de modo que cada trecho de percurso vale  $\frac{c\Delta t}{2}$ .

A distância entre os pontos P1 e P2 na figura é  $v\Delta t$ , de modo que cada trecho de percurso vale  $\frac{v\Delta t}{2}$ . Temos, então, o seguinte triângulo retângulo:



Figura 9. Triângulo retângulo dos raios de luz



Fonte: Próprio autor

Aplicando o teorema de Pitágoras, e isolando  $\Delta t$ , temos:

$$\begin{aligned} \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 &= \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2 \\ \frac{c^2\Delta t^2}{4} &= \frac{v^2\Delta t^2}{4} + d^2 \\ (c^2 - v^2)\frac{\Delta t^2}{4} &= d^2 \\ \Delta t^2 &= \frac{4d^2}{c^2 - v^2}. \end{aligned}$$

Dividindo o numerador e o denominador por  $c^2$ :

$$\Delta t^2 = \frac{\left(\frac{2d}{c}\right)^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

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

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

dessa forma, o tempo para o observador 2 é dado por:

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

com isso, temos que:  $\Delta t > \Delta t_0$ .

A relação entre os intervalos de tempo registrados pelos observadores 1 e 2 indica que, em se tratando de velocidades muito altas, comparáveis à da luz, o tempo dilata para o observador 2 em comparação ao tempo medido pelo observador 1, isto é, do ponto de vista do observador 2, tudo o que ocorre com o observador 1 passa mais lentamente, já que a luz terá que percorrer uma distância maior. De um modo geral, podemos dizer que o tempo flui mais lentamente para um observador em determinado referencial, quando o objeto de medida está em movimento em relação a ele.

Na expressão,  $\Delta t_0$  é chamado tempo próprio, que é aquele em que o observador está em repouso em relação ao objeto de medida.

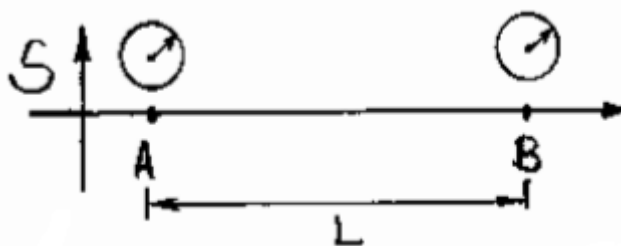
Nota-se que, no caso particular em que se tenha baixas velocidades ( $v \ll c$ ), a fração  $\frac{v^2}{c^2}$  tende a zero, com isso, todo o termo da raiz tende a 1, de modo que  $\Delta t \cong \Delta t_0$ , que é o resultado esperado pela Mecânica Clássica.

### **Relatividade da Simultaneidade**

Enquanto na Mecânica Newtoniana, assume-se que eventos simultâneos em um dado referencial inercial também o serão em outro referencial inercial, isto é, o tempo é universal, caráter que já era explícito na transformação de Galileu; na Relatividade, se dois observadores inerciais divergirem na simultaneidade de dois eventos, então certamente não há uma escala universal de tempo. Dois eventos só serão considerados como simultâneos em um dado referencial inercial se os sinais luminosos associados a esses eventos forem observados simultaneamente por um observador situado em seu ponto médio.

Se considerarmos que eventos A e B ocorrem no mesmo local, como um piscar de uma mesma fonte de luz, então basta um único relógio para medi-los. Por outro lado, se eles ocorrem em locais diferentes, como o piscar de duas fontes de luz, então são necessários dois relógios sincronizados para medi-los. A figura abaixo mostra relógios nos locais de eventos A e B em um dado referencial S:

Figura 10. Relógios nos locais de cada um dos eventos

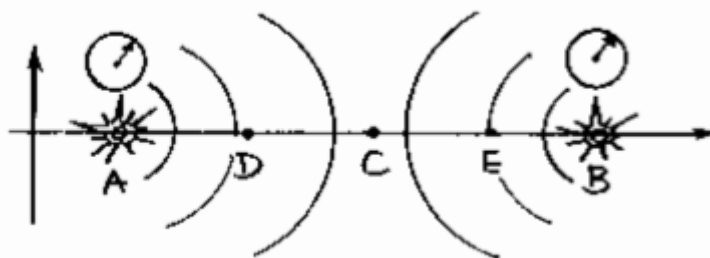


Fonte: Introdução à Física Moderna, Carlos R. A. Lima

Se um observador em A olha para o relógio em B e ajusta seu relógio para registrar o mesmo intervalo de tempo, os relógios não estarão sincronizados devido ao tempo  $\Delta t$  necessário para que a luz percorra a distância entre eles. A sincronização só ocorrerá quando o observador em A adiantar o seu relógio em  $\Delta t$  em relação ao relógio em B. Os relógios só estarão sincronizados para observadores em A e B, e para qualquer outro observador, eles não estarão sincronizados, logo, pode-se concluir que *dois relógios sincronizados em um dado referencial inercial não estarão sincronizados em nenhum outro referencial inercial*.

Imaginemos agora que dois observadores sincronizem seus relógios no mesmo local e emitam um sinal de luz num mesmo instante de tempo, partindo dos pontos A e B, conforme a figura abaixo:

Figura 11. Observadores emitindo sinais luminosos no mesmo intervalo de tempo



Fonte: Introdução à Física Moderna, Carlos R. A. Lima

Nesta situação, um observador C situado no ponto médio de A e B concluirá que os dois sinais luminosos foram emitidos simultaneamente, o mesmo não será válido para quaisquer outros observadores não equidistantes de A e B, como no caso de D e E, que apontarão a não simultaneidade da emissão.

Caso tenhamos dois observadores em movimento relativo, eles não concordam quanto à simultaneidade de dois eventos em posições diferentes. Se um deles concluir que dois eventos são simultâneos, o outro irá discordar. De um modo geral, *dois eventos*

*simultâneos em um referencial inercial, não são simultâneos em nenhum outro referencial inercial.* Posto dessa forma, a simultaneidade é um conceito genuinamente relativo, e não absoluto.

### **Efeito Doppler Relativístico**

É sabido que quando um observador de ondas sonoras recebe um feixe de ondas, com movimento relativo entre fonte e observador, uma alteração na frequência das ondas recebidas é verificada, fenômeno chamado de efeito Doppler, na qual a frequência percebida pelo observador é dada por:

$$f' = f \left( \frac{v \pm v_o}{v \pm v_f} \right),$$

na qual  $v$  é a velocidade do som,  $v_o$  é a velocidade do observador,  $v_f$  é a velocidade da fonte,  $f$  é a frequência real emitida pela fonte, e  $f'$  é a frequência aparente percebida pelo observador. Nota-se então, a necessidade de diferenciar as situações em que o Efeito Doppler é causado pelo movimento da fonte ou do observador, em decorrência do som se propagar pelo ar, e assim, tanto a fonte como o observador podem ter velocidades relativas a ele. Em se tratando da luz, por se propagar no vácuo, considera-se apenas a velocidade  $u$  relativa entre fonte e observador, não há movimento relativo ao meio. Levando em conta que a luz é uma onda eletromagnética, a expressão relativística para o Efeito Doppler se torna:

$$f' = \gamma f (1 - \beta \cos \theta),$$

onde  $\beta$ , representa o parâmetro de velocidades  $\beta = u/c$ .

Para  $\theta = 0^\circ$ , e no caso em que observador e fonte se afastam, a frequência aparente percebida pelo observador, será:

$$f' = \frac{f(1 - \beta)}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

que reescrevendo na forma:

$$f' = \frac{f \sqrt{(1 - \beta)^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

pode-se obter:

$$f' = f \sqrt{\frac{(1 - \beta)(1 - \beta)}{(1 - \beta)(1 + \beta)}},$$

que resulta em:

$$f' = f \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Caso observador e fonte estiverem se aproximando, temos:

$$f' = f \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

Se existisse o éter como referencial privilegiado em repouso absoluto, ele desempenharia o mesmo papel que a atmosfera desempenha para o som, e teríamos que distinguir os casos em que a fonte estaria em repouso no éter com o observador em movimento e observador em repouso no éter com a fonte em movimento.

### O Paradoxo do Gêmeos

Trata-se de uma experiência de pensamento utilizada para ilustrar a dilatação temporal. Considera-se dois irmãos gêmeos, Isaac e Alberto com 20 anos de idade. Isaac faz uma viagem interplanetária, a uma velocidade que corresponde a 60% da velocidade da luz, por tempo de 10 anos, nesse período, Alberto permanece na Terra. Após retornar à Terra, Isaac está com 30 anos. Por se tratarem de gêmeos espera-se que Alberto esteja com a mesma idade, porém, pela Teoria da Relatividade, o tempo dilata no referencial de Alberto, do ponto de vista dele, tudo o que ocorre com Isaac é mais devagar, de modo que Alberto envelhece mais do que Isaac, estando assim, com idade superior a 30 anos, mais precisamente, considerando o intervalo de tempo próprio, no referencial de Isaac como 10 anos e velocidade  $v = 0,6c$ , teremos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{10}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}} = \frac{10}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{10}{\sqrt{0,64}} = \frac{10}{0,8}$$

$$\Delta t = 12,5 \text{ anos,}$$

isto é, Alberto estará com 32,5 anos.

Analisando o problema do ponto de vista de Isaac, ele está parado na nave, e é Alberto quem viaja na velocidade citada, junto com a Terra. Nessas condições, o tempo dilata no referencial de Isaac, que estará mais velho ao se reencontrar com o irmão. O paradoxo consiste na questão de qual dos irmãos estaria de fato mais velho. A questão aqui, é que as duas situações não são simétricas, somente do ponto de vista de Alberto

está de acordo com a Relatividade, pois ele permaneceu em um referencial inercial. Como a nave de Isaac precisa de aceleração, seja no início da viagem, durante o retorno e na chegada à Terra, ele se encontra em um referencial não inercial. Posições e velocidades são grandezas relativas, o mesmo não se pode dizer de aceleração. A simetria de observações só existe para observadores inerciais.

Esse experimento foi posto em prática com relógios atômicos, sendo um posto em movimento em satélite ao redor da Terra e outro mantido na Terra, na qual verificou-se que o tempo passa mais devagar para o relógio que está em movimento do que para o relógio que está na Terra.

### 2.2.5 A Contração do Espaço

Para verificar as consequências da Relatividade para o espaço, vamos considerar o percurso realizado pelo carrinho entre os pontos P1 e P2 ainda nas imagens acima.

O observador 2 está em repouso em relação a este percurso do carrinho, logo, estando ele em repouso em relação ao objeto de medida, diferente do caso anterior, agora a medida realizada pelo observador 2 é que é a medida própria, enquanto que a medida realizada pelo observador 1 é uma medida relativa, de modo que:

$$L = v \Delta t_0 ,$$

$$L_0 = v \Delta t ,$$

fazendo a razão  $L/L_0$ , temos:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{v \Delta t_0}{v \Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} .$$

Assim, pode-se concluir que  $L < L_0$ , isto é, do ponto de vista do observado 1, o espaço é contraído na direção do movimento.

Novamente, no limite de baixas velocidades, em que a velocidade do corpo é muito menor que a da luz ( $v \ll c$ ), os efeitos relativísticos se tornam desprezíveis, e a expressão recai para o resultado esperado pela Mecânica Clássica, isto é,  $L \cong L_0$ , os comprimentos medidos pelos dois observadores seriam praticamente iguais.

Vale ressaltar que nenhum efeito relativístico é verificado no espaço em direções perpendiculares ao movimento, a contração do espaço se dá apenas na direção do próprio movimento.

### 2.2.6 Energia Relativística

É sabido da Física Clássica, que quando as ondas eletromagnéticas interagem com determinado meio material, ela transporta energia por meio de um campo eletromagnético que provoca a movimentação dos elétrons do meio em que incide, naturalmente produzindo uma determinada quantidade de movimento a esses elétrons. A quantidade de movimento transportada pela onda depende de sua energia, sendo dada por:

$$Q = \frac{E_0}{c},$$

ao atingir determinado obstáculo, as ondas exercem forças sobre os mesmos produzindo uma pressão de radiação.

Em se tratando de movimento ondulatório, uma característica essencial é o transporte de energia por um meio material de propagação. Como já vimos, na concepção clássica, acreditava-se que o éter era o suposto meio material de propagação das ondas eletromagnéticas, as quais exerceriam forças nos obstáculos por meio dele. No entanto, sua não existência tornou essa força inexplicável, problema que mais tarde, foi solucionado por Einstein, ao demonstrar que energia possui inércia.

Supondo uma nave de massa  $M$  em repouso em certo referencial contendo uma fonte luminosa à esquerda, a qual emite um sinal luminoso para a direita, teremos como decorrência do Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento, que toda a nave sofrerá um recuo para a esquerda, de modo que:

$$Q_N = Mv,$$
$$Q_L = \frac{E_0}{c},$$

estas expressões representam respectivamente as quantidades de movimento da nave e do sinal luminoso.

Einstein atribuiu massa à energia do sinal luminoso, que se comportaria como um pequeno projétil, pois só assim, o centro de massa do sistema permaneceria invariável, como deveria ser, já que não há forças externas atuando sobre o sistema como um todo.

Dessa forma, pode-se dizer que o sinal luminoso de massa  $m_0$  adquire quantidade de movimento dada por:

$$Q_L = m_0 c .$$

Pelo Princípio de Conservação da Quantidade de Movimento:

$$Q_N = Q_L$$

$$Mv = \frac{E_0}{c} = m_0 c ,$$

de onde se conclui que:

$$E_0 = m_0 c^2 .$$

Essa energia é chamada Energia de Repouso de um corpo em relação a determinado referencial, uma energia que existe pela simples razão corpo ter massa.

Se o corpo está em movimento, a uma velocidade relativística, ele possui energia cinética dada por:

$$E_c = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 ,$$

dessa forma, a energia relativística total de um corpo é conservada, sendo definida por:

$$E = E_c + E_0 ,$$

de modo que:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} .$$

As expressões permitem concluir que massa e energia são duas formas diferentes da mesma quantidade física, o termo  $c^2$  pode ser entendido como um fator de transformação de matéria em energia e vice-versa.



Efetivamente, define-se a massa relativística de uma partícula, como a grandeza:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

que tende a assumir valores maiores, quando mais próximo da velocidade da luz o corpo estiver. Tendo em conta que não se trata de um aumento na quantidade de matéria, apenas um aumento na sua inércia. Na expressão,  $m_0$  representa a massa de repouso da partícula.

### 2.2.7 Relação entre Energia e Quantidade de Movimento Relativístico

Um corpo que se move a uma velocidade relativística, possui associado uma quantidade de movimento dada por:

$$Q = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

o que em conjunto com a expressão da energia relativística permite relacionar:

$$E^2 = (Qc)^2 + (m_0 c^2)^2.$$

Nota-se que, um corpo de massa nula, tem então, quantidade de movimento:

$$Q = \frac{E}{c},$$

substituindo na expressão da quantidade de movimento, tem-se:

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{E}{c^2},$$

logo:

$$Q = \frac{Ev}{c^2}.$$

Conclui-se então, que para um corpo de massa nula:

$$\frac{E}{c} = \frac{Ev}{c^2} \Rightarrow v = c.$$

Em outras palavras, partículas de massa nula se movem com a velocidade da luz, que é o que acontece com os fótons. Essencialmente, dizer que fótons possuem massa nula é equivalente a dizer que não existem fótons em repouso.

### 2.2.8 Teorema da Energia Cinética Clássico e Relativístico

O Princípio Fundamental da Dinâmica pode ser escrito como:

$$F = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(m_0 v).$$

Classicamente, a massa é constante, pois o limite é de baixas velocidades, de modo que o Teorema do Trabalho-Energia Cinética é dado por:

$$E_c = \int_0^x F dx = \int_0^x \frac{d}{dt}(m_0 v) dx$$

$$E_c = m_0 \int_0^v \frac{dx}{dt} dv = m_0 \int_0^v v dv,$$

do qual se obtém que:

$$E_c = \frac{m_0 v^2}{2}.$$

Relativisticamente, a massa  $m$  da partícula aumenta à medida em que a sua velocidade atinge valores comparáveis à da luz, de modo que:

$$F = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{d}{dt} \left( \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right),$$

e o Teorema do Trabalho-Energia Cinética fica então:

$$E_c = \int_0^x F dx = \int_0^x \frac{d}{dt}(mv) dx$$

$$E_c = \int (mdv + vdm)v = \int (mvdv + v^2 dm).$$

A relação da energia com a quantidade de movimento é dada por:

$$E^2 = (Qc)^2 + (m_0 c^2)^2,$$

logo:

$$(mc^2)^2 = (mvc)^2 + (m_0c^2)^2$$

$$m^2c^4 = m^2v^2c^2 + m_0^2c^4,$$

que, dividindo por  $c^2$  é equivalente a:

$$m^2c^2 = m^2v^2 + m_0^2c^2.$$

Diferenciando a expressão acima, temos:

$$2mc^2dm = 2m^2v dv + 2v^2mdm,$$

e fazendo a divisão por  $2m$ , é equivalente à:

$$c^2dm = mv dv + v^2dm,$$

substituindo este resultado na integral, temos:

$$E_c = \int_{m_0}^m c^2 dm = c^2 \int_{m_0}^m dm = (m - m_0)c^2$$

$$E_c = mc^2 - m_0c^2,$$

na qual  $m$ , representa a massa relativística da partícula, e  $m_0$ , sua massa de repouso.

Obtém-se então, a expressão relativística da energia cinética:

$$E_c = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0c^2.$$

Usando a aproximação, para o caso em  $v \ll c$ :

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \cong 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2},$$

$$E_c = m_0c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right) - m_0c^2 \Rightarrow E_c = \frac{m_0v^2}{2}.$$

A expressão relativística se reduz ao caso clássico.

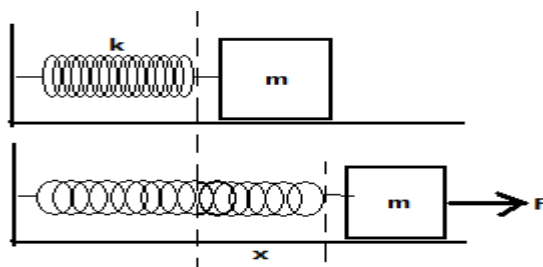
### 2.2.9 Introdução à Teoria da Relatividade Geral

Da mesma forma que a formulação da Teoria da Relatividade Especial surgiu por uma questão mal resolvida do Eletromagnetismo, a Teoria da Relatividade Geral surgiu por uma questão mal resolvida em relação à inércia e gravitação, esta teoria, como o próprio nome sugere, complementa e generaliza a primeira. Apresentaremos aqui, uma breve introdução do que levou à elaboração da teoria da gravitação de Einstein.

## Massa Inercial e Massa Gravitacional

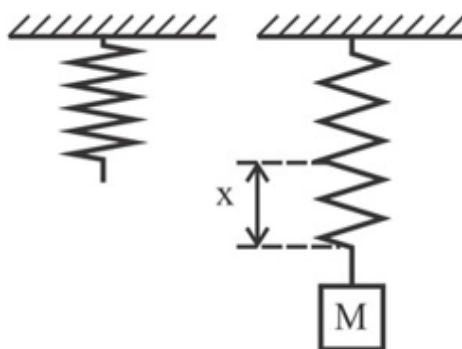
Consideremos inicialmente as situações a seguir, na qual um bloco está preso a uma mola de constante elástica  $k$ , que por sua vez se alonga de  $x$  em duas situações: na primeira quando sobre ela é exercida uma força de módulo  $F$  e na segunda, devido ao peso de módulo  $P$ , do bloco.

Figura 12. Bloco preso à mola na horizontal



Fonte: docsity.com

Figura 13. Bloco preso à mola na vertical. Modificada pelo autor



Fonte: educacao.globo.com. Modificada pelo autor.

Na primeira situação, o bloco adquire aceleração de módulo  $a$ , enquanto que na segunda ele fica submetido à aceleração de gravidade  $g$ , de modo que em cada caso, a massa do bloco será dada respectivamente por:

$$m = \frac{kx}{a},$$
$$m = \frac{kx}{g},$$

A primeira, era até o início do século XX chamada de massa inercial, por estar relacionada apenas à inércia do bloco, e a aceleração  $a$  adquirida é obtida por meio de funções da Cinemática, que por sua vez independe do local onde essas funções são obtidas. A segunda era então chamada de massa gravitacional, por estar relacionada apenas à ação da força gravitacional exercida pela Terra sobre o bloco, e a aceleração  $g$

tem origem na Lei de Gravitação Universal, sendo que na superfície do planeta, é calculada por:

$$g = \frac{GM}{R^2},$$

dependendo apenas da massa e do raio do planeta.

Aparentemente, não há nenhuma relação física entre elas, todavia é possível obter expressões semelhantes para a determinação das massas inerciais e gravitacionais por meio de situações fisicamente distintas, porém, todas as tentativas de encontrar diferenças nos resultados obtidos para um mesmo corpo, falharam. Caso a identidade entre essas massas fosse postulada, seria uma afirmação sem nenhuma fundamentação teórica que a justificasse, o que gerava insatisfação na comunidade científica, entre eles, Albert Einstein, que em 1907 explicou que a Teoria da Relatividade Especial ainda não o satisfazia por completo, por não levar em conta corpos em movimento acelerado - haja vista que toda a teoria foi formulada com a *restrição de que os observadores estivessem em referenciais inerciais, não se aplicando a referenciais acelerados (não inerciais)* – conseqüentemente, não solucionava a relação entre inércia e peso.

### **O Princípio da Equivalência**

Consideremos um vagão de trem que se move para a esquerda, e subitamente é freado, fazendo com que um observador dentro do vagão, veja três blocos de massas diferentes, apoiados sobre uma mesa, se moverem em sua direção com aceleração  $a$ . Agora imaginemos uma pessoa de boné, caindo do telhado de uma casa; como já era de se esperar, se não houvesse resistência do ar, ambos cairiam com aceleração  $g$ . Da mesma forma que os blocos, que se movem por inércia, não sentem nenhuma força exercida sobre eles, a pessoa caindo, que se move pela ação da gravidade não sente o próprio peso, em outras palavras o movimento dos blocos por inércia é equivalente ao movimento da pessoa e do boné pela gravidade, apesar de todas as massas dos corpos citados serem diferentes entre si, as acelerações  $a$  e  $g$  são as mesmas, de modo que essas acelerações, qualquer que seja sua origem, não dependem da massa do corpo acelerado. Essa experiência de pensamento convenceu Einstein da identidade entre inércia e gravitação, e isto o levou a formular o princípio da equivalência em 1912, até que em 1915 elaborasse a Teoria da Relatividade Geral.

Novamente, com uma experiência de pensamento “O elevador de Einstein”, consideremos duas situações:

1-Uma pessoa dentro de um elevador fechado, sem contato com o exterior e este elevador está em repouso na superfície da Terra. Se a pessoa dentro dele soltar algum objeto de sua mão, perceberá que este objeto será acelerado “pra baixo”, em direção a seus pés com uma aceleração proporcional à gravidade  $g$ .

2-Uma pessoa dentro de um elevador fechado na ausência do campo gravitacional e sem contato algum com o exterior. Este elevador está acelerado por uma aceleração  $a$  de mesma intensidade do campo gravitacional terrestre, mas em sentido contrário, “para cima”. Se soltar algum objeto de sua mão, notará que ele será acelerado “para baixo” com a mesma intensidade da primeira situação.

Dessa forma:

“É impossível, para um observador em um recinto fechado, saber por meio de qualquer experimento nele realizado, se está em repouso num local onde a aceleração de gravidade é  $g$ , ou se está em movimento com a aceleração  $a$  de mesmo módulo e direção, mas de sentido oposto a  $g$ ”.

Sendo assim, uma mesma característica do corpo, se manifesta ora como inércia, ora como gravidade.

Forças e acelerações inerciais são consideradas forças fictícias, na medida em que não há um agente físico que as exerçam, pois elas surgem da inércia dos corpos localizados em referenciais acelerados, da mesma forma que a força e aceleração centrífugas. No entanto, se inércia e gravitação são fenômenos equivalentes, isto sugere que o peso e a gravidade também deveriam ser considerados fictícios, ou que, forças e acelerações inerciais também deveriam ser consideradas reais.

Uma ressalva importante, é que a equivalência só ocorre de fato, se a aceleração gravitacional considerada for uniforme, ou seja, o vetor campo gravitacional deve ser constante, o que só é válido em regiões limitadas do planeta. Einstein concluiu então que a gravidade podia ser considerada uma força fictícia pontualmente, a análise do campo gravitacional deve ser local, pois todo campo gravitacional no Universo é do tipo central, de modo que para corpos de teste de massas desprezíveis, distantes sob a ação da mesma aceleração de gravidade, surgem forças inerciais entre esses corpos. Estas considerações o levaram a sugerir que a geometria do mundo é mais complexa que a geometria euclidiana comum.

Posto dessa forma, ele chegou ao resultado de que inércia e gravitação são equivalentes, e a massa dos corpos encurva o espaço alterando a sua geometria, nele os corpos não são forçados a desviar-se das trajetórias retilíneas por causa da força da

gravidade, mas porque esse movimento ocorre ao longo das linhas “mais retas” (chamadas de geodésicas) desse espaço.

## Capítulo 3

### Referencial Teórico

#### 3.1 Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs)

A comunicação é uma necessidade e algo que está presente em nossas vidas desde os primórdios da humanidade. A troca de informações e a expressão de ideias são fatores que contribuíram para a evolução das formas de se comunicar, levando o homem a aperfeiçoar suas capacidades de trabalho. Conforme as necessidades surgiram, adequou-se à essa realidade e desenvolveu-se novas tecnologias e mecanismos para a comunicação na sociedade.

Essa sociedade da informação tem origem a partir de dois fatores que são a computação e a comunicação e essas tecnologias mudaram a quantidade, qualidade e velocidade das informações dos dias atuais (SALGADO, 2002).

Enquanto livros, jornais, revistas, rádio e televisão compunham os principais meios de informação, seu conteúdo era passado de forma menos dinâmica. Com o advento da computação e da internet, a informação adquiriu meios quase que instantâneos de transporte, atingindo uma velocidade ainda maior com a expansão do uso de *laptops*, *tablets*, *smartphones*, *softwares* educativos e afins. Como consequência, devemos encarar esses novos meios de acesso à informação, não como substitutos dos anteriores, mas como alternativas muito úteis na atualidade, as quais inclusive, quando têm seu uso corretamente aplicado à educação, pode trazer excelentes vantagens para o processo de ensino e aprendizagem.

As possibilidades tecnológicas na educação surgiram como uma alternativa da era moderna, facilitando a educação através da inclusão digital, aperfeiçoando o uso da tecnologia pelos alunos, o acesso a informações e a realização de múltiplas atividades em todas as esferas da vida humana, além de promover melhor capacitação dos professores.

Essa era da informação e do conhecimento nos mostra um mundo novo, onde as práticas educativas e pedagógicas atingiram outro patamar, no qual cabe ao professor desenvolver competências e habilidades na busca, tratamento, armazenamento e compartilhamento dessas informações, levando a uma reformulação de metodologias,



privilegiando o ensino numa vertente mais investigativa, o que se transforma num diferencial nos processos de aprendizagem.

Sampaio e Leite (1999, p.17) afirmam que:

As práticas educacionais como ocorrem nas escolas devem ser repensadas, e também que a escola deverá ter o papel de desmistificar a linguagem tecnológica e iniciar seus alunos no domínio de seu manuseio, interpretação e criação.

Isto é, considerando um contexto de mudanças nos métodos de transmissão de informação e conhecimento no qual a atual geração tem contato íntimo com a tecnologia desde muito cedo, deve-se reavaliar novos meios mais apropriados e eficazes de se estabelecer o contato com os alunos, de tal forma que o processo educativo deve prover o direcionamento ao aluno para a interação com a tecnologia, filtrando as informações adequadas e as ações cabíveis a serem realizadas pelo estudante, seja no processo de absorção de informações ou na sua produção e compartilhamento.

De acordo com Bueno, Souza, & Bello (2008), é papel da escola fornecer aos alunos as competências que lhes permitam servir-se de ferramentas tecnológicas para produzir conhecimento, de forma significativa, com o intuito de facilitar e motivar a sua aprendizagem. Seja pelo reconhecimento da necessidade de formar cidadãos que se integrem no contexto social em que vão desempenhar a sua atividade, ou da necessidade de melhorar os processos de ensino e de aprendizagem. Uma ideia que parece consensual é a exigência de dotar os alunos do ensino básico com um conjunto de “ferramentas cognitivas” que os capacitem para a utilização dos diversos modos de comunicação que se fizeram possíveis pela evolução das tecnologias.

Nesse sentido, as Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) se constituem ferramentas essenciais nesse processo, auxiliando professores em suas práticas pedagógicas, dentro do papel de mediador de aprendizagens.

Segundo Lévy (2000), o docente tem vindo a transformar-se num moderador da inteligência coletiva dentro das turmas que orienta, em que a sua principal função será acompanhar e gerir as aprendizagens e as relações interpessoais, incentivando a troca de experiências e de saberes, que conduzam a caminhos de aprendizagem significativos para os estudantes.

É necessário, portanto, que o professor atue como um agente de mudanças, incentivando alunos e demais professores à prática e reconhecimento da importância da incorporação das TICs no processo de ensino e aprendizagem, adaptando-se, portanto, às novas realidades e tendências do mundo contemporâneo.

Ao utilizar as TICs, o professor será um facilitador, auxiliando o aluno a organizar a informação recolhida, a integrar e a articular o conhecimento científico. O atual problema da educação não está em saber onde encontrar a informação necessária, a maior dificuldade está na capacidade de ensinar a selecionar, avaliar, interpretar, classificar e, finalmente, a usá-la convenientemente e com responsabilidade (Brunner, 2004).

O acesso à informação, nesse sentido, possui uma disponibilidade maior, mas nem sempre o aluno terá o discernimento de qual delas será útil ou adequada para o problema em questão. Nesse ponto, uma análise e interpretação mais minuciosa do assunto se faz necessária, para que o acompanhamento do estudo não perca o foco de seus tópicos de interesse.

Outra possibilidade de uso das TIC, de acordo com Perrenoud (2000), é que elas podem facilitar o processo interdisciplinar, pois apresentam uma série de vantagens em relação aos métodos convencionais de aprendizagem e facilitam a troca imediata de informações, a visualização de subtarefas mais globais, a adaptação da informação aos estilos individuais de aprendizagem, o encorajamento à exploração, maior e melhor organização das ideias, maior integração e interação, agilidade na recuperação da informação, maior poder de distribuição e comunicação nos mais variados contextos.

Neste aspecto, o uso das TICs também vem a facilitar a integração entre o próprio corpo docente, haja vista que a vastidão e agilidade do fluxo de informações favorece o trabalho interdisciplinar, contextualizado à realidade do estudante, abordagem essa que é tão requerida por exames vestibulares, além de promover uma maior conexão para a

realização de projetos escolares que, por sua vez, garantem uma maior sócio-interatividade entre os membros da escola.

Para Moran (2009, p.27):

As tecnologias ajudam a realizar o que já fazemos ou desejamos. Se somos pessoas abertas, elas nos ajudam a ampliar a nossa comunicação; se somos fechados, ajudam a nos controlar mais. Se temos propostas inovadoras, facilitam a mudança.

A utilização das TICs em sala de aula não minimiza ou substitui o papel primordial do professor, mas essencialmente permite romper com as estruturas pré-estabelecidas em sala de aula transformando o ambiente formal de ensino, no qual o professor deixa de ser o informador de conteúdos passando a ser um coordenador do processo e o aluno deixa de ter um caráter passivo para um caráter mais ativo e autônomo do processo, na medida em que lhe permite gerar informações significativas para a compreensão do mundo a sua volta.

### **3.2 A utilização de *E-books* na Educação**

Um *e-book* (livro eletrônico, livro digital, hiperlivro) é uma hipermídia utilizada como ferramenta educacional digital que, em geral, pode disponibilizar textos, imagens, gráficos, tabelas, vídeos, animações, simulações, equações e atividades, de modo que o aluno possa acessar de maneira rápida e fácil pelo conteúdo trabalhado. Levando em conta que boa parte dos estudantes se encontram tão naturalmente inseridos no meio digital, trata-se de uma eficaz alternativa ao livro e demais materiais convencionais impressos, devido à sua facilidade de acesso e por abordar os conteúdos com o estudante de forma mais interativa.

Recursos multimídia se caracterizam pelo emprego de mais de um meio de comunicação, mesclando textos, imagens e sons para a transmissão de determinado conteúdo. Um hipertexto é, essencialmente, a apresentação de um texto de forma não linear de modo que é dada ao leitor a liberdade de escolher a sequência de tópicos nas quais as informações serão expostas.

De acordo com Campos (1994, p.14), a navegação em um hipertexto pode ser feita de três maneiras:

- seguindo as ligações e examinando o conteúdo das janelas abertas;
- por busca na rede ou parte dela através de palavras-chave, ou outros;
- por navegação através do gráfico da estrutura do hipertexto.

Isto é, a interligação por meio de palavras-chave entre trechos de texto promove uma navegação mais dinâmica entre as informações.

Segundo Belisário (2001), a utilização dos diversos recursos audiovisuais em um hipertexto pode ser um forte elemento motivacional para o aprendizado de determinado conteúdo, na medida em que quebram a rotina da leitura de textos impressos, exigindo do aluno uma postura mais ativa durante o processo, que ocorrerá de forma mais fluida pelas próprias características facilitadoras da ferramenta. Nesse ponto, conforme Nielsen (1990) afirma, algumas características funcionais do sistema são: fácil aprendizagem, é eficiente e prazeroso ao usar e fácil de lembrar. Além disso, as aplicações da informática na educação proporcionam a geração, a disseminação e o gerenciamento de conhecimento e informação.

No tocante a esse aspecto, uma hipermídia representa a fusão de um hipertexto com uma multimídia, pois implica ligação e navegação através de materiais armazenados em mídias variadas: textos, gráficos, sons, vídeos e outras mídias diversas. De acordo com Artuso (2006, p. 42-43):

O hipertexto, e por extensão a hipermídia, é a base da internet. A hipermídia é uma nova e diferente forma de conectar diversas mídias ou dados de computadores. Assim como o hipertexto, tem como característica a não linearidade dos documentos na qual pode se viajar para diversas partes de uma página de hipermídia explorar tais arquivos de forma que se desejar, ou seja, em seu próprio ritmo, navegando em qualquer direção que se escolha.

Desse modo, as exigências por uma maior autonomia do estudante o beneficiam com a possibilidade de definir o ritmo de sua aprendizagem, optando entre tópicos disponíveis; e havendo um melhor gerenciamento de conteúdo, a absorção do conhecimento atinge naturalmente uma fase de melhor acomodação.

Na perspectiva de Chaves (1991) *apud* Campos (1994, p. 36). O aluno irá atuar:

- Decidindo a sequência em que a informação vai ser apresentada ou recuperada e o seu esquema de navegação pela informação;
- Determinando o ritmo e velocidade da apresentação do nó - Controlando repetições, avanços, interrupções, sempre podendo retornar onde parou da vez anterior;
- Estabelecendo associações e interligações entre informações diversas.

Entenda-se nós como fragmentos de informações que descrevem um conceito. Os sistemas de hipermídia, então, transformam o aluno num ativo participante do processo, tornando-se um manipulador e processador de informações, ao invés de um observador e receptor passivo de conteúdo.

Qualidades estas, que são corroboradas por Campos (1994), segundo o qual, o uso da hipermídia traz vantagens educativas, dentre as quais se destacam: a interação entre o computador (ou qualquer outra mídia) e o aluno; a possibilidade de atenção individual; a possibilidade de controle de seu próprio ritmo de aprendizagem além da sequência e o tempo desta; a apresentação dos conteúdos de modo atrativo e integrado, estimulando a aprendizagem, e a possibilidade de uso para avaliação e desenvolvimento de habilidades.

Além disso, uma hipermídia possui a capacidade de armazenamento de grande quantidade de informações, o que permite que conteúdos extensos e variados sejam organizados e disponibilizados aos estudantes de modo prático e agradável, despertando o interesse e aguçando a curiosidade dos discentes. Posto dessa forma, aplicadas e integradas à educação, as hipermídias, como todas as TICs em geral, possuem uma forte tendência a culminar no aumento da qualidade do ensino básico, o processo de ensino-aprendizagem deve ser dialético, interativo e sempre adaptável às constantes mudanças e tendências pedagógicas na educação e no mundo, em tempos de tão pouco foco e tanta atenção concedida às interações virtuais por redes sociais e demais meios semelhantes de comunicação, torna-se totalmente adequada e eficiente a busca por ferramentas norteadoras e facilitadoras para uma aprendizagem significativa em sala de aula.

### 3.3 A Física Moderna no Ensino Médio

Ensinar Física não é uma tarefa de natureza fácil, aprender é um caminho que apresenta dificuldades ainda maiores. Por esta razão sempre se faz necessário buscar meios diferenciados que possibilitem a realização desta tarefa com qualidade.

De acordo com os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN (2000):

A Física deve apresentar-se, portanto, como um conjunto de competências específicas que permitam perceber e lidar com os fenômenos naturais e tecnológicos, presentes tanto no cotidiano mais imediato quanto na compreensão do universo distante, a partir de princípios, leis e modelos por ela construídos. Isso implica, também, na introdução à linguagem própria da Física, que faz uso de conceitos e terminologia bem definidos, além de suas formas de expressão, que envolvem, muitas vezes, tabelas, gráficos ou relações matemáticas. Ao mesmo tempo, a Física deve vir a ser reconhecida como um processo cuja construção ocorreu ao longo da história da humanidade, impregnado de contribuições culturais, econômicas e sociais, que vem resultando no desenvolvimento de diferentes tecnologias e, por sua vez, por elas impulsionado.

Observa-se, então, que a Física deve ser tratada como uma ciência, destinada à explicação de fenômenos naturais, com abordagem contextualizada ao cotidiano do estudante, e cujo desenvolvimento foi construído por todo um processo histórico a partir das inquietações e questionamentos que, por sua vez, se originavam a partir da observação de fenômenos sem solução ou não totalmente esclarecidos. Diante disso, os físicos de cada época valiam-se de teorias, modelos matemáticos e comprovações de base experimental, no intuito de construir uma sólida base de conhecimento científico, que fosse capaz de descrever e explicar a natureza, desde as menores das partículas subatômicas às maiores galáxias do universo. Tendo isso como base, espera-se que o aluno do ensino médio tenha uma formação geral que o permita desenvolver a capacidade de pesquisar e fazer análise minuciosa de informações, tornando-se apto a aprender significativamente, relacionando seu aprendizado com a vida, e não de forma mecanizada.

O Ensino da Física Moderna, proposto pelos PCN, objetiva sempre alcançar uma interação contínua da Física com os desenvolvimentos tecnológicos da atualidade. Nesse sentido, o processo de ensinar Física Moderna encontra uma série de barreiras, que há anos vêm sendo estudadas e elencadas na tentativa de se diagnosticar por que tão

poucos professores se sentem confortáveis em ensinar tais conteúdos (OLIVEIRA, 2007).

Segundo Leonel e Souza (2009), os conteúdos de física moderna são ignorados em boa parte da vivência escolar dos estudantes, o que é problemático, tendo em vista que o processo de alfabetização científica e tecnológica dos estudantes é severamente prejudicado. Além disso, os alunos não conseguem estabelecer conexões entre a sala de aula e seu cotidiano. De acordo com os autores, a Física permanece em um estado estagnado sem ultrapassar os limites da sala de aula.

Em seu dia a dia, o estudante é exposto à situações diversas nas quais a Física Moderna está presente em maior ou menor intensidade, e na maioria das vezes toma essas situações como interessantes e impressionantes, mas infelizmente não sabe exatamente a maneira com que o conteúdo se encaixa e fica a sensação de vazio, de querer saber mais daquela situação-problema, mas não tem base suficiente de Física Moderna. As dificuldades de abordagem são variadas, pequena carga horária para um longo conteúdo a ser estudado, ausência de materiais pedagógicos específicos, ou ainda o simples hábito estabelecido por alguns professores em não trabalhar este ramo da Física.

De acordo com Ostermann (2000, p.26):

É imprescindível que o estudante do ensino médio conheça os fundamentos da tecnologia atual, já que ela atua diretamente em sua vida e pode definir seu futuro profissional. É importante a introdução de conceitos básicos de Física Moderna e Contemporânea, e, em especial, fazer a ponte entre a física da sala de aula e a física do cotidiano.

E com isso, o estudante além de já estar diretamente conectado à tecnologia atual, terá também o entendimento do papel desempenhado pela Física, bem como de sua importância para o mundo, o que será seguido em consequência por uma maior valorização da ciência. Além disso, Ostermann (2000, p.24) ainda aponta que:

A tendência de atualizar-se o currículo de Física justifica-se pela influência crescente dos conteúdos contemporâneos para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a necessidade de formar um cidadão consciente e participativo que atue nesse mesmo mundo.

Nesse sentido, o estudante torna-se um sujeito ativo na construção da sociedade, pois ao ser capaz de acompanhar a evolução do conhecimento, ele participa diretamente das implicações e dos efeitos que esse conhecimento pode vir a gerar nesta.

Valadares e Moreira (1998, p. 121) ratificam a fundamental importância de o estudante do Ensino Médio conhecer as bases e fundamentos da tecnologia atual, pois ela atua diretamente em sua vida e certamente definirá o seu futuro profissional, tendo em vista que se trata de conhecimento cujas aplicações estarão sempre fazendo parte da sua vida.

Torre (1998 *apud* Ostermann, 2000, p.25) enuncia várias razões para justificar a necessidade de ensinar Física Moderna e Contemporânea na escola:

Conectar o estudante com sua própria história; protegê-lo do obscurantismo, das pseudociências e das charlatanias pós-modernas; que o aluno possa localizar corretamente o ser humano na escala temporal e espacial da natureza; Física Moderna e Contemporânea possui múltiplas e evidentes consequências tecnológicas; por sua beleza, pelo prazer do conhecimento, porque é uma parte inseparável da cultura, porque o saber nos faz livres e valoriza a humanidade.

Nessa perspectiva, no mundo contemporâneo se tornou comum utilizar áreas da Física Moderna para associá-la à pseudociência (coaching, astrologia, ufologia, espiritualidade quântica, terraplanismo e afins). A abordagem de seus conteúdos nas escolas pode promover aprendizagem necessária para preparar o aluno frente a essas circunstâncias.

Brockington e Pietrocola (2005, p.389) afirmam que o conhecimento ensinado nas escolas precisa estar alinhado com o conhecimento produzido pela Ciência:

Em cada época, é necessário que o conhecimento científico escolar esteja fundamentado no conhecimento produzido pelos cientistas, e que esse já tenha sido aceito de uma forma consensual pela comunidade científica. A pesquisa em Física induz a um Ensino de Física que deva, a princípio, ser sua própria imagem e semelhança.

Assim, a cada nova descoberta ou aprimoramento de resultados, o estudante deva estar ciente e atualizado das inovações científicas que permeiam sua vida, o que de certa forma também deve ocorrer de modo informal, tendo em mente que o aluno tem acesso através de noticiários e redes sociais. No entanto, toda essa informação precisa vir com um acompanhamento formal através das abordagens de conteúdos realizadas em sala de aula, no intuito de solidificar o embasamento teórico inerente a cada conhecimento novo produzido.

O PCN+ (2006) reforça que o conhecimento científico não pode ser simplesmente informativo:



Não se trata de apresentar ao jovem a Física para que ele simplesmente seja informado de sua existência, mas para que esse conhecimento se transforme em uma ferramenta a mais em suas formas de pensar e agir.

E ainda:

Trata-se de construir uma visão da Física que esteja voltada para a formação de um cidadão contemporâneo, atuante e solidário, com instrumentos para compreender, intervir e participar na realidade. Nesse sentido, mesmo os jovens que, após a conclusão do ensino médio não venham a ter mais qualquer contato escolar com o conhecimento em Física, em outras instâncias profissionais ou universitárias, ainda assim terão adquirido a formação necessária para compreender e participar do mundo em que vivem. PCN+ (2006).

O objetivo se faz, então, em fornecer oportunidades ao estudante, para que o mesmo seja capaz de desenvolver competências para transformar sua aprendizagem e conhecimento em ferramentas de uso para a vida diária, tornando-as parte das suas trocas de vivências na construção e transformação de sua realidade.

## Capítulo 4

### Teorias de Aprendizagem

#### 4.1 Teoria dos Campos Conceituais de Vergnaud

A teoria dos campos conceituais de Gerard Vergnaud é uma teoria cognitivista que visa fornecer um quadro coerente e alguns princípios de base para o estudo do desenvolvimento e da aprendizagem das competências complexas, sobretudo aquelas relacionadas com as ciências e as técnicas (Vergnaud, 1990). E para isso, toma como premissa o fato de que o conhecimento está organizado em campos conceituais, cujo domínio por parte dos sujeitos, ocorre durante um longo período de tempo, através de experiências, da maturidade e da aprendizagem (Vergnaud *apud* Fávero e Souza, 2001).

Dessa maneira, a teoria pressupõe a necessidade de situações e problemas, bem como de ações do sujeito sobre essas situações e problemas, para que seja construído o processo de aquisição do conhecimento, o conceito passa a adquirir sentido mediante uma situação-problema a ser solucionada, de modo que o problema central da cognição é a conceitualização, tendo em mente que o desenvolvimento cognitivo ocorre, em grande parte, através do desenvolvimento de um vasto repertório de esquemas (herança de Piaget), no intuito de capacitar o sujeito a enfrentar e dominar o conjunto de situações que lhe são apresentadas. Faz-se necessário, então, dedicar-se aos aspectos conceituais de situações que envolvem o desenvolvimento dos esquemas, dentro e fora da escola, visto que, o domínio de um campo conceitual não é um processo rápido, e suas dificuldades só serão superadas na medida em que forem enfrentadas, posto dessa maneira, novos problemas e propriedades devem ser estudadas ao longo dos anos, para que os alunos os dominem progressivamente.

Um Campo Conceitual é, em essência, um conjunto de situações e de conceitos ligados entre si, funcionando de maneira que o significado atribuído a um conceito não estará completamente baseado em apenas uma situação, mas em várias situações que devem ser analisadas com ajuda de outros conceitos.

A construção de um conceito envolve uma terna de conjuntos: situações, invariantes operatórios e representações simbólicas. As situações são as circunstâncias e contextos que produzem significado ao objeto em questão, os invariantes operatórios são as propriedades e procedimentos essenciais para a definição do objeto, fazendo a articulação entre teoria e prática baseando-se no sistema conceitos-em-ação e nos

teoremas-em-ação, as representações simbólicas estabelecem a relação do significado do objeto com as suas propriedades, por meio de linguagem falada, escrita, gráficos, fórmulas, diagramas, sentenças formais, etc.

Na Física, há vários campos conceituais: Mecânica, Termologia, Ondulatória, Óptica, Eletricidade, Física Moderna, etc. Nenhum deles pode ser ensinado de imediato, sendo necessário uma perspectiva desenvolvimentista para sua aprendizagem. Em se tratando de Física Moderna no ensino médio, os questionamentos e problemas abordados devem ter características diferentes dos abordados na Física Clássica, pois os objetos de estudo são de natureza diferentes, e as dificuldades enfrentadas em um campo conceitual não são necessariamente as mesmas em um outro campo. Isto sugere que não é possível evidenciar e analisar as dificuldades encontradas pelos estudantes sem levar em conta as especificidades dos conteúdos envolvidos em cada campo conceitual.

Deve-se, diante do exposto, analisar os conceitos de Física Moderna que capacitem o aluno a lidar com o seu mundo natural e social, incluindo os aspectos tecnológicos e culturais. Se os alunos ampliarem seus conceitos, de modo que estes os possibilitem a pensar em mais temas de Física Moderna e ainda possam compreender sistemas mais complexos, a profundidade adequada para o tratamento deste campo conceitual no ensino médio será guiada pelo interesse dos alunos e pela habilidade dos professores em motivar estas situações.

## **4.2 Teoria Sociointeracionista de Vygotsky**

Na concepção de Lev Vygotsky, um dos fatores essenciais, no que diz respeito à aprendizagem, é a interação social, permitindo com que haja uma troca de conhecimentos entre os envolvidos e uma mediação do saber por parte do indivíduo mais capaz (mediador) em relação ao indivíduo menos capaz. Como resultado da interação, tem-se o melhor desenvolvimento das potencialidades do aprendiz e uma consequente redução na Zona de Desenvolvimento Proximal (ZDP) do estudante. Entende-se a ZDP como a diferença entre o nível das atividades que a pessoa é capaz de fazer com a ajuda de outros (parceiro mais capaz, pai, mãe, professor, etc) – chamado de desenvolvimento potencial – e o nível das tarefas que pode fazer sem mediação – chamado de desenvolvimento real – em outras palavras, coisas para as quais necessita

de ajuda para desenvolver e coisas que a pessoa pode aprender sozinha. Como resultado, isto naturalmente leva ao aumento no número de problemas que se é capaz de solucionar por conta própria, tendo em vista o desenvolvimento de novas potencialidades, o que garante maior independência.

Para Vygotsky, todos os conceitos aprendidos na educação formal são classificados como científicos, enquanto que todos os conceitos originários de uma aprendizagem informal são classificados como espontâneos, porém, ele também destaca a unicidade cognitiva do processo de aquisição desses conceitos.

A criança utiliza conceitos espontâneos antes de compreendê-los conscientemente, ou seja, antes de ser capaz de defini-los e de operar com eles à vontade. Ela possui o conceito, conhece o objeto ao qual o conceito se refere, mas não está consciente do seu próprio pensamento. Já o desenvolvimento de conceitos científicos, por outro lado, tem uma trajetória oposta. Ele começa com sua definição verbal, formal, com sua aplicação em operações não-espontâneas.

A criança opera de início com esses conceitos a um nível de complexidade lógica que só será atingido pelos conceitos espontâneos no final de seu desenvolvimento. Em compensação, apenas após um longo período de tempo a criança pode ter em relação ao conceito científico, o mesmo domínio e familiaridade que possui em relação aos conceitos espontâneos. Pode-se dizer que, o desenvolvimento dos conceitos espontâneos na criança é ascendente, enquanto o de conceitos científicos é descendente. Isto implica novamente que o aluno deve ser considerado ativo no processo de construção de conhecimento, de maneira que o educador será o suporte, interferindo diretamente na ZDP do estudante com metodologias, para que a aprendizagem seja satisfatória.

O trabalho pedagógico, nesse sentido, precisa estar associado à capacidade de progressões no desenvolvimento do aluno. Para isso, a escola deve estar atenta ao estudante, valorizar seus conhecimentos prévios, trabalhando a partir deles, estimulando suas potencialidades e possibilitando a ele superar suas capacidades e ir além com seu desenvolvimento e aprendizado.

## Capítulo 5

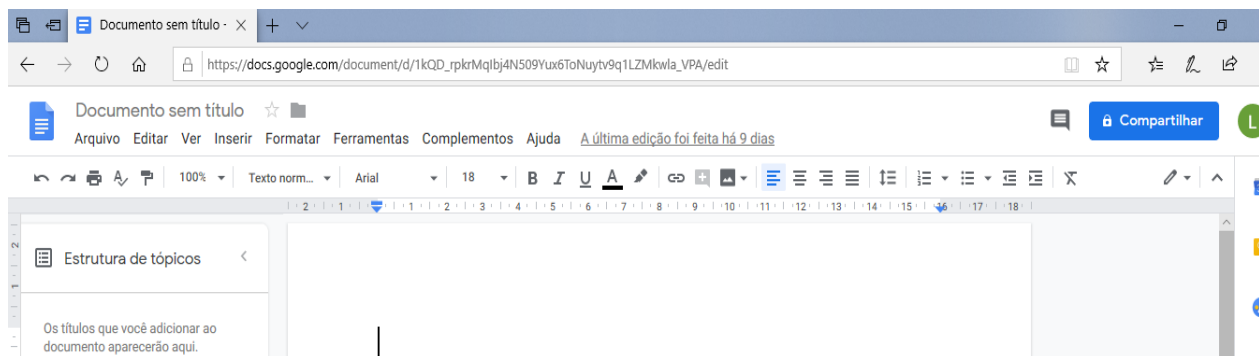
### O Produto Educacional

O seguinte produto consiste em um *E-book* com a finalidade de ser utilizado como ferramenta educacional no Ensino de Física Moderna, mais precisamente sobre a Teoria da Relatividade Especial, tendo em vista ser um conteúdo de tão pouca projeção no Ensino Médio, mas de tão grande importância para o desenvolvimento da sociedade, seja em seus aspectos tecnológicos e culturais, como também em seus aspectos de esclarecimento científico acerca da realidade em que vivemos.

#### 5.1 Ferramentas

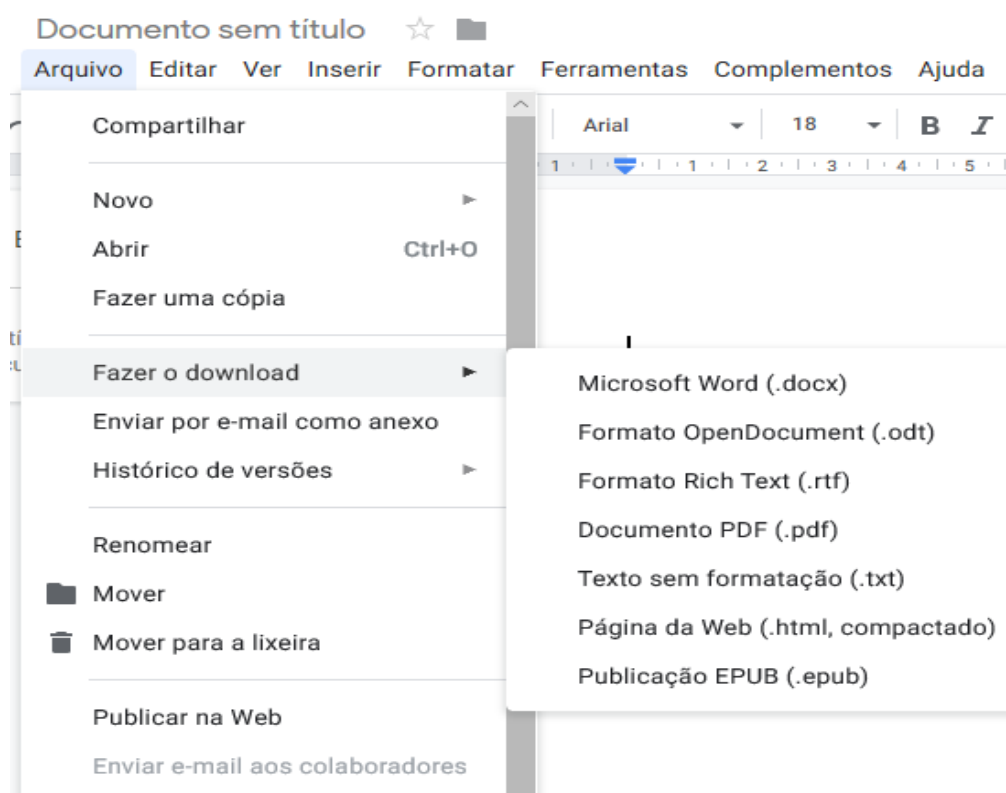
Para a construção do *E-book*, utilizou-se da plataforma *Google Docs*, a qual permite a inserção e edição de documentos *online*, possibilitando seu compartilhamento com a lista de contatos do *Gmail* do usuário. O funcionamento de seus aplicativos possui compatibilidade com o *Microsoft Office*, *KOffice*, *BrOffice.org* e *OpenOffice.org* e, dentre outras funções, possui editor de formulários, planilhas, apresentação e texto.

Figura 14. Página do Google Docs



Entre as suas possibilidades de conversão, está o formato *EPub*, utilizado para a confecção deste *E-book*:

Figura 15. Download no formato Epub



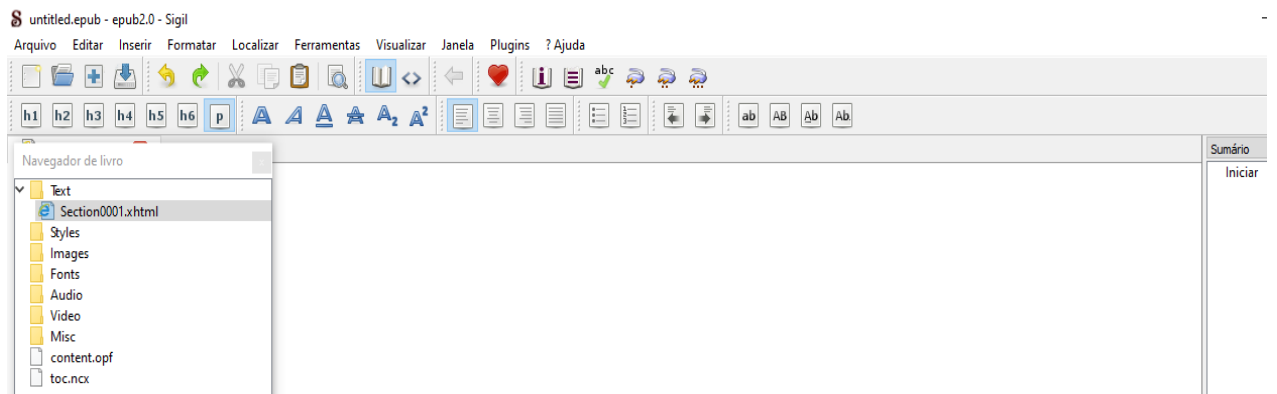
O *EPub* (*Electronic Publication*) é um formato padrão específico para livros digitais. Trata-se de um arquivo produzido em XHTML, que utiliza os mesmos códigos aplicados para a produção de páginas simples na Internet (HTML), sendo acompanhado de uma folha de estilos para controle de seu design e diagramação.

A linguagem XHTML e a simplicidade do formato permitem a leitura do livro para uma grande quantidade de aparelhos e programas. Para qualquer tipo de tela em que seja lido, o texto do livro é redimensionado automaticamente para o tamanho da tela, o tamanho da fonte pode ser aumentado ou diminuído, assim como o tamanho da página também pode ser alargado ou reduzido.

Há vários programas compatíveis para a leitura de arquivos *EPub*. No sistema Windows, eles podem ser lidos com Calibre ou Adobe Digital Editions, enquanto que no Android, o mais utilizado é o Aldiko. Para ler em iPhone ou iPad utiliza-se o aplicativo *iBooks*.

A capa do *E-book* foi adicionada utilizando o aplicativo Sigil, um software livre que permite a edição de arquivos no formato *EPub*, e disponível para várias plataformas.

Figura 16. Tela do Sigil



## 5.2 O E-Book

A capa do livro, inserida com o software Sigil:

Figura 17. Capa do E-book Física Moderna: A Teoria da Relatividade Especial



Abrindo o *E-book* com o Calibre e pressionando o botão direito do mouse, uma barra de ferramentas é disponibilizada. Entre as opções de como alterar a fonte, ativar modo de tela cheia, é possível abrir um Sumário, o que possibilita ir diretamente aos tópicos de interesse ao clicar no respectivo item:

Figura 18. Barra de ferramentas do aplicativo Calibre

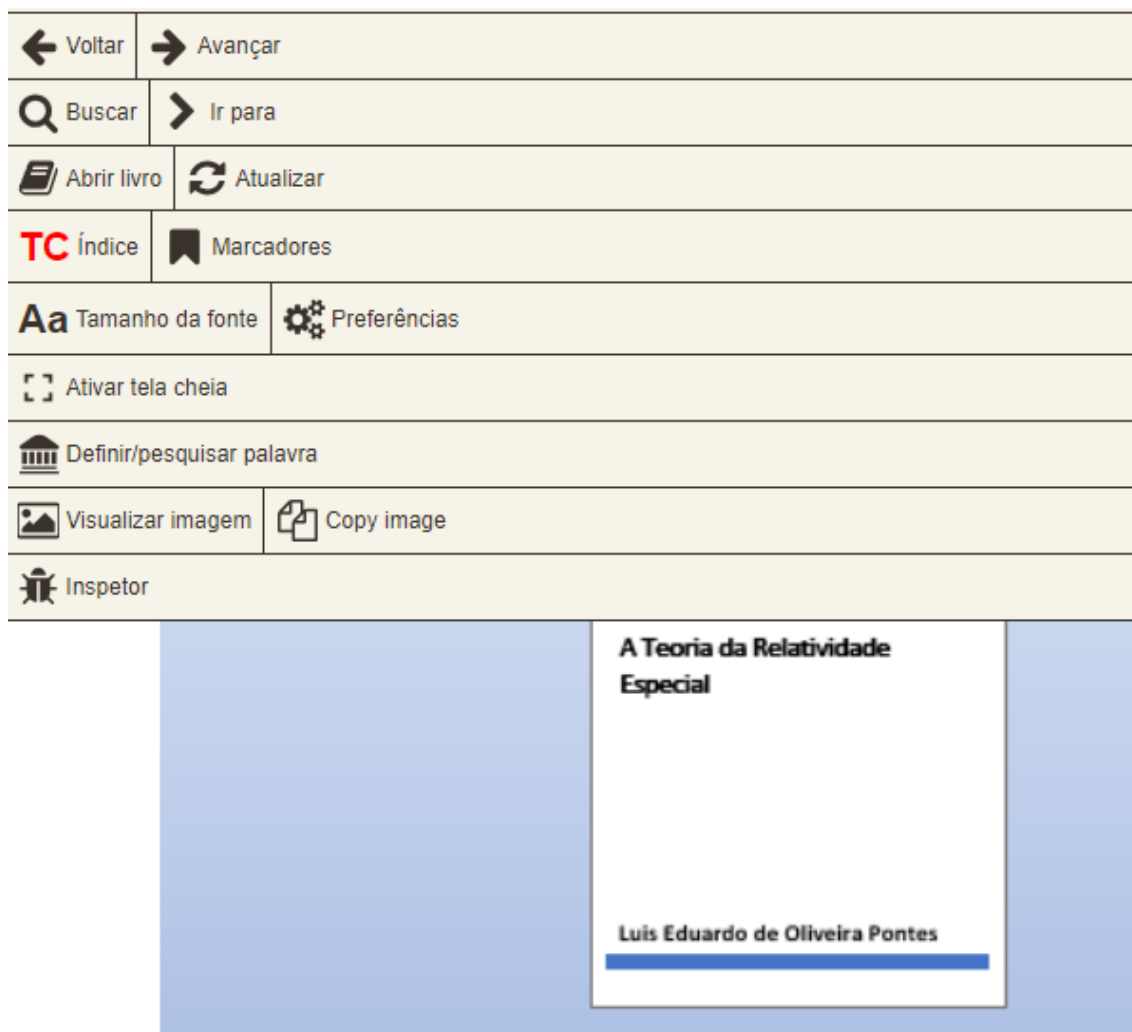
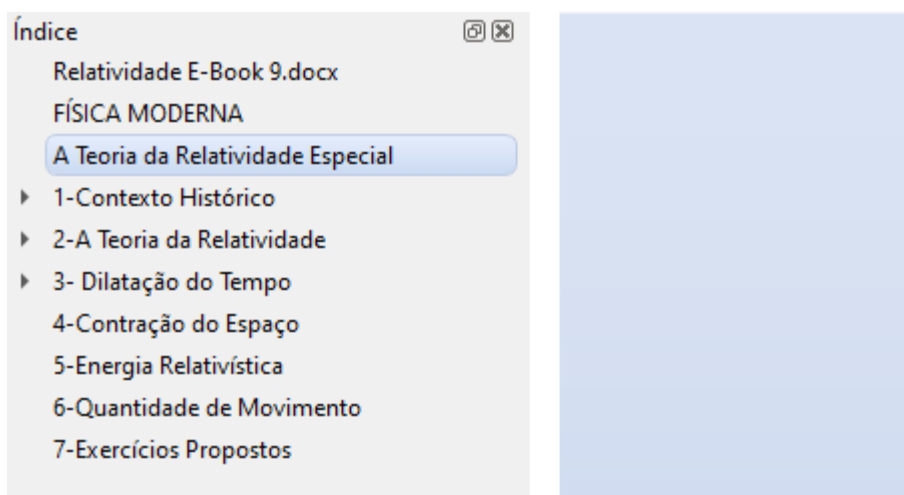


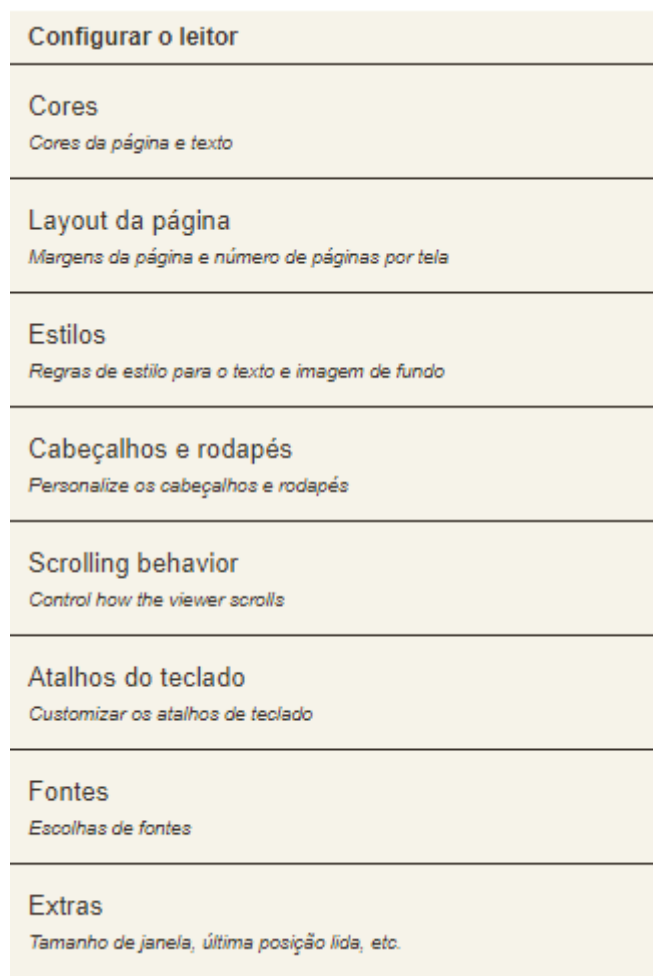


Figura 19. Sumário fornecido pelo Calibre



A aba de Preferências permite várias reconfigurações de leitura, entre elas, alterar as cores das páginas e texto, mudar o *layout* para o modo de texto corrido, acrescentar imagem de fundo e alterar os estilos de texto.

Figura 20. Aba de preferências do Calibre



O segundo Sumário abaixo foi gerado automaticamente pelo Sigil e também possibilita o atalho direto para os conteúdos selecionados:

Figura 21. Sumário fornecido pelo Sigil

1. [Relatividade E-Book 9.docx](#)
2. [FÍSICA MODERNA](#)
3. [A Teoria da Relatividade Especial](#)
4. [1-Contexto Histórico](#)
  1. [1.1 A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON E MORLEY](#)
5. [2-A Teoria da Relatividade](#)
  1. [2.1-POSTULADOS DA RELATIVIDADE](#)
  2. [2.2-TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ](#)
  3. [2.3-ADIÇÃO DE VELOCIDADES](#)
6. [3- Dilatação do Tempo](#)
  1. [3.1 - RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE](#)
  2. [3.2 - EFEITO DOPPLER RELATIVÍSTICO](#)
  3. [3.3 - O PARADOXO DOS GÊMEOS](#)
7. [4-Contração do Espaço](#)
8. [5-Energia Relativística](#)
9. [6-Quantidade de Movimento](#)
10. [7-Exercícios Propostos](#)

A figura a seguir representa as primeiras páginas do *E-book*, contextualizando o surgimento da Física Moderna:

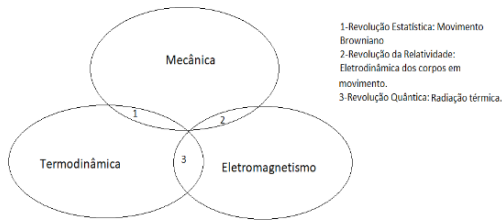
Figura 22. Páginas iniciais do texto do *E-book*

# FÍSICA MODERNA A Teoria da Relatividade Especial

## 1-Contexto Histórico

Do final do século XIX ao início do século XX, muitos cientistas acreditavam que a Física já estava em fase de descobertas finais. Com o conhecimento relacionado às principais áreas da Física Clássica – Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo, fazia-se pensar que não havia mais o que ser descoberto, apenas aumentar a precisão das medidas obtidas. Porém, alguns fenômenos possuíam questionamentos ainda não esclarecidos, problemas que ficavam na fronteira de domínio dos Campos Conceituais da Física Clássica.

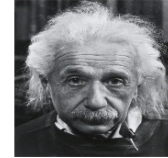
Figura 1 Principais ramos da Física



Fonte: Física, Kazuhito & Fuke

As tentativas de solucionar tais problemas serviram como ponto de partida que culminaram na produção de conhecimento – Mecânica Estatística, Mecânica Quântica e a Teoria da Relatividade – que hoje conhecemos como Física Moderna, uma revolução do pensamento clássico. Em 1905, Albert Einstein propôs postulados que esclareciam certas questões de fronteira, o que trouxe consequências conceituais para o espaço e o tempo, conceitos que até então eram considerados absolutos e adquiriram caráter relativo, dando forma à chamada Teoria da Relatividade Especial de Einstein.

Figura 2 Albert Einstein



Fonte: probaway.wordpress.com

Tal teoria gerou ainda mais questionamentos. Com o desenvolvimento científico, alguns foram respondidos ao longo dos anos, outros permanecem em aberto até hoje.

### 1.1 A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON E MORLEY

Devido à visão mecânica do mundo ser dominante na época, não se aceitava que uma onda eletromagnética pudesse se propagar no vácuo, imaginava-se que essas ondas precisavam de um meio de propagação tal como uma onda mecânica. Nesse sentido, postulou-se a existência de uma...

Abaixo, a ilustração exemplifica a consequência da Dilatação do Tempo:

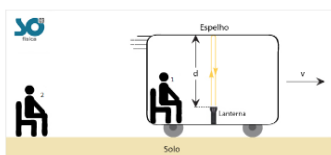
Figura 23. Páginas sobre Dilatação do Tempo

## 3- Dilatação do Tempo

Na Física Clássica, tempo e espaço são grandezas de caráter absoluto, o senso comum faz com que a ideia de que o tempo flui em intervalos diferentes dependendo do referencial, não tenha aceitação intuitiva. Para que a luz tenha velocidade constante independente do movimento da fonte, foi necessária uma reinterpretação nos conceitos de tempo e espaço.

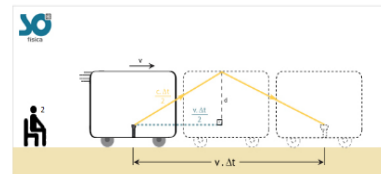
Para essa reinterpretação, vamos considerar uma experiência de pensamento, um evento imaginado, constituindo-se de um carrinho se deslocando entre dois pontos P1 e P2, com uma fonte F de luz no chão do carrinho, que emite luz até um espelho plano E no teto. Vamos analisar a situação do ponto de vista de um observador 1 (dentro do carrinho) e de um observador 2 (fora do carrinho), conforme mostra a figura abaixo:

Figura 4 Evento. Visão do observador 1



Fonte: [www.softsica.com.br](http://www.softsica.com.br). Modificada pelo autor

Figura 5 Evento. Visão do observador 2



Fonte: [www.softsica.com.br](http://www.softsica.com.br). Modificada pelo autor

Para o observador 1, o tempo para o raio de luz sair da fonte, ir ao espelho no teto e voltar é dado por:

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

No qual  $c$  é a velocidade da luz e  $d$  é a distância da fonte ao espelho.

Para o observador 2, este tempo  $\Delta t$  é maior, visto que o percurso efetuado pela luz é maior do seu ponto de vista.

O percurso total da luz para o observador 2 é  $c\Delta t$ , de modo que cada trecho de percurso vale  $\frac{c\Delta t}{2}$ .

A distância entre os pontos P1 e P2 na figura é  $v\Delta t$ , de modo que cada trecho de percurso vale  $\frac{v\Delta t}{2}$ . Temos então o seguinte triângulo retângulo:

A seguir, páginas referentes ao Paradoxo dos Gêmeos:

Figura 24. Páginas sobre o Paradoxo dos Gêmeos

Onde  $\beta$ , representa o parâmetro de velocidades  $\beta = \frac{v}{c}$ . Caso, observador e fonte estiverem se aproximando, temos:

$$f' = f \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

[SAIBA MAIS: O Redshift Gravitacional](#)

### 3.3 - O PARADOXO DOS GÊMEOS

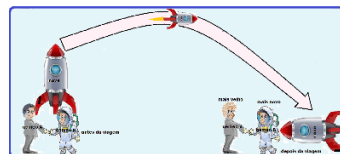
Trata-se de uma experiência de pensamento utilizada para ilustrar a dilatação temporal. Considera-se dois irmãos gêmeos, Isaac e Alberto com 20 anos de idade. Isaac faz uma viagem interplanetária, a uma velocidade que corresponde a 60% da velocidade da luz, por tempo de 10 anos, nesse período, Alberto permanece na Terra. Após retornar à Terra, Isaac está com 30 anos. Por se tratarem de gêmeos espera-se que Alberto esteja com a mesma idade, porém, pela Teoria da Relatividade, o tempo dilata no referencial de Alberto, do ponto de vista dele, tudo o que ocorre com Isaac é mais devagar, de modo que Alberto envelhece mais do que Isaac, estando assim, com idade superior a 30 anos, mais precisamente, considerando o intervalo de tempo próprio, no referencial de Isaac como 10 anos e velocidade  $v = 0,6c$ , teremos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{10}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}} = \frac{10}{\sqrt{1 - 0,36}} = \frac{10}{\sqrt{0,64}} = \frac{10}{0,8}$$

$$\Delta t = 12,5 \text{ anos}$$

Isto é, Alberto estará com 32,5 anos.

Figura 7 Paradoxo dos gêmeos



Fonte: fisicaevestibular.com.br

Analisando o problema do ponto de vista de Isaac, ele está parado na nave, e é Alberto quem viaja na velocidade citada, junto com a Terra. Nessas condições, o tempo dilata no referencial de Isaac, que estará mais velho ao se reencontrar com o irmão. O paradoxo consiste na questão de qual dos irmãos estaria de fato mais velho. A questão aqui, é que as duas situações não são simétricas, somente do ponto de vista de Alberto está de acordo com a Relatividade, pois ele permaneceu em um referencial inercial. Como a nave de Isaac precisa de aceleração, seja no início da viagem, durante o retorno e na chegada à Terra, ele se encontra em um referencial não inercial. Posições e velocidades são

Ao longo do *E-book*, vários tópicos vêm acompanhados de hiperlinks que redirecionam para textos e vídeos com informações adicionais na Internet. Entre os conteúdos dos hiperlinks, têm-se textos complementares abordando: A relação do GPS com a Relatividade, A partícula múon, O redshift gravitacional, A relação de Einstein com a bomba atômica, Energia Nuclear, LHC e os aceleradores de partículas em geral, exemplos variados de relatividade no cotidiano, além de vídeos ilustrando o Paradoxo dos Gêmeos.

A próxima figura, representa parte do tópico de Energia.

Figura 25. Página sobre equivalência matéria-energia

Figura 8 Equivalência Matéria-Energia



Fonte: fisicaevestibular.com.br

[SAIBA MAIS: Einstein e a Bomba Atômica](#)

[SAIBA MAIS: Bomba Atômica](#)

[SAIBA MAIS: Energia Nuclear](#)

[SAIBA MAIS: Aceleradores de Partículas](#)

[SAIBA MAIS: O LHC](#)

[SAIBA MAIS: LHC e Naves Espaciais](#)

Um click no hiperlink redireciona o conteúdo para seguinte página:

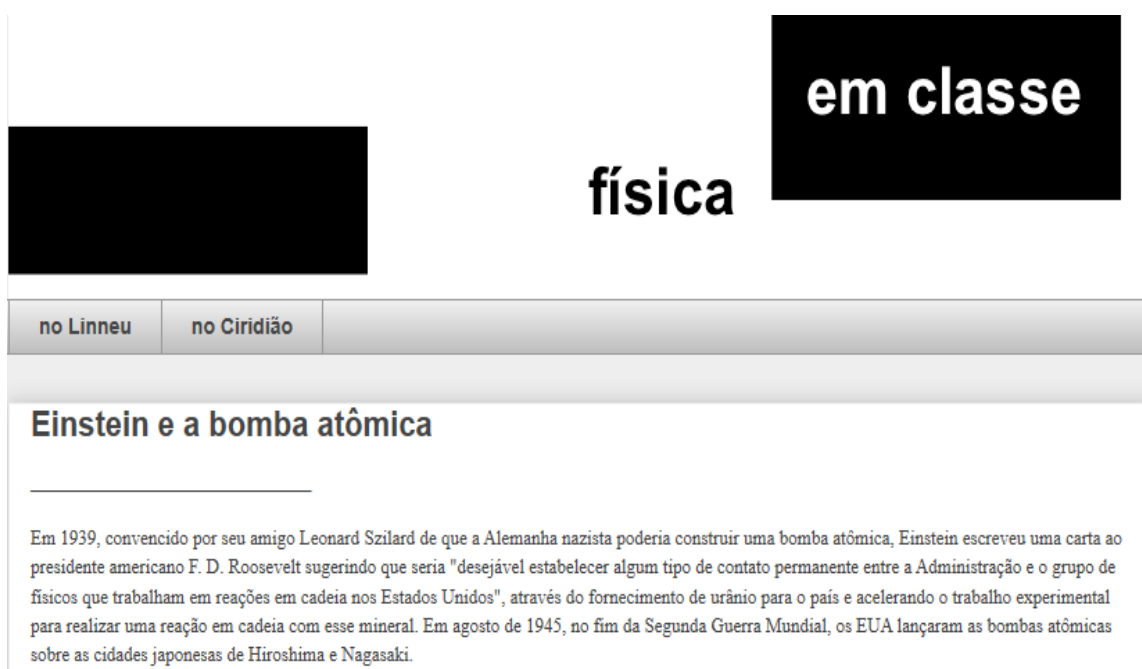
Figura 26. Página de redirecionamento

**Aviso de redirecionamento**

A página na qual você estava está tentando levar você para <https://fisicaemclasse.blogspot.com/2015/09/einstein-e-bomba-atomica.html>.  
Se você não quiser visitar essa página, poderá [voltar à página anterior](#).

Este link, por sua vez, leva a informações complementares de vários sites, por exemplo, o blog Física em Classe, caso se click no hiperlink sobre “Einstein e a Bomba Atômica”:

Figura 27. Página do blog Física em Classe



**física em classe**

no Linneu    no Ciriidão

## Einstein e a bomba atômica

Em 1939, convencido por seu amigo Leonard Szilard de que a Alemanha nazista poderia construir uma bomba atômica, Einstein escreveu uma carta ao presidente americano F. D. Roosevelt sugerindo que seria "desejável estabelecer algum tipo de contato permanente entre a Administração e o grupo de físicos que trabalham em reações em cadeia nos Estados Unidos", através do fornecimento de urânio para o país e acelerando o trabalho experimental para realizar uma reação em cadeia com esse mineral. Em agosto de 1945, no fim da Segunda Guerra Mundial, os EUA lançaram as bombas atômicas sobre as cidades japonesas de Hiroshima e Nagasaki.

Fonte: [fisicaemclasse.blogspot.com.br](https://fisicaemclasse.blogspot.com.br)

A seguir, a página contendo Exercícios Propostos, para a verificação de aprendizagem e memorização:

## 7-Exercícios Propostos

1-A teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente do estado de movimento relativo entre eles. Com base nessa afirmação, imagine duas naves que viajam no espaço com velocidades altíssimas em uma mesma direção, mas com sentidos opostos. Se cada nave possui velocidade  $V$  e a velocidade da luz no vácuo é  $c$ , a luz percebida pelo piloto teria velocidade:

- a)  $V + c$
- b)  $c - V$
- c)  $V - c$
- d)  $c$
- e)  $2c$

2- O campo de estudo dedicado à medida de eventos, onde e quando ocorrem e qual a distância que os separa no espaço e no tempo, é a relatividade. Em 1905, Albert Einstein propôs a teoria da relatividade restrita, em que o adjetivo "restrita" é usado para indicar que a teoria se aplica somente a referenciais inerciais. A teoria da relatividade restrita é composta basicamente de dois postulados: postulado da relatividade; e postulado da velocidade da luz.

Com base no texto acima, assinale a alternativa correta.

- a) De acordo com os postulados, não pode existir, na natureza, uma velocidade limite. A velocidade irá depender da direção e do referencial onde se encontra o objeto em movimento
- b) A relatividade relaciona valores medidos e referenciais que não estão se movendo em relação a outro.

Figura 29. Página de Exercícios

- b)  $c - v$
- c)  $v - c$
- d)  $c$
- e)  $2c$

2- O campo de estudo dedicado à medida de eventos, onde e quando ocorrem e qual a distância que os separa no espaço e no tempo, é a relatividade. Em 1905, Albert Einstein propôs a teoria da relatividade restrita, em que o adjetivo “restrita” é usado para indicar que a teoria se aplica somente a referenciais inerciais. A teoria da relatividade restrita é composta basicamente de dois postulados: postulado da relatividade; e postulado da velocidade da luz.

Com base no texto acima, assinale a alternativa correta.

- a) De acordo com os postulados, não pode existir, na natureza, uma velocidade limite. A velocidade irá depender da direção e do referencial onde se encontra o objeto em movimento
- b) A relatividade relaciona valores medidos e referenciais que não estão se movendo em relação a outro.
- c) A velocidade da luz não é constante para todos os observadores; depende do referencial inercial em que se situa o observador.
- d) Referenciais inerciais são aqueles em que as três leis de Newton não são válidas.

e) As leis da física são as mesmas para diferentes referenciais inerciais

3- (UEPB-PB) A relatividade proposta por Galileu e Newton na Física Clássica é reinterpretada pela Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e não inerciais).

Ainda acerca do assunto tratado no texto, resolva a seguinte situação-problema: Considere uma situação “fictícia”, que se configura como uma exemplificação da relatividade do tempo.

Um grupo de astronautas decide viajar numa nave espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos no relógio da nave.

Quando retornam à Terra, verifica-se que aqui se passaram alguns anos.

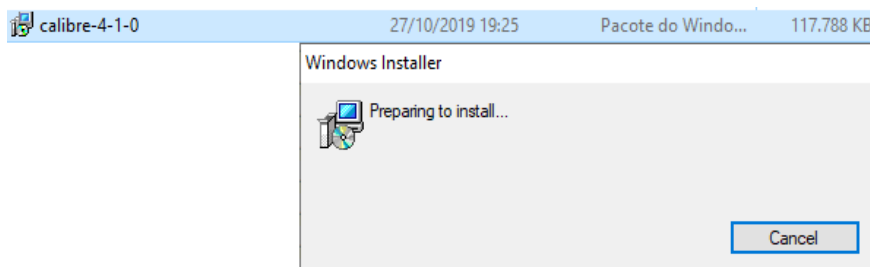
Considerando que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e que a velocidade média da nave é  $0,8c$ , é correto afirmar que, ao retornarem à Terra, se passaram:

- a) 20 anos
- b) 10 anos
- c) 30 anos
- d) 12 anos

### 5.3 Visualização do Arquivo EPub

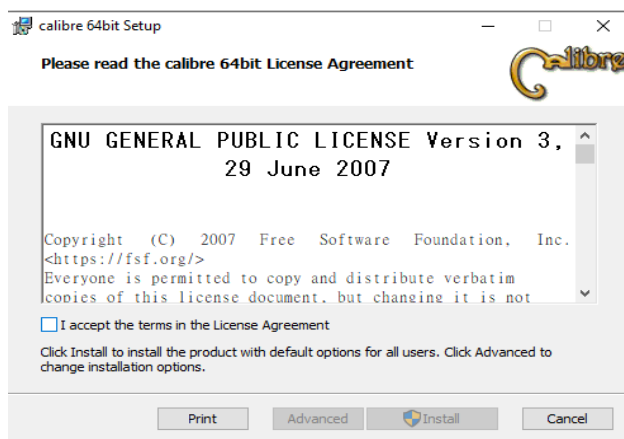
Para a visualização do *e-book* pelo computador, recomenda-se a opção pelo aplicativo Calibre. Uma vez que o programa esteja baixado no computador, um duplo click sobre o arquivo abrirá a seguinte janela:

Figura 30. Instalador do Calibre



a qual será seguida pela janela abaixo:

Figura 31. Termos de Licença



Marca-se a opção “*I accept the terms in the License Agreement*”.

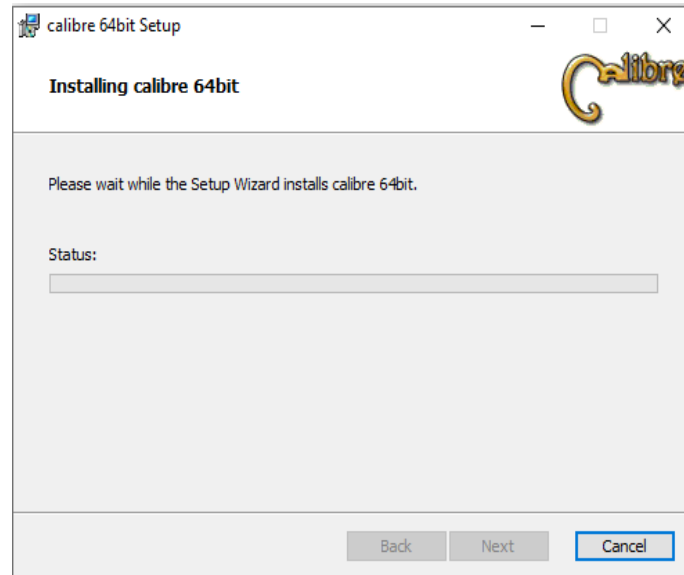
A marcação irá habilitar a opção “*Install*” abaixo, que deverá receber um click:

Figura 32. Opção para instalar o Calibre



O click irá abrir a janela com aviso de instalação abaixo:

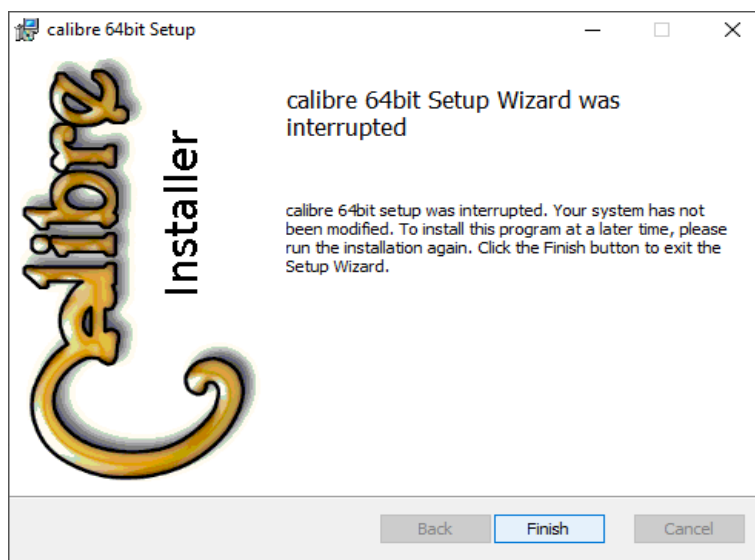
Figura 33. Calibre sendo instalado



que por sua vez, irá abrir a janela abaixo, na qual se deverá clicar em “*Finish*”



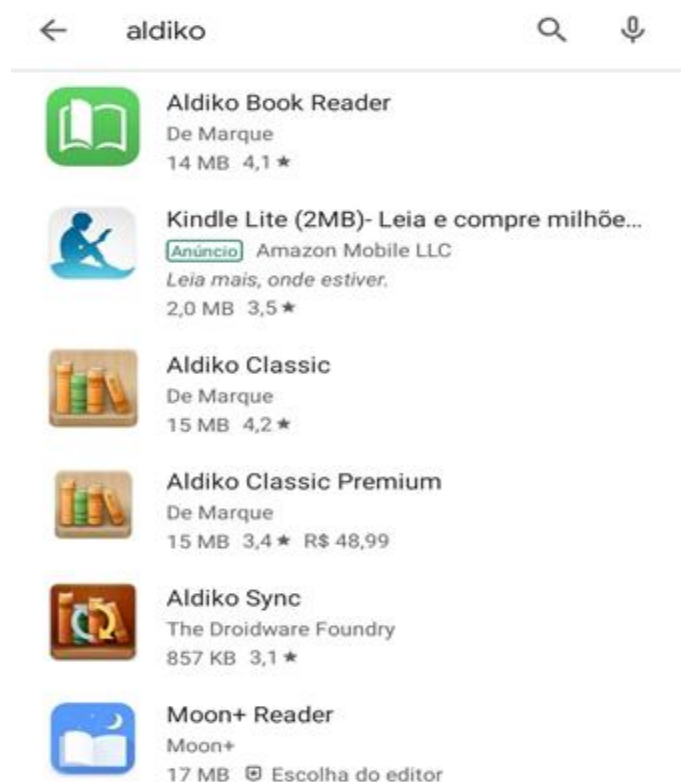
Figura 34. Passo final de instalação



concluindo, assim, a instalação e habilitando a leitura do *e-book* pelo computador.

Para a visualização do *e-book* no Android, recomenda-se a opção pelo aplicativo Aldiko. Pesquisando pelo aplicativo no Play Store, ficarão disponíveis as seguintes opções, dentre as quais se escolherá a Aldiko Book Reader:

Figura 35. Opções no Play Store



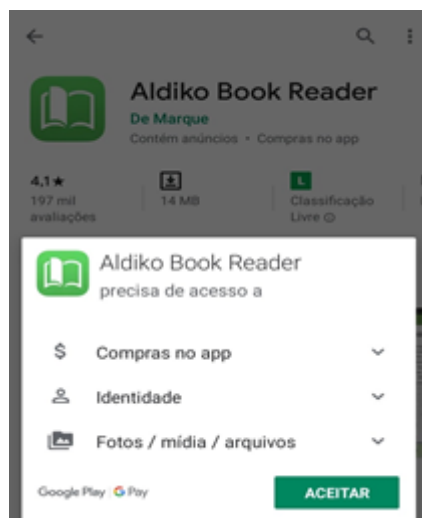
em seguida, clica-se em instalar:

Figura 36. Instalador do Aldiko



irá aparecer a seguinte tela, na qual deve-se clicar em aceitar:

Figura 37. Termos de Licença



a instalação será iniciada, conforme a tela seguinte:

Figura 38. Início da instalação



e em processo de finalização:

Figura 39. Final da instalação



A tela abaixo indica que a instalação foi concluída e, assim, a leitura do *e-book* pelo celular já estará habilitada.

Figura 40. Opção de abrir o aplicativo



## Capítulo 6

### Metodologia de Aplicação

O produto educacional foi desenvolvido tendo em vista a aplicação em turmas de 3º ano do Ensino Médio, objetivando o ensino e aprendizagem do conteúdo de Física Moderna, com foco na Teoria da Relatividade Especial. A aplicação foi realizada com as turmas do 3º ano matutino do Centro de Ensino Joviana Silva Farias, e com o 3º ano vespertino do Centro de Ensino Dom Marcelino Bicego, em Açailândia – MA. O conteúdo foi escolhido com a finalidade de difundir o ensino de Física Moderna, considerando um ramo da Física de fundamental importância para o desenvolvimento científico e tecnológico no mundo, mas que é tão pouco explorado a nível médio.

Todos os alunos estavam cientes das razões da aplicação do produto, se tratando de um projeto de pesquisa em ensino de Física. No decorrer do processo, utilizou-se de uma sequência didática, observando o interesse e desempenho dos alunos na busca, compreensão e aceitação de informações. No intuito de motivar a participação, utilizou-se parte das atividades previstas da sequência didática como itens avaliativos referentes ao bimestre letivo.

#### 6.1 Sequência Didática

##### 6.1.1 Tema Estruturador

- Teoria da Relatividade Especial

##### 6.1.2 Conteúdos

- Os Postulados da Relatividade
- A Dilatação do Tempo
- A Contração do Espaço
- Energia Relativística

##### 6.1.3 Habilidades

- Identificar as diferenças conceituais da Física Moderna em relação à Física Clássica.
- Identificar e analisar as principais consequências trazidas pela Teoria da Relatividade Especial.
- Compreender a Teoria da Relatividade como uma teoria de maior generalidade, que abrange a Mecânica de Newton, sem refutá-la.
- Reconhecer condições para as quais os efeitos relativísticos são consideráveis.
- Aplicar as equações relativísticas para o cálculo de tempo, espaço e energia.

#### *6.1.4 Pré-requisitos e conhecimentos prévios*

- Ondas Eletromagnéticas
- Princípios da Óptica Geométrica
- Cinemática
- Energia Mecânica

#### *6.1.5 Recursos*

- *E-book*
- Datashow
- Caixa de som
- Celular
- Pincel
- Quadro
- Apagador

#### *6.1.6 Apresentação da situação problemática*

- Questionamentos sobre: funcionamento do GPS, bomba atômica, energia atômica e nuclear, a partícula *múon*, TV de tubo e demais aplicações, seguido pela exibição do documentário “Albert Einstein – Canal Nostalgia”.

#### *6.1.7 Problemas ou questões*

- Seguem no Apêndice A

#### *6.1.8 Fontes de informação*

- *E-book*
- Livro didático
- Textos e vídeos da Internet
- Discussões com os demais alunos em sala

#### *6.1.9 Exercícios de memorização*

- Seguem no Anexo I

### **6.2 Cronograma**

O terceiro ano do Ensino Médio possui 3 horários de Física em uma semana, sendo cada horário, com a duração de 50 minutos. No caso em questão, dispõe-se da facilidade de que todas as aulas nessas respectivas turmas estão organizadas da mesma maneira no horário escolar, sendo 2 horários seguidos nos dias de segunda-feira e 1 horário nos dias de terça-feira, possibilitando maior uniformidade no cumprimento do seguinte cronograma de trabalho proposto:

- 23/09: Exibição do documentário “Albert Einstein – Canal Nostalgia”
- 24/09: Aplicação de um Pré-teste (Questionário 1)
- 24/09 a 29/09: Trabalho de pesquisa sobre ramos da Física Clássica e Moderna e Leitura prévia em casa dos tópicos do *e-book* sobre o conteúdo a ser abordado na aula seguinte.
- 30/09: Aula Expositiva 1
- 01/10: Aula Expositiva 2
- 01/10 a 06/10: Leitura prévia em casa dos tópicos do *e-book* sobre o conteúdo a ser abordado na aula seguinte
- 07/10: Aula Expositiva 3
- 08/10: Aplicação de uma Atividade de Verificação (Questionário 2)
- 08/10 a 13/10: Leitura de revisão em casa
- 14/10: Exercícios de Memorização do final do *e-book*.

A problematização, com seus questionamentos e práticas sociais tem um papel motivador na efetivação do ensino e aprendizagem. Segundo Delizoicov (2002), *apud* Gehlen (2012):

“A abordagem dos conceitos científicos é ponto de chegada, quer da estruturação do conteúdo programático quer da aprendizagem dos alunos, ficando o ponto de partida com os temas e as situações significativas que originam, de um lado, a seleção e organização do rol de conteúdo, ao serem articulados com a estrutura do conhecimento científico, e, de outro, o início do processo dialógico e problematizador.”

Após a compreensão do problema, o estudante tem motivação e melhor capacidade para trabalhar os conceitos físicos envolvidos, desenvolvendo a habilidade de selecionar os conteúdos necessários para a compreensão de uma situação ou

fenômeno específico e, assim, organizar o conhecimento científico de forma significativa.

Nessa perspectiva, iniciou-se pelos questionamentos levantados, seguidos pela exibição do documentário “Albert Einstein – Canal Nostalgia”, disponível no *youtube*, com o intuito de despertar o interesse e curiosidade pelo tema tratado. Na aula seguinte, foi aplicado um pré-teste (Questionário 1, do Apêndice A) com perguntas intuitivas, a fim de analisar o quanto de conhecimento prévio se tinha sobre o assunto, ou mesmo adquirido com o documentário.

No decorrer do restante da semana, os alunos realizaram pesquisa sobre as principais áreas da Física Clássica e da Física Moderna estabelecendo as principais diferenças entre esses campos conceituais e escolhendo uma das áreas da Física Moderna para aprofundamento na pesquisa. Paralelamente a isso, eles utilizaram o *e-book* como mediador de informações para realizar uma leitura prévia em casa sobre os tópicos a serem abordados pelo professor nas Aulas Expositivas 1 e 2, as quais ocorreram em dias sequenciais. Aconselhou-se, também, a leitura e visualização dos vídeos disponíveis nos *hiperlinks* do *e-book*, a fim de obter maior contextualização do conteúdo.

A primeira aula expositiva, que somava 1h40min de duração, foi programada para tratar dos Postulados da Relatividade e da Dilatação do Tempo, enquanto que a segunda aula expositiva, de 50min, foi planejada para abordar a Contração do Espaço, havendo ajustes de conteúdo com o tempo conforme a necessidade. Novamente, o restante da semana foi utilizado para a leitura prévia do conteúdo seguinte através do *e-book*, e a terceira aula expositiva, de 1h40min, foi planejada para tratar essencialmente de Energia Relativística.

Posteriormente, foi aplicada uma atividade de verificação de aprendizagem, num primeiro momento (Questionário 2, do Apêndice A). O restante da semana foi utilizado para uma revisão de conteúdo, com a finalidade de realizar os Exercícios Propostos ao final do *e-book* (Anexo I), em sala de aula e, dessa forma, concluindo o processo de aplicação. Os alunos não foram informados de que a atividade a ser realizada na conclusão desta etapa corresponderia, justamente, aos Exercícios do *e-book*.



## Capítulo 7

### Resultados

Na fase da problematização, observou-se que boa parte dos estudantes, se não todos, tem em mente a ideia pré-estabelecida da importância das realizações de Albert Einstein para o mundo contemporâneo, mesmo que não se faça, num primeiro momento, uma relação direta com os questionamentos levantados. A exibição do documentário se mostrou fortemente despertadora de interesse, levando a maiores curiosidades, fomentadas pela conscientização dos impactos científicos que as descobertas de Einstein viriam a ter, o que os deixou ainda mais esclarecidos quanto à relevância do tema estruturador a ser trabalhado.

A aplicação do primeiro questionário teve como objetivo aferir o quanto os alunos já conheciam previamente sobre o tema, ou por ter ouvido falar a respeito, ou por ter tido acesso a informações relacionadas em filmes, noticiários, revistas e demais meios alternativos. Para cada questionário em cada turma, verificou-se quatro padrões de resposta: corretas, parcialmente corretas, erradas e sem resposta (em branco). A seguir, os resultados para o primeiro questionário.

Turma 3A Matutino: 39 alunos

Questionário 1: 35 presentes

Tabela 1. Padrões de resposta da turma 3A matutino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	35	0	0	0
02	17	18	0	0
03	8	12	4	11
04	4	6	14	11
05	11	4	19	1
06	6	5	8	16
07	8	7	13	7

Graficamente, teremos, para cada tipo de resposta:

Figura 41. Respostas corretas da turma 3A matutino

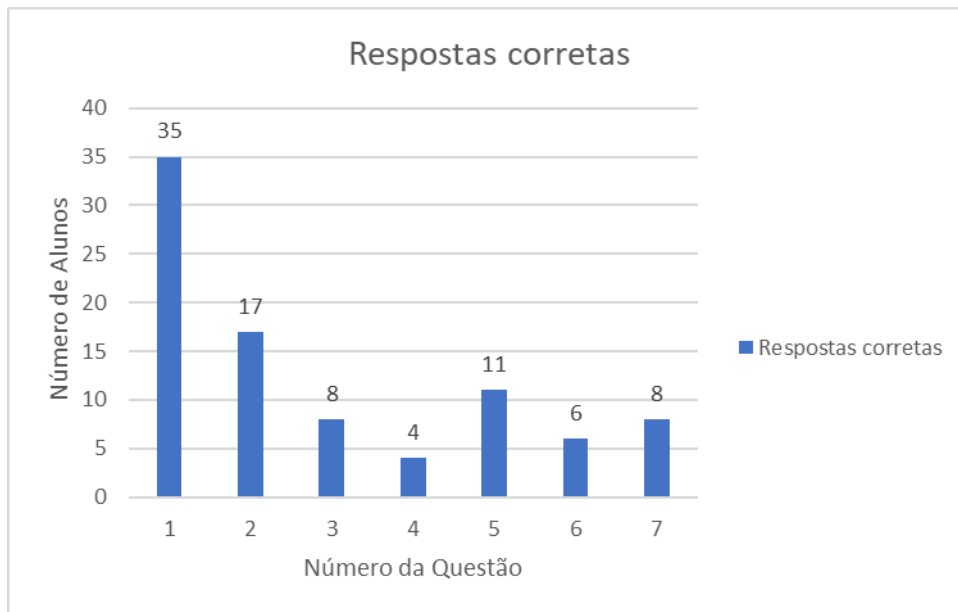


Figura 42. Respostas parcialmente corretas da turma 3A matutino

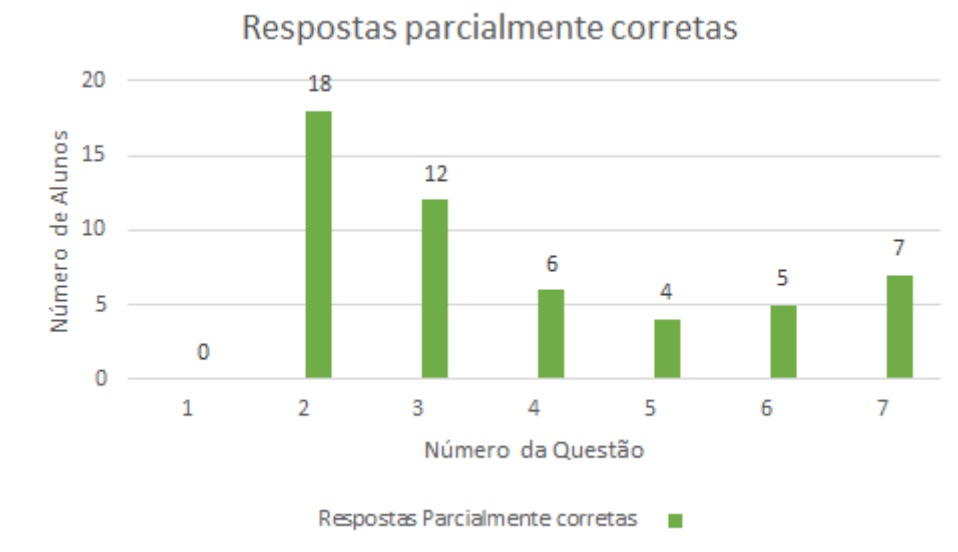


Figura 43. Respostas erradas da turma 3A matutino

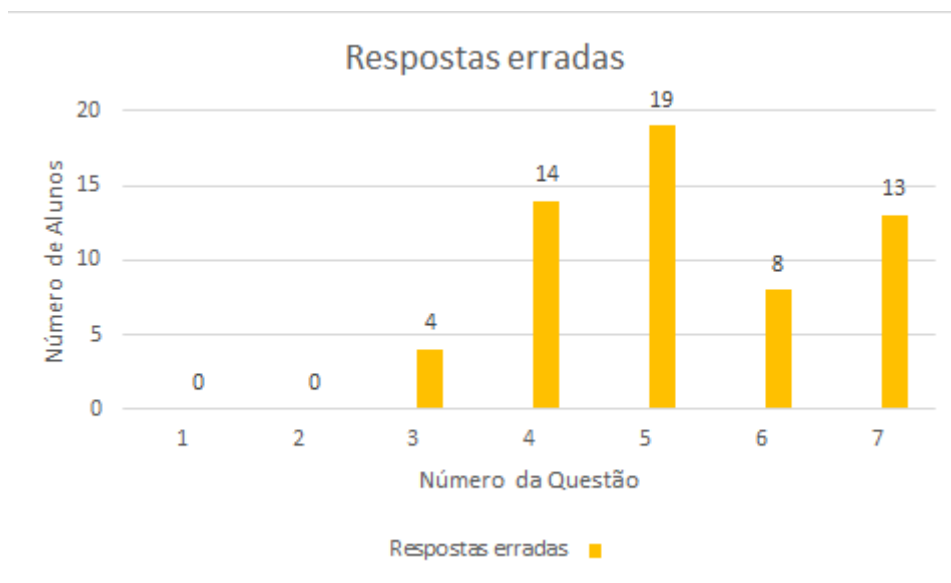
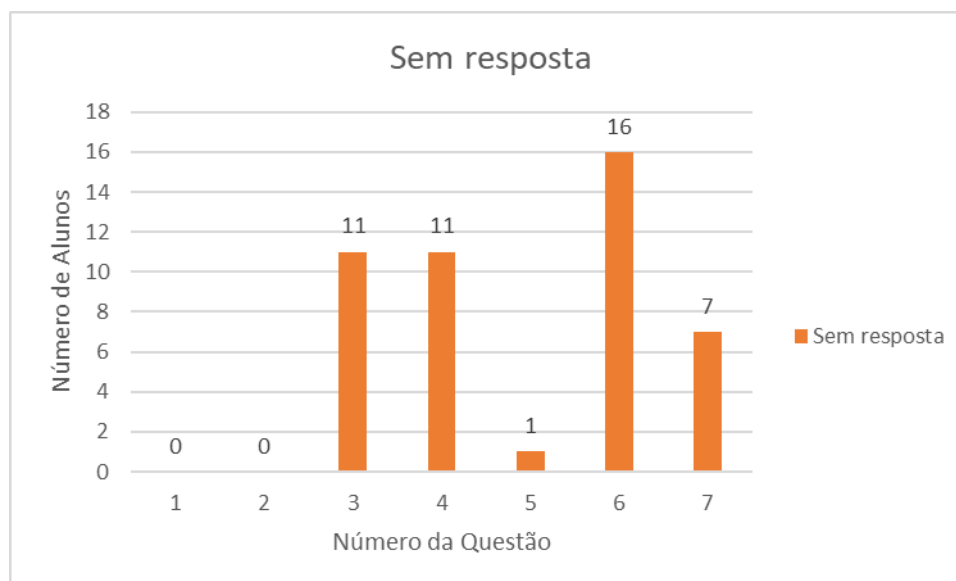


Figura 44. Respostas em branco da turma 3A matutino



Os resultados obtidos permitem notar que todos os alunos participantes souberam responder “Quem foi Albert Einstein?”, mesmo que de forma sucinta e objetiva, além de que um bom número de alunos tem uma noção razoável do porquê Einstein ficou tão famoso. Certamente, ambas, as informações foram reforçadas pelo documentário, apesar de a primeira ter um caráter mais intuitivo.

Apesar de um número relativamente alto não saber diferenciar conceitualmente a Física Clássica da Física Moderna, há de se considerar que, no geral, a maioria soube

responder de forma relativamente satisfatória. Por outro lado, um grande número não tem noção inicial, ou tem noções equivocadas sobre a Teoria da Relatividade.

Mesmo que já tenha sido tratado em séries anteriores, muitos desconhecem o valor da velocidade da luz no vácuo, um pequeno número tem noção do valor, mas sem se preocupar com a unidade de medida utilizada. Nota-se, também, que uma quantidade bastante expressiva de estudantes não compreenderam a interpretação das questões 6 e 7, alguns deixando em branco, outros errando em fornecer a resposta.

Turma 3B Matutino: 40 alunos

Questionário 1: 29 presentes

Tabela 2. Padrões de resposta da turma 3B matutino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	29	0	0	0
02	19	10	0	0
03	8	10	7	4
04	4	16	4	5
05	7	0	2	20
06	2	1	5	21
07	2	1	7	19

Graficamente, para cada tipo de resposta:

Figura 45. Respostas corretas da turma 3B matutino

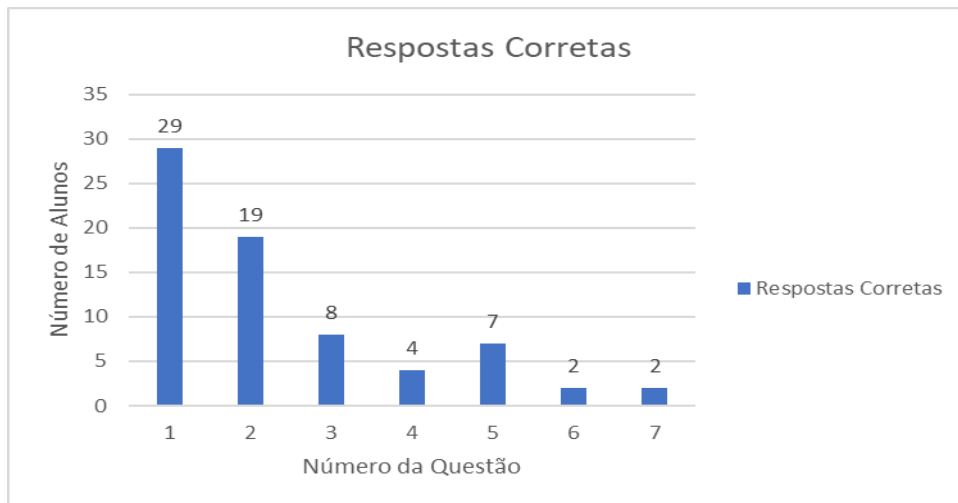


Figura 46. Respostas parcialmente corretas da turma 3B matutino

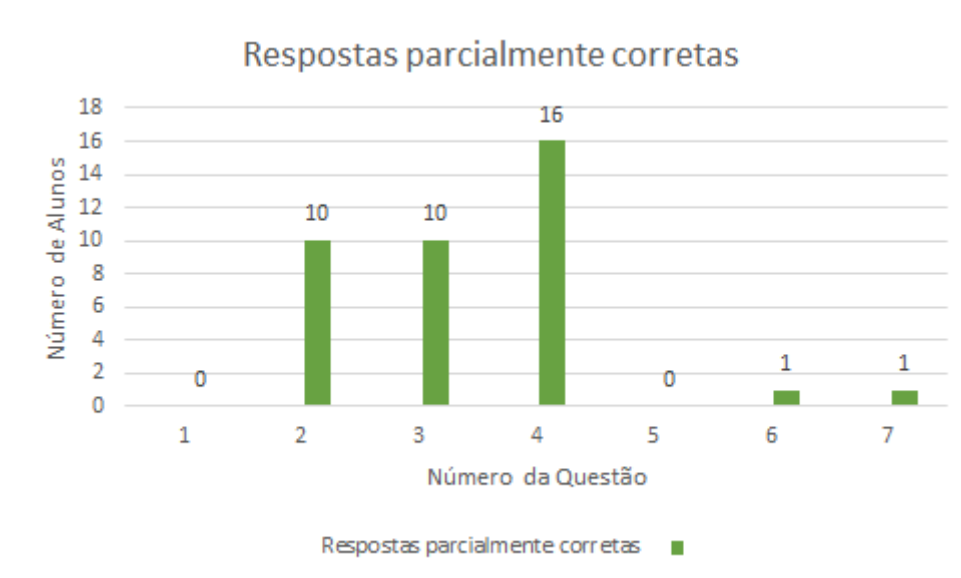


Figura 47. Respostas erradas da turma 3B matutino

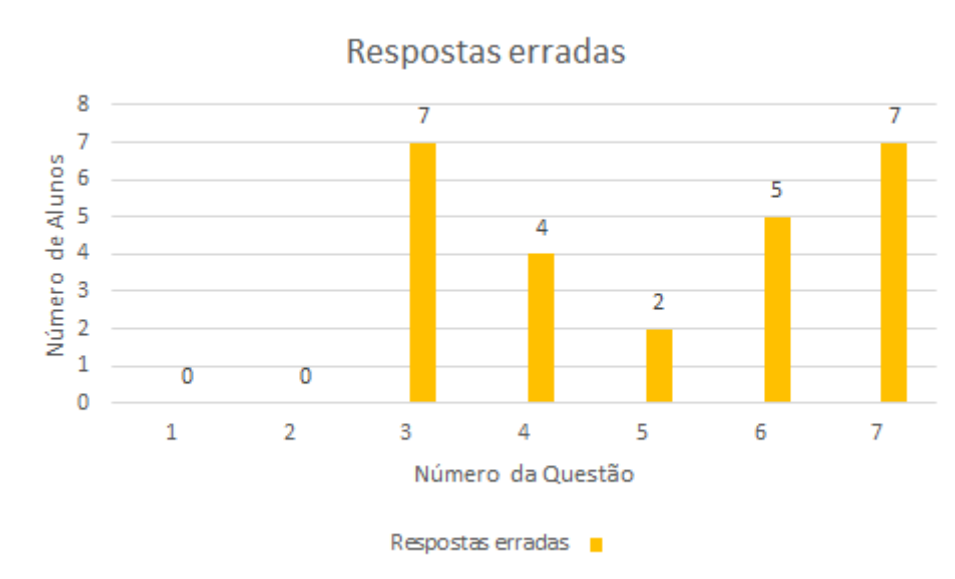
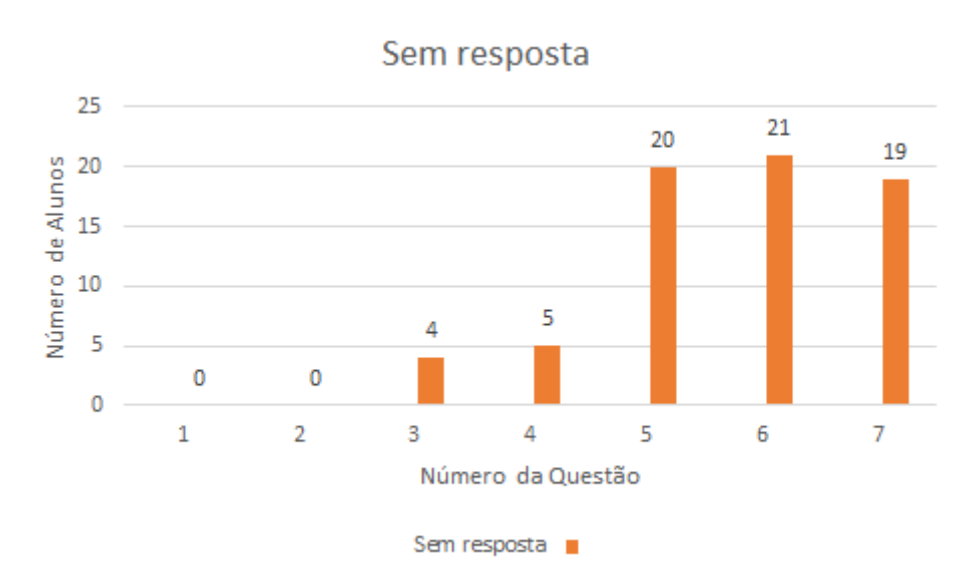


Figura 48. Respostas em branco da turma 3B matutino



As duas primeiras perguntas produziram resultados bastante semelhantes à turma anterior, porém, em relação ao total de participantes, um número um pouco maior soube diferenciar os campos conceituais em questão. Sobre as concepções iniciais acerca da Teoria da Relatividade, uma grande maioria soube responder, mesmo que parcialmente, sobre o que se trata a teoria. Aqui, há uma certa tendência em se associar Relatividade à Gravitação, uma ideia correta, mas neste caso, fazendo referência específica à Relatividade Geral. Novamente, muitos desconhecem o valor da velocidade da luz no vácuo e não compreendem as questões 6 e 7, quanto à multiplicação e divisão por um

número real maior que 1, neste caso, a diferença em relação à turma anterior é que muitos alunos optaram por não responder a essas perguntas.

Turma 3B Vespertino: 33 alunos

Questionário 1: 28 presentes

Tabela 3. Padrões de resposta da turma 3B vespertino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	28	0	0	0
02	28	0	0	0
03	6	18	0	4
04	17	8	3	0
05	22	0	6	0
06	4	14	2	8
07	4	10	4	10

Graficamente, para cada tipo de resposta:

Figura 49. Respostas corretas da turma 3B vespertino

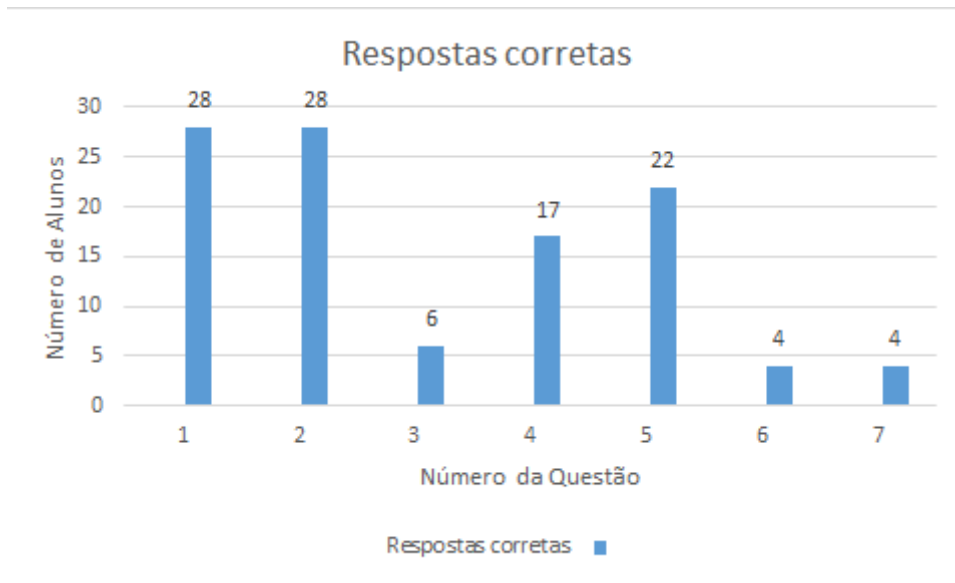


Figura 50. Respostas parcialmente corretas da turma 3B vespertino

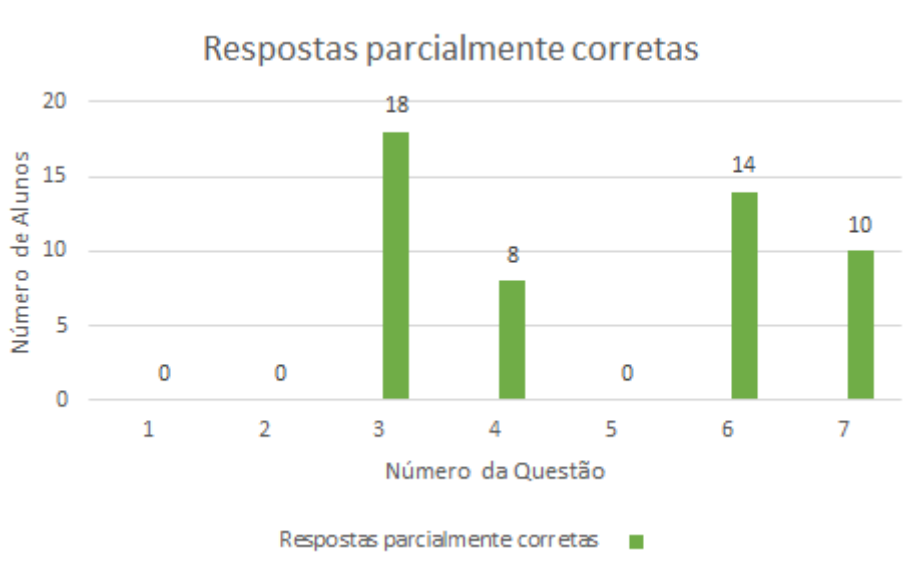
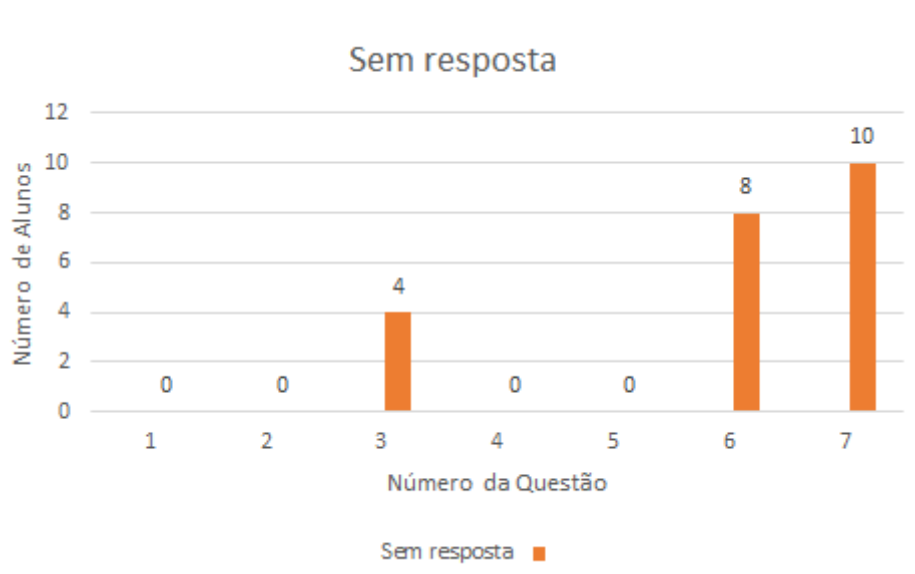




Figura 51. Respostas erradas da turma 3B vespertino



Figura 52. Respostas em branco da turma 3B vespertino



Essencialmente, nas primeiras 5 questões, grande parte dos participantes mostraram uma boa noção nas respostas fornecidas, sendo que no caso particular das duas primeiras perguntas, todos souberam responder. A questão 5 obteve respostas corretas pela maioria. Mesmo que sem uma elaboração completa, boa parte aprendeu a estabelecer certas diferenças entre os campos conceituais em questão. Evidencia-se como principal diferença pontuada, o período de tempo de surgimento ou influência das Físicas Clássica e Moderna. Um bom número compreendeu do que se trata a Teoria da Relatividade, ou pelo menos possui uma vaga noção, ainda que haja novamente uma tendência a se pensar mais em termos de Relatividade Geral.

Ainda que um número relativamente alto não saiba explicar as relações propostas nas questões 6 e 7, nota-se que uma quantidade razoável soube responder corretamente, apresentando dificuldade apenas em elaborar a justificativa.

No decorrer da semana, os alunos realizaram um trabalho de pesquisa sobre as diferenças entre as Físicas Clássica e Moderna, com escolha de um tópico de Física Moderna para aprofundar na pesquisa. Foram vários os temas propostos para escolha: Relatividade Especial, Relatividade Geral, Cosmologia, Mecânica Quântica, Física Nuclear, Física de Partículas, Teoria do Caos, Teoria das Cordas, Teoria Unificada, dentre outras; os temas que mais se destacaram como escolha de pesquisa foram Cosmologia, Teoria das Cordas e Teoria Unificada.

Após esta sequência de atividades, que culminou na terceira aula expositiva, aplicou-se o segundo questionário, o qual tinha o objetivo de verificar o grau de aprendizagem mediante as aulas expositivas e as leituras do *e-book* realizadas em casa.

Turma 3A Matutino: 39 alunos

Questionário 2: 31 presentes

Tabela 4. Padrões de resposta da turma 3A matutino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	1	14	9	7
02	0	3	22	6
03	8	12	9	2
04	8	9	12	2
05	4	15	11	1
06	0	2	18	11
07	1	2	17	11
08	7	9	6	9
09	5	12	4	10
10a	7	15	9	0
10b	5	0	19	7
11a	7	13	6	5
11b	2	1	21	7
12	1	5	21	4
13	1	1	25	4

Figura 53. Respostas corretas da turma 3A matutino

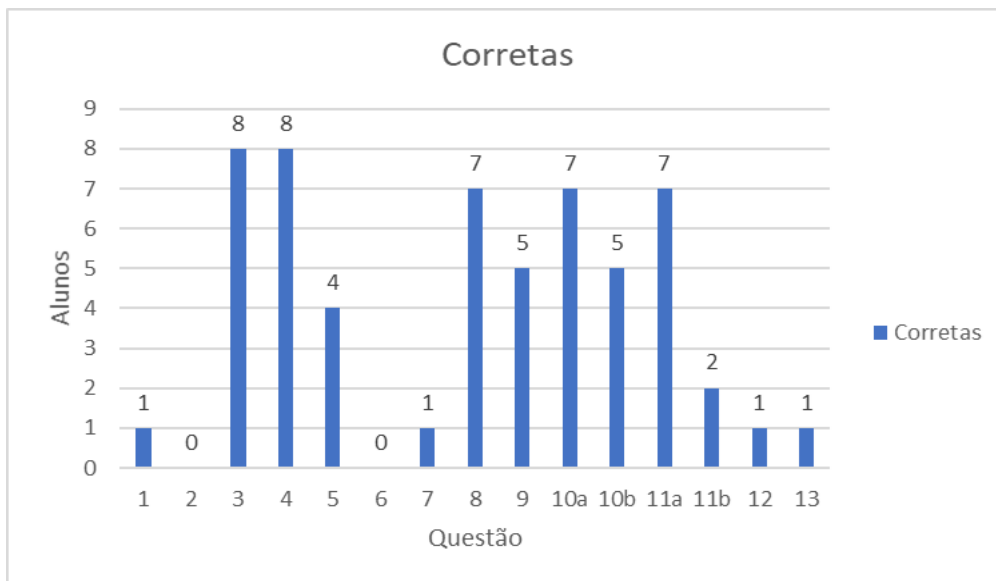


Figura 54. Respostas parcialmente corretas da turma 3A matutino

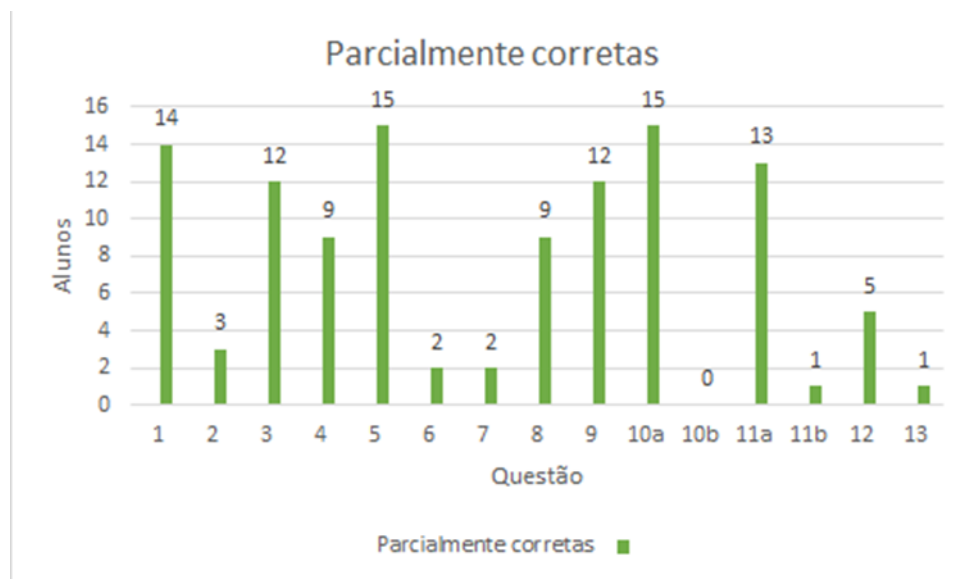


Figura 55. Respostas erradas da turma 3A matutino

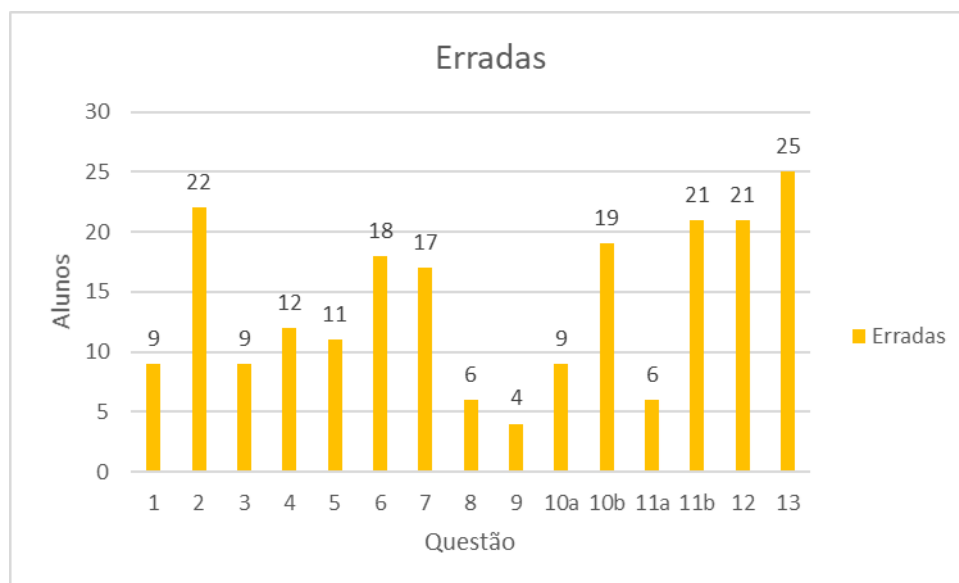
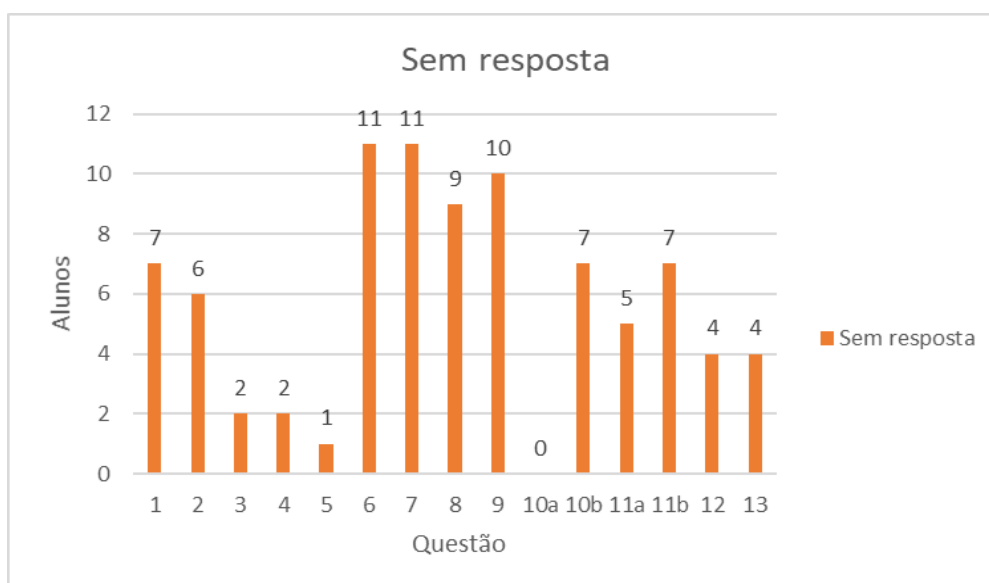


Figura 56. Respostas em branco da turma 3A matutino



Maior parte dos alunos que participaram aprenderam a citar os postulados da Relatividade, mesmo sem saber elaborar muito a resposta, ou ter uma compreensão aprofundada sobre cada postulado, em especial o primeiro. De semelhante modo, a maioria compreendeu parcialmente as mudanças estabelecidas em relação à energia, sabe citar a relação matéria-energia, apesar de um número ainda expressivo não ter compreendido seu significado.

Posto de uma maneira geral, um grande número de estudantes não compreende quais as principais consequências da Relatividade quando a pergunta é feita dessa

forma, porém, quando questionados de forma mais específica, apresentam mais facilidade, haja vista que um número significativo tem algum grau de compreensão acerca da Dilatação do Tempo, uma quantidade razoável compreende a Contração do Espaço, além da já citada compreensão parcial em relação à energia.

A maior parte dos estudantes não compreende o conceito de referencial, logo, também não conseguem estabelecer uma diferença clara entre referenciais inerciais e não inerciais e, conseqüentemente, não souberam explicar o termo “Restrita” atribuído à Relatividade Especial. Um número razoável soube falar sucintamente do que se trata a Relatividade Geral, mas sem fazer nenhuma relação com os tipos de referenciais. Resultado semelhante se obteve para a explicação das condições que tornam os efeitos relativísticos consideráveis.

No quesito “a” das questões 10 e 11, se obteve respostas, em sua maioria corretas ou parcialmente corretas, tendo em vista que deveriam fornecer explicações sobre conceitos dos quais se obteve algum nível de compreensão. Já o quesito “b” dessas mesmas questões, nas quais se deveria calcular o tempo e espaço relativísticos a partir de um Fator de Lorentz já conhecido, produziu respostas em sua maioria incorretas e alguns optaram por não responder. Uma parte considerável dos alunos identificou que deveria aplicar a relação matéria-energia na questão 12, mas muitos não acertaram desenvolver. Algo semelhante ocorreu na questão 13, sendo que neste caso, também não ficou claro qual expressão se utilizar para responder.

Turma 3B Matutino: 40 alunos

Questionário 2: 34 presentes

Tabela 5. Padrões de resposta da turma 3B matutino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	4	13	12	5
02	2	9	13	10
03	11	11	6	6
04	10	13	7	4
05	14	12	5	3
06	1	5	15	13
07	0	8	12	14
08	9	14	3	8
09	1	17	3	13
10a	10	17	2	5
10b	4	0	16	14

11a	7	17	6	4
11b	2	0	18	14
12	2	3	19	10
13	1	3	20	10

Figura 57. Respostas corretas da turma 3B matutino

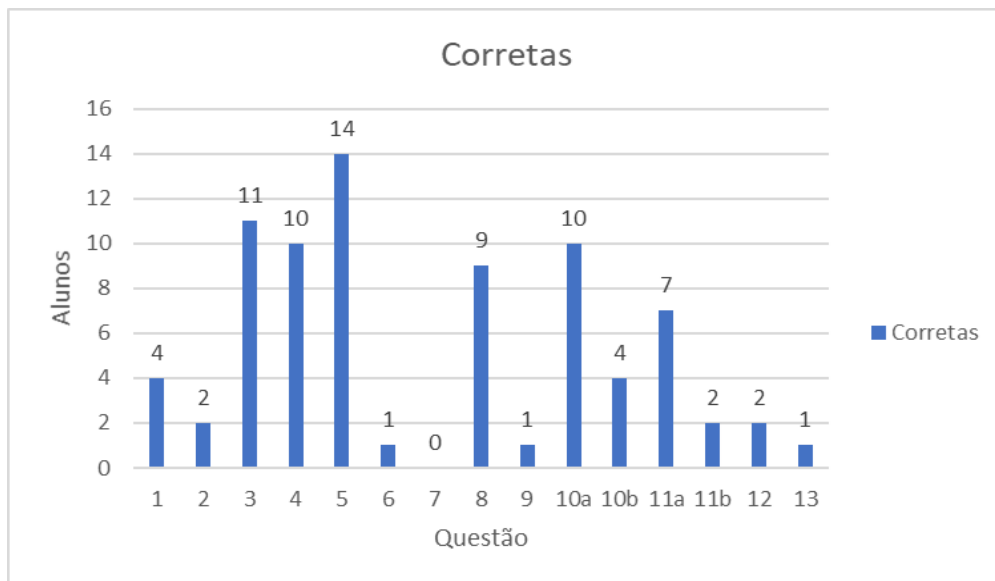


Figura 58. Respostas parcialmente corretas da turma 3B matutino

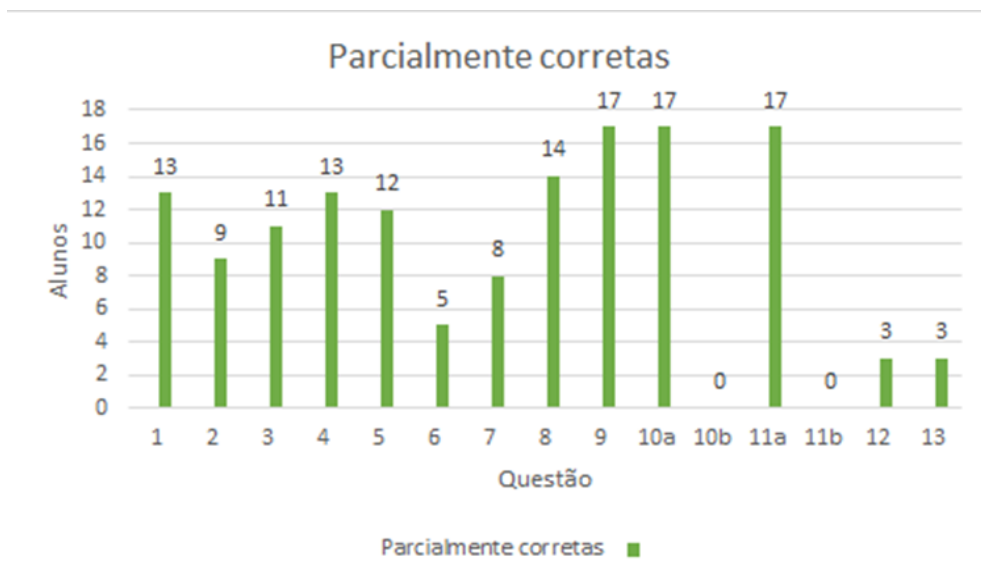


Figura 59. Respostas erradas da turma 3B matutino

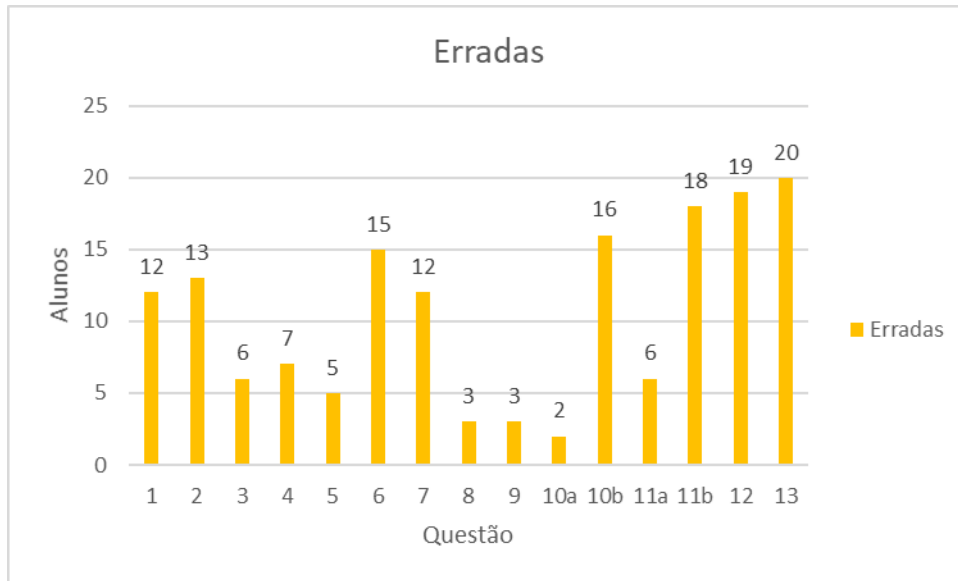


Figura 60. Respostas em branco da turma 3B matutino



Observa-se que parte da turma compreendeu bem ou parcialmente bem os Postulados da Relatividade, enquanto que a outra não compreendeu ou não respondeu. Uma quantidade significativa absorveu bem ou parcialmente os conceitos de Dilatação do Tempo, Contração do Espaço e Relação Matéria-Energia, ainda que muitos não organizem essas informações como consequências da Relatividade.

A maioria entendeu parcialmente sobre os objetos de estudo da Relatividade Geral. Em relação às situações em que os efeitos relativísticos se tornam consideráveis, uma quantidade expressiva compreende parcialmente bem, mas observa-se que muitos



optaram por não responder. Os demais questionamentos produziram resultados semelhantes aos obtidos na turma anterior.

Turma 3B Vespertino: 33 alunos

Questionário 2: 29 presentes

Tabela 6. Padrões de resposta da turma 3B vespertino

Questões	Corretas	Parcialmente corretas	Erradas	Sem resposta
01	16	9	4	0
02	1	15	11	2
03	20	6	3	0
04	5	14	7	3
05	18	3	4	4
06	3	8	16	2
07	7	9	10	3
08	15	8	6	0
09	11	11	3	4
10a	9	18	2	0
10b	5	2	17	5
11a	6	20	3	0
11b	6	3	15	5
12	4	4	16	5
13	2	2	19	6

Figura 61. Respostas corretas da turma 3B vespertino

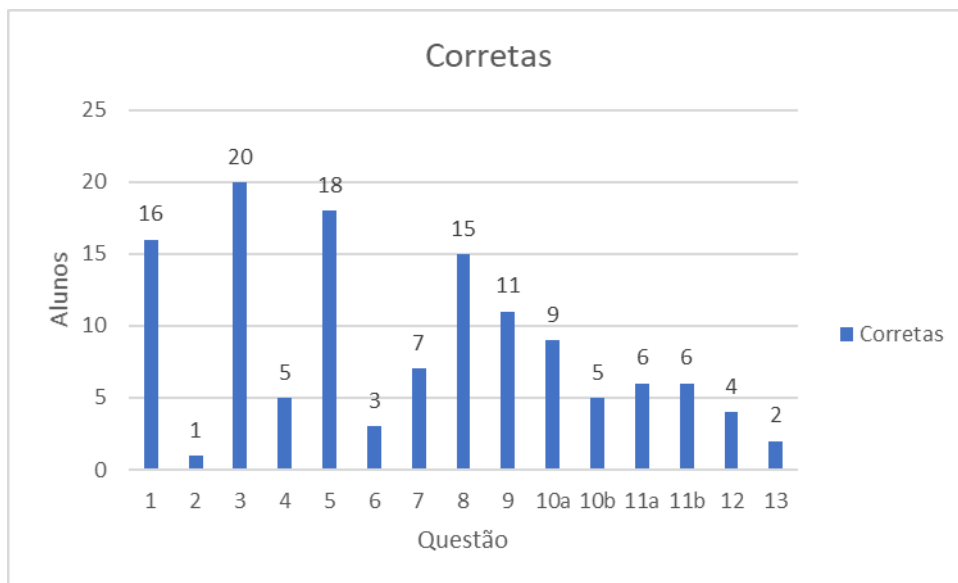


Figura 62. Respostas parcialmente corretas da turma 3B vespertino

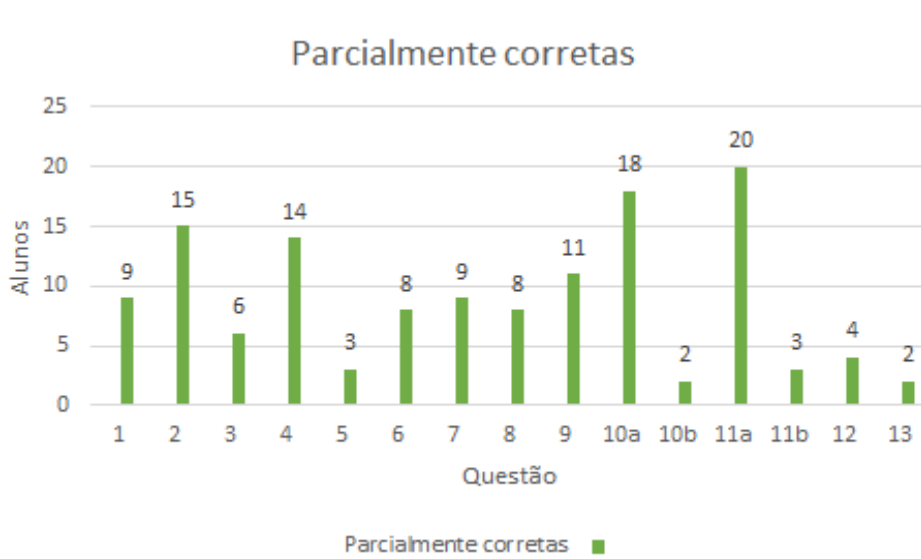


Figura 63. Respostas erradas da turma 3B vespertino

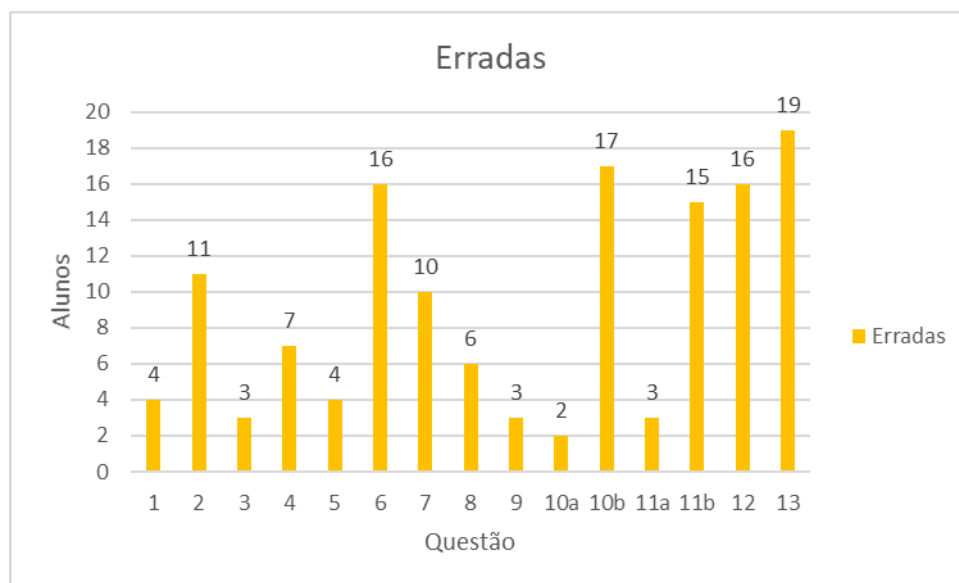


Figura 64. Respostas em branco da turma 3B vespertino



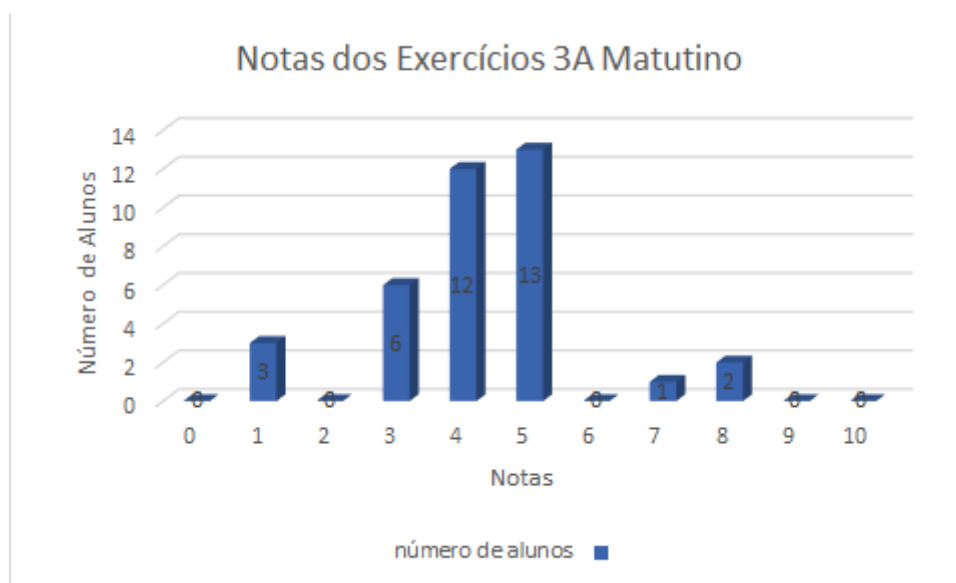
Um número considerável de alunos teve algum nível de compreensão sobre as consequências da Relatividade. Em relação aos tipos de referenciais, houve algumas respostas satisfatórias, apesar de a maioria ainda não saber desenvolver sobre isso. A maior parte da turma soube explicar, mesmo que de forma simplificada, a razão do termo “Relatividade Restrita”, apesar de a diferença não ser tão grande em relação à parcela que não compreendeu sobre isso. Os demais questionamentos produziram resultados semelhantes aos obtidos nas turmas anteriores.

Finalizando, após uma leitura de revisão em casa, aplicou-se um Exercício, que se tratava na verdade dos Exercícios Propostos ao final do *e-book*, composto por 10 questões objetivas que foram impressos para a realização em sala de aula. Os gráficos abaixo representam as notas obtidas em cada turma.

Turma 3A Matutino: 39 alunos

Exercícios Propostos: 37 presentes

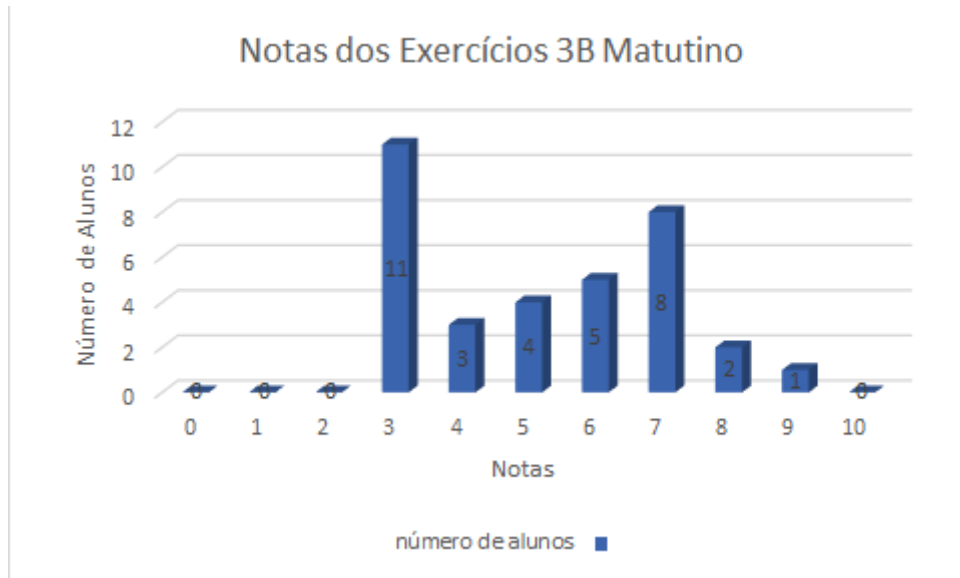
Figura 65. Notas dos Exercícios da turma 3A matutino



Turma 3B Matutino: 40 alunos

Exercícios Propostos: 34 presentes

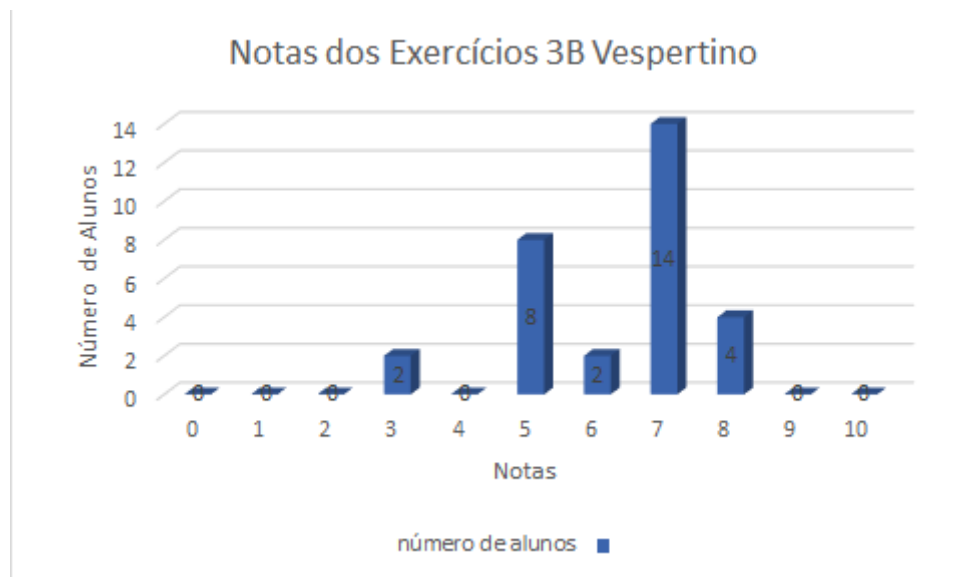
Figura 66. Notas dos Exercícios da turma 3B matutino



Turma 3B Vespertino: 33 alunos

Exercícios Propostos: 30 presentes

Figura 67. Notas dos Exercícios da turma 3B vespertino



Alunos realizando os Exercícios Propostos:

Figura 68. Turma 3A matutino

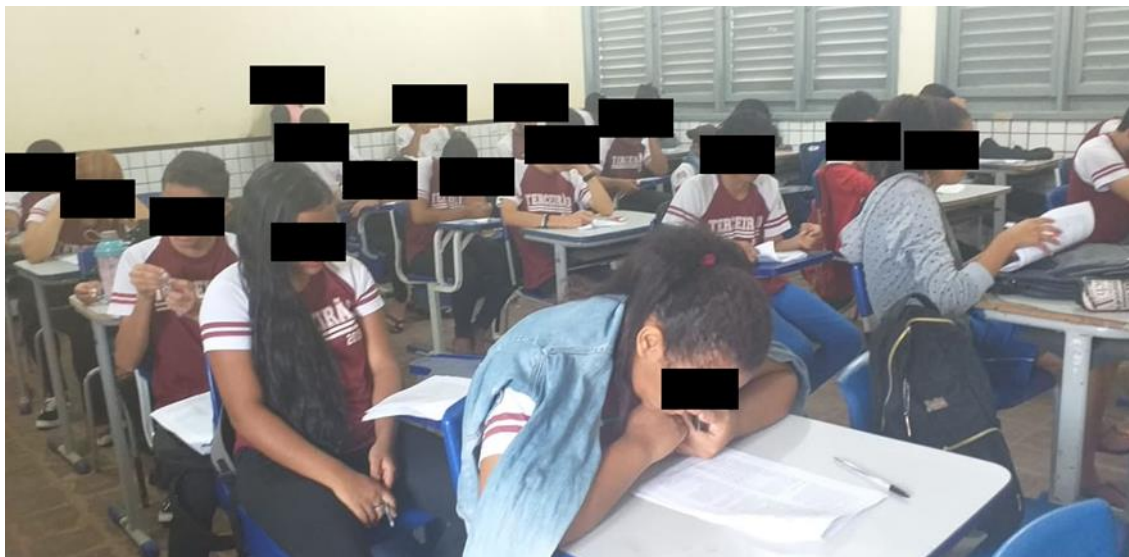


Figura 69. Turma 3B matutino



Figura 70. Turma 3B vespertino



## Capítulo 8

### Considerações Finais

Buscar ferramentas e metodologias alternativas para o processo de educação nas escolas de Ensino Básico representa uma evolução no ensino e aprendizagem. Adaptar o estudante e as formas de ensinar às novas tendências na educação, se constitui como uma consequência natural da busca pelo saber significativo, fazendo com que o conhecimento se transforme em um instrumento adicional nas formas de pensar e agir, e capacitando o estudante como um cidadão consciente, participativo e atuante como transformador da realidade.

Neste sentido, o *e-book* desenvolvido, aplicado em conjunto em uma sequência de aulas, atividades e leituras se constitui como um instrumento de grande potencial, no papel motivador e facilitador da aprendizagem. Na sequência em que as aulas foram trabalhadas, já se percebeu uma resposta positiva quando os alunos foram levados a assistir um documentário, que não só desmistificou muitas concepções equivocadas a respeito de Albert Einstein, como também aguçou a curiosidade e interesse para a compreensão da Teoria da Relatividade. O primeiro questionário permitiu avaliar que há alguns estudantes que possuem alguma noção prévia, algum contato, mesmo que indireto, com assuntos relacionados à Física Moderna e possui curiosidade no seu entendimento. As atividades de pesquisa sobre Física Clássica e Física Moderna, em especial, as áreas da Física Moderna, demonstraram a curiosidade dos estudantes quanto à verdadeira extensão e alcance dos conhecimentos da Física.

As leituras prévias do *e-book* em casa (bem como sua prática habitual entre aulas), se mostram proveitosas na medida em que preparam o aluno para as aulas que virão. O contato com um material acessível, com forma de leitura não cansativa, que leva o aluno a chegar em novas e complementares informações através dos *hiperlinks* no decorrer do texto, facilita a atenção e solidifica o interesse pelo conteúdo. Os textos e vídeos propostos contextualizam o tema, trazendo o assunto para mais próximo do cotidiano e da realidade. Dessa forma, as aulas expositivas que se seguiram, tiveram seu entendimento facilitado, com questionamentos e curiosidades levantadas que não são comuns nas aulas tradicionais ao longo do ano letivo. O segundo questionário produziu resultados melhores em relação ao habitual e permitiu verificar as principais dificuldades e facilidades mais frequentes nos estudantes. Os Exercícios Propostos confirmam que, apesar de dúvidas e dificuldades ainda persistirem em certos estudantes,



os resultados de avaliação de aprendizagem são promissores para vários deles, superiores aos resultados obtidos após as avaliações bimestrais do decorrer do ano.

Dessa maneira, a utilização de um *e-book* como ferramenta educacional, aplicada em sequências previamente planejadas, se mostra uma prática promissora, com resultados satisfatórios, que tendem a melhorar cada vez mais, à medida em que pode ser aperfeiçoado e sua aplicação sendo colocada em prática com maior frequência, podendo, inclusive, ser estendida aos demais ramos da Física e demais séries do Ensino Básico. Se as principais dificuldades e resistências dos estudantes forem trabalhadas e contornadas, essa ferramenta que desenvolvemos possibilitará o melhor desenvolvimento das potencialidades, tanto as dos estudantes, quanto as do próprio material didático, que mediará a informação, facilitando a compreensão de campos de conhecimento diversos e produzindo, assim, uma evolução das práticas educacionais e a melhoria na qualidade do ensino e aprendizagem.

# Apêndice A

## Questionários

### Questionário 1 - Pré-teste

- 1- Quem foi Albert Einstein?
  
- 2- Por que Einstein ficou tão famoso?
  
- 3- Qual a diferença entre a Física Clássica e a Física Moderna?
  
- 4- O que você sabe sobre a Teoria da Relatividade?
  
- 5- Qual o valor da velocidade da luz no vácuo?
  
- 6- Considere a expressão:  $X = aY$ , sendo  $a$  um número maior que 1. Você acha que  $X$  será um número maior, menor ou igual a  $Y$ ? Justifique.
  
- 7- Considere a expressão:  $X = \frac{Y}{b}$ , sendo  $b$  um número maior que 1. Você acha que  $X$  será um número maior, menor ou igual a  $Y$ ? Justifique.

## Questionário 2 – Atividade de Verificação

1-Quais os postulados da Relatividade?

2-Quais as principais consequências da Teoria da Relatividade em relação à Física Clássica?

3-Quais as mudanças estabelecidas pela Teoria da Relatividade em relação ao tempo?

4-Quais as mudanças estabelecidas pela Teoria da Relatividade em relação ao espaço/comprimento?

5-Quais as mudanças estabelecidas pela Teoria da Relatividade em relação à energia?

6-O que são referenciais inerciais e referenciais não-inerciais?

7-Por que a Relatividade Especial também é chamada Relatividade Restrita?

8-Do que se trata a Relatividade Geral?

9-Em quais situações os efeitos relativísticos se tornam notáveis?

10-Considere um grupo de astronautas que viaja para uma galáxia distante a uma velocidade próxima a da luz, passando 8 anos fora da Terra, de acordo com o relógio dos astronautas.

a) O que acontece com o tempo medido por quem ficou na Terra?

b) Se nessa situação o fator de Lorentz vale 3, qual o valor do tempo medido por quem ficou na Terra?

11- Considere uma pessoa viajando em um trem superveloz a passar por um túnel, esse movimento é observado de fora por outra pessoa em repouso em relação ao túnel. A pessoa de fora mede um comprimento de 60m.

- a) O que acontece com esse comprimento medido pelo passageiro do trem?
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- b) Se nessa situação o fator de Lorentz vale 5, qual o valor do comprimento do túnel medido pelo passageiro?

12- Qual a energia contida em uma partícula de massa  $4 \cdot 10^{-6} \text{kg}$  em repouso?

13- Se a partícula acima se move numa velocidade relativística até atingir uma energia total de  $60 \cdot 10^{10} \text{J}$ , qual o valor da sua energia cinética?

## Anexo I

### Exercícios Propostos

1-A teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente do estado de movimento relativo entre eles. Com base nessa afirmação, imagine duas naves que viajam no espaço com velocidades altíssimas em uma mesma direção, mas com sentidos opostos. Se cada nave possui velocidade  $V$  e a velocidade da luz no vácuo é  $c$ , a luz percebida pelo piloto teria velocidade:

- a)  $V + c$
- b)  $c - V$
- c)  $V - c$
- d)  $c$
- e)  $2c$

2-O campo de estudo dedicado à medida de eventos, onde e quando ocorrem e qual a distância que os separa no espaço e no tempo, é a relatividade. Em 1905, Albert Einstein propôs a teoria da relatividade restrita, em que o adjetivo “restrita” é usado para indicar que a teoria se aplica somente a referenciais inerciais. A teoria da relatividade restrita é composta basicamente de dois postulados: postulado da relatividade; e postulado da velocidade da luz.

Com base no texto acima, assinale a alternativa correta.

- a) De acordo com os postulados, não pode existir, na natureza, uma velocidade limite. A velocidade irá depender da direção e do referencial onde se encontra o objeto em movimento
- b) A relatividade relaciona valores medidos e referenciais que não estão se movendo em relação a outro.
- c) A velocidade da luz não é constante para todos os observadores; depende do referencial inercial em que se situa o observador.
- d) Referenciais inerciais são aqueles em que as três leis de Newton não são válidas.
- e) As leis da física são as mesmas para diferentes referenciais inerciais

3- (UEPB-PB) A relatividade proposta por Galileu e Newton na Física Clássica é reinterpretada pela Teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879-1955) em 1905, que é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, uma vez que a anterior era aplicada somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade válida para todos os referenciais (inerciais e não inerciais).

Ainda acerca do assunto tratado no texto, resolva a seguinte situação-problema: Considere uma situação “fictícia”, que se configura como uma exemplificação da relatividade do tempo.

Um grupo de astronautas decide viajar numa nave espacial, ficando em missão durante seis anos, medidos no relógio da nave.

Quando retornam à Terra, verifica-se que aqui se passaram alguns anos.

Considerando que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e que a velocidade média da nave é  $0,8c$ , é correto afirmar que, ao retornarem à Terra, se passaram:

- a) 20 anos
- b) 10 anos
- c) 30 anos
- d) 12 anos
- e) 6 anos

4-Considerando os efeitos relativísticos, a velocidade com que um elétron deveria se mover para que a sua massa seja o dobro daquela em repouso, em função da velocidade (c) da luz, é

- a)  $0,50 c$ .
- b)  $0,87 c$ .
- c)  $0,64 c$ .
- d)  $0,78 c$ .
- e)  $0,44 c$ .

5-É possível viajar para o futuro da Terra? Sim, é possível viajar para o futuro da Terra usando o movimento relativo para ajustar a velocidade com que o tempo passa. No filme O Planeta dos Macacos, um astronauta deixa a Terra em sua nave e, quando regressa, encontra-a completamente diferente tendo se passado muitos anos: é a dilatação dos tempos. A verificação do fenômeno pode ser expressa pela relação entre o

tempo na Terra ( $T$ ) e o tempo na nave ( $T_0$ ), ou seja,  $T = \gamma T_0$ , em que  $\gamma$  é o fator de Lorentz que vale  $\gamma = 5$  quando a nave passa pela Terra com uma velocidade equivalente a 92% da velocidade da luz. Nestas condições, se o astronauta realiza uma viagem desde a Terra até uma estação orbital, levando 12 anos (tempo do astronauta) na Terra, teriam se passado:

- a) 60 anos
- b) 90 anos.
- c) 120 anos.
- d) 150 anos.
- e) 180 anos.

6-(UEL-PR) A teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879 – 1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referenciais não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, considere as seguintes afirmativas:

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- b) Apenas a afirmativas II é verdadeira.
- c) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- d) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- e) As afirmativas I e III são verdadeiras.

7-(UFRN-RN) A teoria da Relatividade Especial prediz que existem situações nas quais dois eventos que acontecem em instantes diferentes, para um observador em um dado referencial inercial, podem acontecer no mesmo instante, para outro observador que está em outro referencial inercial. Ou seja, a noção de simultaneidade é relativa e não absoluta.

A relatividade da simultaneidade é consequência do fato de que:

- a) a teoria da Relatividade Especial só é válida para velocidades pequenas em comparação com a velocidade da luz.
- b) a velocidade de propagação da luz no vácuo depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.
- c) a teoria da Relatividade Especial não é válida para sistemas de referência inerciais.
- d) a velocidade de propagação da luz no vácuo não depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.

8-(UFRJ-RJ) O conceito de éter surgiu na Grécia antiga, significando uma espécie de fluido sutil e rarefeito que preenchia o espaço e envolvia a Terra. Esse conceito evoluiu para representar um referencial privilegiado, a partir do qual se poderia descrever toda a Física, inclusive seria o meio material no qual se propagariam as ondas eletromagnéticas (a luz). No entanto, as experiências de Michaelson-Morley, realizadas em 1887, mostraram a inconsistência desse conceito, uma vez que seus resultados implicavam que ou a Terra estava sempre estacionária em relação ao éter ou a noção de que o éter representava um sistema de referência absoluto era errônea, devendo, portanto, ser rejeitada.

As inconsistências do conceito de éter levaram Einstein a elaborar a teoria de que a velocidade da luz

- a) é constante para qualquer observador e dependente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- b) é constante para qualquer observador e independente de qualquer movimento da fonte ou do observador.
- c) é constante e dependente do observador, porém independente de qualquer movimento relativo da fonte.
- d) é constante e independente do observador, porém dependente de qualquer movimento relativo da fonte.

9-(UEPB-PB) Através da relação  $E_c = \Delta m \cdot c^2$ , fica claro que existe uma equivalência entre a variação de massa de um corpo e a energia cinética que ele ganha ou perde. Sendo assim, é correto afirmar que:

- a) independente de ocorrer uma mudança na energia de um corpo, sua massa permanece a mesma.



- b) quando a energia cinética de um corpo diminui, há um correspondente acréscimo de massa deste corpo.
- c) quando um corpo adquire energia cinética sua massa não sofre um acréscimo.
- d) quando um corpo adquire energia cinética sua massa sofre uma diminuição.
- e) quando a energia cinética de um corpo diminui, há uma correspondente diminuição de massa deste corpo.

10-(UEPB-PB) Adotando-se que a velocidade da luz no vácuo vale  $3 \cdot 10^8$  m/s, a energia contida em uma massa de 1 grama vale:

- a)  $9 \cdot 10^{13}$  J
- b)  $4,5 \cdot 10^{13}$  J
- c)  $9 \cdot 10^{16}$  J
- d)  $4,5 \cdot 10^{16}$  J
- e)  $4,5 \cdot 10^{19}$  J

## Referências Bibliográficas

- [01] RODRIGUES C. M. *A Inserção da Física Moderna no Ensino Médio aliada à tecnologia do Sistema de Posicionamento Global (GPS)*. 2011. 147f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2011.
- [02] FERREIRA R. C. *Criação e uso de material instrucional digital multimídia para o ensino de conceitos de Astronomia para o Ensino Médio*. 2017. 145f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, 2017.
- [03] FILHO G. F. S. *Simuladores computacionais para o ensino de Física Básica: uma discussão sobre produção e uso*. 2010. 86f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- [04] SOUZA J. S. *Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: uma sequência de ensino para abordar o Efeito Fotoelétrico*. 2018. 90f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, 2018.
- [05] CRUZ J. A. *Desenvolvimento e Avaliação de uma História em Quadrinhos para o ensino de Astronomia*. 2018. 51f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Tocantins, Araguaína - TO, 2018.
- [06] DUARTE J. P. *Desenvolvimento e Aplicação de um E-book no Ensino da Física*. 2015. 77f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2015.
- [07] CRISTÓVÃO A. M. *Forças e Movimento: Proposta de Atividades com Simulações Computacionais*. 2017. 105f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá – SC, 2017.
- [08] BERNARDO N. A. R. *A importância da Simulação Computacional como material potencialmente significativo para o Ensino da Física*. 2015. 76f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2015.
- [09] MOURÃO O. S. *Uso da plataforma Arduino como uma ferramenta motivacional para a Aprendizagem de Física*. 2018. 221f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2018.
- [10] SILVA P. G. A. *Física Moderna para o Ensino Médio: Relato de uma Experiência*. 2015. 79f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2015.
- [11] SILVA W. C. *Radiação Ultravioleta: Inserção de Física Moderna no Ensino Médio por meio dos efeitos biológicos da radiação UV*. 2017. 144f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

- [12] SOUZA G. M. R. *Uso de Simulações Computacionais no Ensino de conceitos de Força e Movimento no 9º ano do Ensino Fundamental*. 2015. 192f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda - RJ, 2015.
- [13] MARQUES H. M. M. *Competências dos Professores e a integração das TIC na prática pedagógica nas Ciências Sociais e Humanas (2º e 3º CEB)*. 2012. 150f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.
- [14] SILVA V. S. P. *Objetos de Aprendizagem: Limitações funcionais no Ensino Médio e aplicabilidade no Ensino de Física sob uma perspectiva Vygotskyana*. 2014. 154f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [15] FERNANDES S. C. A. *As Tecnologias de Informação e Comunicação no Ensino e Aprendizagem de História: Possibilidades no Ensino Fundamental e Médio*. 2012. 90f. Dissertação de Mestrado – Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande - MS, 2012.
- [16] MARÇAL Q. P. V. *A leitura no mundo digital: reflexões acerca do Livro Eletrônico*. 2018. 102f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2018.
- [17] SALGADO, L. M. A. *A Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro da Escola do Futuro da Universidade de São Paulo: Um Estudo das suas Estruturas e de seus Usuários*. 2002.
- [18] SAMPAIO, M. N.; LEITE, L. S. *Alfabetização Tecnológica do professor*. Petrópolis, RJ: Editora Vozes, 1999.
- [19] Bueno, B., Souza, D. & Bello, I. (2008). *Novas Tecnologias e letramento: a leitura e a escrita de professoras*. Revista Portuguesa de Pedagogia, Ano 42-1, 45-64
- [20] Lévy, P. (2000). *Cibercultura*. Lisboa: Instituto Piaget.
- [21] Bruner, J. (2004). *Educação no Encontro com as Novas Tecnologias*, in Tadesco J. C. (Org.), *Educação e Novas Tecnologias: esperanças ou incertezas?* Brasil, Cortez Editora, p. 17-75.
- [22] PERRENOUD, Philippe. *Dez novas competências para ensinar*. Alegre: Artmed, 2000
- [23] MORAN, J. M. *Ensino e aprendizagem inovadores com tecnologias audiovisuais e telemáticas*. In: MORAN, J. M.; MASETTO, M. M. T.; BEHRENS, M. A. *Novas Tecnologias e mediação pedagógica*. 8ª Ed. Campinas, SP: Papirus, 2009.

- [24] CAMPOS, F.C.A. *Hipermídia na educação: paradigmas e avaliação da qualidade*. 1994, 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.
- [25] BELISÁRIO, A. *Educação a distância & Internet: a virtualização do Ensino Superior*. Rio de Janeiro: Associação de Docentes da UERJ, 2001.
- [26] NIELSEN, J. *Hypertext and hypermedia*. Boston: Academic Press, 1990.
- [27] ARTUSO, A.R. *O uso da hipermídia no ensino de Física: possibilidades de uma aprendizagem significativa*. 2006, 196 f. Dissertação (Mestrado em Educação) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- [28] BRASIL. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (SEMTEC). PCN Ensino Médio: Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 2000.
- [29] BRASIL. Ministério da Educação (MEC), Secretaria de Educação Média e Tecnológica (SEMTEC). PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 2006.
- [30] OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. *Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.29, n.3, 2007, p. 447-454.
- [31] OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. *Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio”*. Investigações em Ensino de Ciências, Porto Alegre, v.5, n.1, p. 23 – 48, 2000.
- [32] OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. *Relatividade Restrita no Ensino Médio: Contração de Lorentz-Fitzgerald e a aparência visual de objetos relativísticos em Livros Didáticos de Física*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física. Florianópolis, v. 19, n. 2, p. 176 – 190, 2002.
- [33] VALADARES, E. C.; MOREIRA, A. M. *Ensinando Física Moderna no segundo grau: Efeito fotoelétrico, laser e emissão de corpo negro*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 121, 1998.
- [34] GEHLEN S. T., MALDANER O. A. e DELIZOICOV D., *Momentos pedagógicos e as etapas da situação de estudo: complementaridades e contribuições para a educação em ciências*, Ciência & Educação, v. 18, n. 1, p. 1-22, 2012.

- [35] RESNICK, R. Introdução à Relatividade Especial. 1ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo e Ed. Polígono, 1971.
- [36] LIMA, C. R. A. Introdução à Física Moderna. 1ª ed. Rio de Janeiro, 2009.
- [37] NUSSENZVEIG, H. M. Curso de Física Básica 4. 1ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 1998.
- [38] RESNICK, Robert. HALLIDAY, David. KRANE, Kenneth S. Física 2. 5ª ed. São Paulo: Editora Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- [39] MARTINI G., SPINELLI W., REIS H. C., SANT'ANNA B. Conexões com a Física Volume 3. 3ª ed. São Paulo. Editora Moderna, 2016.
- [40] GASPAR, Alberto. Compreendendo a Física Volume 3. 3ª ed. São Paulo: Editora Ática, 2011.
- [41] GUIMARÃES O., PIQUEIRA J. R., CARRON W. Física Volume 3. 2ª ed. São Paulo: Editora Ática, 2017.
- [42] LUZ A. M. R., ÁLVARES B. A., GUIMARÃES C. C. Física: Contexto e Aplicações Volume 3. 2ª ed. São Paulo: Editora Scipione, 2017.
- [43] KAZUHITO Y., FUKU L. F. Física Volume 3. 3ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.
- [44] BISCUOLA G. J., BÔAS N. V., DOCA R. H. Física Volume 3. 3ª ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2017.
- [45] CRAWFORD, Paulo. A Teoria da Relatividade e o GPS. Cosmo Física, 2004. Disponível < [http://cosmo.fis.fc.ul.pt/users/crawford/artigos/T%20R\\_GPS\\_intro.html](http://cosmo.fis.fc.ul.pt/users/crawford/artigos/T%20R_GPS_intro.html)>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019
- [46] Dilatação do Tempo: O Múon. Aprenda Física. Disponível < <https://aprendafisica.wordpress.com/2016/07/07/dilatacao-do-tempo-o-muon/>>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019
- [47] Desvio para o Vermelho e a Lei de Hubble. Phylos. Disponível < <https://www.phylos.net/2017-12-07/desvio-para-vermelho-lei-hubble/>>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019
- [48] LUCCA, Guilherme. Einstein e a Bomba Atômica. Física em Classe. Disponível < <https://fisicaemclasse.blogspot.com/2015/09/einstein-e-bomba-atomica.html>>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019
- [49] SILAS, Joab. O que é um acelerador de partículas? Brasil Escola. Disponível < <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-acelerador-particulas.htm>>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019

[50] FOGAÇA, Jennifer. LHC: o maior acelerador de partículas do mundo. Mundo Educação. Disponível < <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/lhc-maior-acelerador-particulas-mundo.htm>>. Último acesso: 31 de Outubro de 2019.