



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ**  
**FACULDADE DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS E LETRAS DE IGUATU**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA**

**NAIAGRY PAULA DE FRAGA**

**EXPERIMENTOS MENTAIS E PARADOXOS NO ENSINO DA RELATIVIDADE**  
**RESTRITA**

**IGUATU – CEARÁ**

**2018**

NAIAGRY PAULA DE FRAGA

EXPERIMENTOS MENTAIS E PARADOXOS NO ENSINO DA RELATIVIDADE  
RESTRITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Licenciatura Plena em Física da Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciado em Licenciatura Plena em Física.

Orientador: Prof. Dr. Celio Rodrigues Muniz

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

F811e Fraga, Naiagry Paula de.  
Experimentos mentais e paradoxos no ensino de  
relatividade restrita [recurso eletrônico] / Naiagry  
Paula de Fraga. - 2018.  
1 CD-ROM: il.; 4  $\frac{3}{4}$  pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do  
trabalho acadêmico com 64 folhas, acondicionado  
em caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Estadual do Ceará, Faculdade de  
Educação, Ciências e Letras de Iguatu, Graduação em  
Física, Iguatu, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Celio Rodrigues Muniz.

1. Ensino de relatividade. 2. Contextualização  
histórica. 3. Paradoxos da relatividade. I. Título.

530.11

NAIAGRY PAULA DE FRAGA

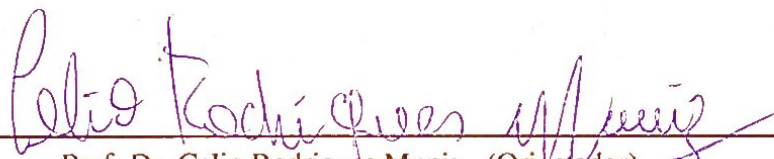
EXPERIMENTOS MENTAIS E PARADOXOS NO ENSINO DA RELATIVIDADE

RESTRITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Licenciatura Plena em Física da Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Licenciado em Licenciatura Plena em Física.

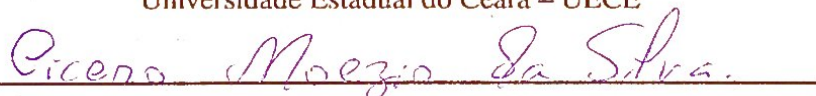
Aprovada em: 15 de Junho de 2018.

BANCA EXAMINADORA



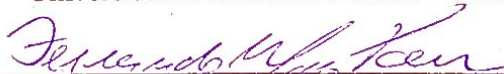
Prof. Dr. Celio Rodrigues Muniz (Orientador)

Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu - FECLI  
Universidade Estadual do Ceará - UECE



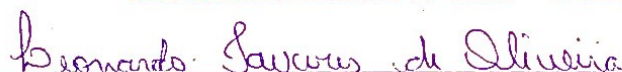
Prof. Dr. Cicero Moezio da Silva

Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu - FECLI  
Universidade Estadual do Ceará - UECE



Prof. Dr. Fernando Martins de Paiva

Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu - FECLI  
Universidade Estadual do Ceará - UECE



Prof. Me. Leonardo Tavares de Oliveira

Faculdade de Educação, Ciências e Letras de Iguatu - FECLI  
Universidade Estadual do Ceará - UECE

À todos aqueles que buscam aprender e transferir  
conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor orientador Celio Muniz, pela sua paciência, dedicação, colaboração e principalmente pela confiança em mim depositada para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Leonardo Tavares, pela colaboração e todos os conselhos.

À minha companheira de turma Thaiana Magna, pelo apoio, incentivo e companheirismo durante todo curso.

A todos os alunos do curso de Física, por contribuírem com minha pesquisa.

A Antônio Patrício, por ter me acolhido e me ajudado na construção gráfica das figuras desse trabalho.

A todos os professores da FECLI, por serem peças fundamentais na minha formação acadêmica.

À mainha, Francisca Paula, pela constante torcida e total apoio.

Aos meus irmãos por todo apoio e sensibilidade.

Aos meus padrinhos, que me acolheram e me ajudaram durante anos.

A todos os amigos(as), Alana Carolina, Mollyna Lúria, Anderson Nayan, Marlene, Luana Alves, Antônio Patrício, Raissa Carvalho, Francisco/Fernando Gomes, Thiane Oceti, Valderiza Patrício, que se fizeram presentes durante todo este processo, me apoiando, motivando e em muitos momentos me acolhendo.

A todos de contribuíram diretamente ou indiretamente em minha vida acadêmica.

“Tanto literal como metaforicamente, o homem acostumado às lentes invertidas experimentou uma transformação revolucionária da visão.”

(Thomas Kuhn)

## RESUMO

O ensino de Física na escola vem enfrentando grandes problemas ao longo dos anos, como a diminuição da carga horária e a utilização de avaliações externas como parâmetros norteadores do ensino, entre outros fatores, que são exemplos claros das reais dificuldades enfrentadas para se efetivar o ensino de Física nesse cenário. Tais problemas influenciam diretamente na escolha dos conteúdos que são abordados em sala, e assim a Física Moderna e Contemporânea é substancialmente atingida e deixada no esquecimento pelos professores que, muitas vezes, não entendem a importância de inserí-la no processo de ensino e aprendizagem dos educandos nas escolas do ensino médio. Desta forma, apresenta-se a contextualização histórica da construção da Teoria da Relatividade Restrita, enfocando seus marcos, suas leis e seus princípios, também buscando através dos experimentos mentais apresentar alguns paradoxos associados a essa teoria, uma vez que a mesma quebra paradigmas e estabelece diversos paradoxos. Ainda utiliza-se de um modelo de pesquisa quantitativa semiestruturada aplicada através de questionário para analisar, junto aos alunos do curso de Licenciatura Plena em Física da UECE-FECLI o ensino de relatividade bem como a compreensão que os mesmos possuem sobre o conteúdo pesquisado. Sobretudo podemos concluir que a relatividade se apresenta como uma temática estimulante, mesmo tendo alunos que não tiveram contato direto com a disciplina no ensino médio os acadêmicos pesquisados apresentam afinidade com a mesma.

**Palavras-chave:** Ensino de relatividade. Contextualização histórica. Paradoxos relativísticos.



## ABSTRACT

The teaching of Physics in the school has been facing major problems over the years, such as the decrease in the workload and the use of external evaluations as guiding parameters of teaching, among other factors, which are clear examples of the real difficulties faced to make teaching in this scenario. Such problems directly influence the choice of contents that are addressed in the classroom, and thus Modern and Contemporary Physics is substantially affected and left to the point of forgetfulness by teachers who often do not understand the importance of inserting it in the teaching and learning process of the students in the schools. In this way, we present the historical contextualization of the construction of the Theory of Restricted Relativity, focusing its milestones, its laws and its principles, also searching through the mental experiments to present some paradoxes associated to this theory, since it breaks paradigms and establishes various paradoxes. It is still use a semi-structured quantitative research model applied through a questionnaire to analyze the teaching of relativity as well as the comprehension they have about the content researched together with the students of the Full Degree in Physics of the UECE-FECLI. Above all, we can conclude that relativity presents itself as a stimulating theme, even having students who did not have direct contact with the discipline in high school the researched academics have an affinity with it.

**Keywords:** Relativity teaching. Historical contextualization. Relativistic paradoxes

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Versão simplificada do interferometro de Michelson Morley . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2 – Transformação de Lorentz . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>Figura 3 – Esquema representativo da viagem de ida e volta de Bruno . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>Figura 4 – Analisando a situação em que para Bruno é seu irmão Adriel que está se deslocando enquanto este permanece em repouso . . . . .</b>	<b>40</b>
<b>Figura 5 – Divisão dos entrevistados por semestre . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>Figura 6 – RESULTADOS DA SITUAÇÃO I . . . . .</b>	<b>48</b>
<b>Figura 7 – Resultados da situação II . . . . .</b>	<b>49</b>
<b>Figura 8 – Resposta dos alunos ao serem indagados a respeito se tiveram ou não aulas de relatividade durante o ensino médio . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>Figura 9 – Formas de contado com a relatividade apresentado pelos entrevistados</b>	<b>52</b>
<b>Figura 10 – Percentual de alunos que acham importante o Ensino de Física Moderna – Relatividade – no Ensino Médio . . . . .</b>	<b>52</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	11
<b>2</b>	<b>A TEORIA DA RELATIVIDADE</b> . . . . .	17
2.1	TEORIA DA RELATIVIDADE UM TRABALHO COLETIVO . . . . .	17
2.2	EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY . . . . .	26
2.3	POSTULADOS DA RELATIVIDADE RESTRITA . . . . .	27
2.4	TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ . . . . .	28
2.5	CONSEQUÊNCIAS DOS POSTULADOS . . . . .	31
<b>2.5.1</b>	<b>Relatividade e Simultaneidade</b> . . . . .	31
<b>2.5.2</b>	<b>Dilatação Temporal</b> . . . . .	34
<b>2.5.3</b>	<b>Contração Espacial</b> . . . . .	34
2.6	PARADOXOS DA RELATIVIDADE . . . . .	35
<b>2.6.1</b>	<b>Experimentos Mentais</b> . . . . .	35
<b>2.6.2</b>	<b>Paradoxos na Física</b> . . . . .	36
<b>2.6.3</b>	<b>Paradoxo do Espelho de Einstein</b> . . . . .	37
<b>2.6.4</b>	<b>Paradoxo dos Gêmeos</b> . . . . .	38
<b>2.6.5</b>	<b>Paradoxo da Garagem</b> . . . . .	41
<b>2.6.6</b>	<b>Paradoxo do Submarino</b> . . . . .	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E RESULTADOS</b> . . . . .	44
3.1	METODOLOGIA . . . . .	44
3.2	RESULTADOS . . . . .	46
<b>3.2.1</b>	<b>Características dos Sujeitos</b> . . . . .	46
<b>3.2.2</b>	<b>Análise dos Experimentos Mentais</b> . . . . .	47
<b>3.2.3</b>	<b>Análise do Ensino de Relatividade</b> . . . . .	50
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	58
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	61
	APÊNDICE A – Questionário da Pesquisa Acadêmica . . . . .	62

## 1 INTRODUÇÃO

Para entendermos a importância de se estudar Física Moderna e Contemporânea - FMC, vamos examinar como a Física é apresentada nos documentos oficiais do Ministério da Educação - MEC. Ainda discutiremos os desafios e dificuldades do ensino de Física no Ensino Médio – EM. A Física, assim como todas as disciplinas, apresenta-se como transgressora e emancipatória, de modo a permitir que o indivíduo compreenda os fatos e fenômenos presentes na natureza. A disciplina é apresentada segundo o Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio – PCNEM como um curso que está:

Incorporado à cultura e integrado como instrumento tecnológico, esse conhecimento tornou-se indispensável à formação da cidadania contemporânea. Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação (BRASIL, 2000, p. 22).

O ensino de Física na escola tem um papel transformador que objetiva despertar nos alunos a capacidade de interações sociais, culturais e científicas, pois o homem é produto das suas interações com o meio e a escola apresenta-se muitas vezes como o primeiro espaço formativo na vida de muitos alunos. Neste contexto, a escola está agregada de valores fundamentais sem ruptura do processo emancipatório. Assim,

ao instituir as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, que organizam as áreas de conhecimento e orientam a educação à promoção de valores como a sensibilidade e a solidariedade, atributos da cidadania, apontam de que forma o aprendizado de Ciências e de Matemática, já iniciado no Ensino Fundamental, deve encontrar complementação e aprofundamento no Ensino Médio. Nessa nova etapa, em que já se pode contar com uma maior maturidade do aluno, os objetivos educacionais podem passar a ter maior ambição formativa, tanto em termos da natureza das informações tratadas, dos procedimentos e atitudes envolvidas, como em termos das habilidades, competências e dos valores desenvolvidos (BRASIL, 2000, p. 6).

Ainda conforme o PCNEM, o conhecimento físico deve ser “explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas” (BRASIL, 2000, p.22). Deste modo, entendemos a importância da abordagem histórica dos acontecimentos científicos, pois a ciência não é um processo atemporal, ela pode ser direcionada, impulsionada ou até mesmo estagnada, neste sentido a ciência não está apartada da sociedade, logo não deixa de ser direta e/ou indiretamente influenciada por contextos sociais, históricos, tecnológicos e até mesmo políticos.

Sabemos que nem sempre toda a população teve acesso à educação, e “durante longo período da história, a escola cumpriu um papel estritamente humanístico de formação das camadas superiores, deixando à margem do conhecimento as camadas populares que se

restringiam ao trabalho manual” (GOMES; SOUSA; ROBELO, 2015, p. 15). Claro que este fato histórico está sendo modificado no decorrer da história e este desafio reflete a necessidade da inserção e de um direcionamento para o novo rumo da educação e o domínio do conhecimento científico.

no final da Idade Média, inicia-se o processo de desvelamento da razão, da abertura para as luzes do conhecimento com a retomada do domínio sobre a natureza e a corrida rumo ao domínio do conhecimento científico. Esse domínio demanda tanto um rigoroso trabalho intelectual quanto um desprezado trabalho manual pela inserção de experimentos, lançando as bases para o desenvolvimento e o estabelecimento da ciência como moderna força produtiva (GOMES; SOUSA; ROBERTO, 2015, p.15).

A escola não era para todos. Contudo, entre diversos debates sobre a finalidade da escola, bem como seu caráter universal e sua gratuidade, atualmente grande parte da população brasileira tem acesso a este direito fundamental. Ainda temos resguardado na Constituição Federal, no Capítulo III referente a Educação, Cultura e Desporto, seção I - da educação, encontramos no Art. 205 que diz que “A educação, direito de todos e dever do Estado e da família, será promovida e incentivada com a colaboração da sociedade, visando ao pleno desenvolvimento da pessoa, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho.”(BRASIL, 1988, p. 205). Portanto, cabe ao Estado, à família e à sociedade garantirem a efetivação deste direito emancipatório, além de entender que a educação oferecida na escola deve preparar o indivíduo para o exercício da cidadania e suas qualificações para o trabalho; embora essa política pública já esteja bem avançada, ainda temos o desafio de efetivá-la na prática, pois o acesso à educação não se faz apenas com salas de aulas, cadeiras e livros, existe todo um aparato que servirá de subsídio motivacional para que ela realmente aconteça.

A escola está cada vez mais voltada para o tecnicismo<sup>1</sup>, onde o aluno está sendo preparado para ingressar no mundo do trabalho, sem entender que os conteúdos vistos na escola estão relacionados com uma formação social e tecnológica mais ampla.

a escola liberal tecnicista que atua no aperfeiçoamento da ordem social vigente (o sistema capitalista), articulando-se diretamente com o sistema produtivo; para tanto, emprega a ciência da mudança de comportamento, ou seja, a tecnologia comportamental. Seu interesse principal é, portanto, produzir indivíduos “competentes” para o mercado de trabalho, não se preocupando com as mudanças sociais (MARQUES, 2012, p. 03).

A escola segue um segundo viés que é a preparação do aluno para inserção na universidade, através de avaliações externas, como é o caso do Exame Nacional do Ensino Médio – ENEM e os vestibulares; em tais avaliações não são cobradas o ensino de FMC, o

<sup>1</sup> "A escola tecnicista, baseada na teoria da aprendizagem, vê o aluno como depositário passivo dos conhecimentos, que devem ser acumulados na mente através de associações."(BRAIT *et al.*, 2010)

que conseqüentemente acarreta na exclusão deste conteúdo. Isso nos leva a refletir sobre as dificuldades da inserção de FMC na escola média, bem como na preparação dos estudantes para a compreensão das Novas Tecnologias<sup>2</sup> e seus impactos na vida humana.

Verificamos o distanciamento da atuação da escola, que consiste, segundo Marques (2012, p. 05), “na preparação do educando para o mundo adulto e suas contradições”; o autor identifica a existência de um instrumento que lhes será fornecido por “meio da aquisição de conteúdos e da socialização” (MARQUES, 2012, p. 05). Apresenta-se assim o princípio da aprendizagem significativa, que consiste na derivação do conhecimento prévio apresentado pelo educando, e tal conhecimento não é levado em consideração nestas avaliações, fazendo com que além da não inserção dos conteúdos de FMC não haja nem o debate das ideias propostas pelas teorias relativísticas e/ou quânticas, que constituem o cerne da disciplina.

Estudar Física está além dessa abordagem conteudista, como é enfocada, estimulada e apresentada nos vestibulares, nas escolas tecnicistas e em alguns currículos de ensino. A Física como estudo da natureza deve ser apresentada de forma amplificada, para que aqueles que tenham o mínimo contato com ela despertem em si a curiosidade e o prazer de compreender mais a fundo os conteúdos abordados e consigam fazer sua análise, assim como identificar os conceitos e leis pertinentes nos fenômenos do mundo que os cercam. Por outro lado, a Física deve despertar no indivíduo uma maior compreensão dos processos técnico-científicos, tornando-o cada vez menos alienado quanto a estes processos.

Compreender formas pelas quais a Física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. Por exemplo, como a relatividade ou as idéias quânticas povoam o imaginário e a cultura contemporânea, conduzindo à extrapolação de seus conceitos para diversas áreas, como para a Economia ou Biologia (BRASIL, 2002, p. 68).

Compreendemos a ciência e a tecnologia como parte integrante da cultura humana, e devemos apresentar o ensino de Física com a finalidade de preparar o aluno, e entendendo que em muitos casos no Ensino Médio pode ser o primeiro e único contato que os estudantes têm ou terão com a Física, em alguns cenários esse único contato se restringe a memorização de fórmulas e conceitos, sem despertar na comunidade escolar o senso crítico que advém na necessidade de conhecer mais a fundo o que se está estudando, e isso é justificado nas Orientações Curriculares para o Ensino Médio, no que diz respeito como as sequências dos conteúdos disciplinas são abordadas nos livros didáticos.

Quando os conteúdos disciplinares são apresentados nos livros didáticos, a sequência das transformações pelas quais passaram acaba mascarando dificulda-

<sup>2</sup> As Novas Tecnologias surgem a partir dos estudos da FMC e dão origem as novas áreas de estudo como é o caso por exemplo da computação, da nanotecnologia, da espectroscopia, astronomia e podemos ver suas aplicações nos satélites, GPS, microprocessadores, etc. Na medida que elas se transformam vão modificando os processos de interação social, deixando o mundo cada vez mais tecnológico e nos levando para o que alguns historiadores chamam de revolução técnico-científica.

des, e eles são mostrados tão simplificados que parece ao aluno ser necessário apenas decorar as fórmulas e os principais conceitos, sem a necessidade de perguntar de onde vieram esses saberes. Será que Newton expressou a lei da gravitação universal tal como a conhecemos,  $F = GMm/r^2$ ? Foi essa a forma originalmente proposta por ele? (BRASIL, 2006, p. 49).

Deste modo, cabe a reflexão sobre como está sendo ensinado a disciplina de Física nas escolas médias. E cabe ao professor rever suas práticas pedagógicas e buscar sempre deduzir junto aos seus alunos as equações, bem como explorar seus significados físicos. Isso facilitará a compreensão dos novos conceitos apresentados, por exemplo, pela física relativística.

Com o surgimento da Física Moderna, a Física passou a ser vista de forma diferente, trazendo consigo conceitos, que já eram consolidados, de uma maneira reestruturada, e que parecem contradizer os conceitos pré-estabelecidos pela Física Clássica, levantando uma série de debates em torno da sua validade. Gerou um estremecimento em toda a comunidade científica, quebrou paradigmas e construiu paradoxos. A relatividade revisa as leis da mecânica e do eletromagnetismo de tal forma que nos permite entender as leis físicas antecessoras não como erradas, mais sim como leis pontuais. Entendemos as leis de Newton, por exemplo, como um caso particular da Teoria da Relatividade Restrita, quando levamos em consideração o mundo de baixas velocidades. Não se pode generalizar essa concepção pois o eletromagnético não é um caso particular, ele já nasce compatível com a teoria relativística.

É importante diferenciar o nosso objeto de estudo, pois a FMC é um conjunto de teorias que vai do micro ao macro. A FMC é composta por duas teorias distintas, desenvolvidas no período de transição do século XIX para o século XX: a Teoria da Relatividade Restrita ou Relatividade Especial, desenvolvida pelo jovem físico Albert Einstein<sup>3</sup>, que formulou esta teoria em 1905; no entanto parte desta teoria já tinha sido deduzida por outros cientistas antes disso, e a Mecânica Quântica proposta pelo físico alemão Max Planck em 1900. Esta teoria começou por explicar o espectro de emissão do corpo negro, porém não trataremos desta teoria aqui. Apesar da Física Moderna ter revolucionado a Física em um aspecto geral, a FMC ainda não é difundida na rede de EM.

Existe uma certa complexibilidade no processo de ensino-aprendizagem de FMC; o ensino de relatividade é “assegurado” pelos PCN’s. No entanto, dentro do texto base, esse conteúdo é apenas citada sem nenhum enfoque ou orientação de como deve ser o repasse de tal conteúdo para os alunos. Dentro dos documentos oficiais temos uma redução de conteúdos de FMC restringindo-se ao estudo da radiação, e dentro do PCN +, vemos que alguns temas da

<sup>3</sup> Albert Einstein nasceu em Ulm, cidade situado no estado federal de Baden-Württemberg na Alemanha, em 14 de março de 1879, em 1901 naturalizou-se suíço. Einstein morreu em abril de 1955, em Princeton, Nova Jersey, aos 76 anos.

Física são privilegiados como “temas estruturadores com abrangência para organizar o ensino de Física” (BRASIL, 2002, p 71), e estes tópicos são norteadores do ensino de Física.

1. Movimentos: variações e conservações
2. Calor, ambiente e usos de energia
3. Som, imagem e informação
4. Equipamentos elétricos e telecomunicações
5. Matéria e radiação
6. Universo, Terra e vida (BRASIL, 2002, p. 71).

Deste modo podemos verificar a necessidade de renovação dos currículos escolares inserindo o ensino de FM e através desta buscar despertar no aluno a curiosidade e o interesse pela Física. Pois o que é ensinado na escola nunca está em contraste com a tecnologia atual, embora os alunos indiretamente tenham contato com a FMC, pois esta faz parte do nosso cotidiano, inserida nos aparelhos tecnológicos, em produções do cinema, documentários, são apresentados nas mídias, como TV e jornais. Se usarmos a mudança dos currículos podemos apresentar a FMC de forma a cativar nossos alunos e apresentar a real ideia que ela nos oferece.

O objetivo deste trabalho é analisar o ensino de relatividade no Ensino Médio a partir da sondagem junto aos alunos do curso de licenciatura plena em física da UECE – FECLI, além da abordagem discursiva da ideia de Experimentos Mentais em Física – EMF e destes partiremos rumo à exploração dos Paradoxos Relativísticos que podem ser explicados utilizando-se dos princípios da TRR. Ainda objetivamos fazer um resgate histórico da teoria da relatividade restrita através de revisão bibliográfica, apresentando assim os principais contribuintes para o desenvolvimento da teoria e, partindo da revisão literária, apresentaremos os conceitos da formulação das ideias relativísticas. Para melhor compreender os conceitos da relatividade especial, faz-se necessário a compreensão de seus postulados; tais princípios podem gerar o que chamamos comumente na Física de experimentos mentais, que se caracterizam, conforme apontado por Brown (1991), como experiências que são desenvolvidas no laboratório da mente e frequentemente não se restringindo a cálculos matemáticos e necessitam essencialmente de manipulações mentais. Pereira (2015) ainda nos diz que as experiências mentais, por serem uma prática comumente usual na Física, já passam despercebidas como experiências irreais e que os paradoxos são instrumentos imaginários utilizados para investigar a natureza das coisas. Desta forma, buscaremos compreender os principais paradoxos da teoria da relatividade restrita, entendendo-os em sua totalidade e buscando suas soluções através do conhecimento adquirido em uma parte da FMC.

A fim de analisar o ensino de Física junto aos alunos do curso de Licenciatura Plena em Física da FECLI, desenvolvemos um questionário semiestruturado que foi aplicado através da plataforma do google forms, e após a coleta de dados fizemos uma análise quantitativa dos



mesmos, o quais serão discutidos na seção de resultados e discussões.

O presente trabalho está organizado em cinco seções. Iniciamos com a introdução, onde discutimos a respeito do ensino de FMC; no segundo tópico debatemos os aspectos históricos e teóricos da teoria da relatividade, correspondendo à fundamentação histórica, à revisão da literatura, à discussão e apresentação das leis e dos princípios da teoria da relatividade restrita; o terceiro tópico trata da metodologia utilizada para a elaboração da nossa pesquisa e dos resultados obtidos na pesquisa além da análise e discussões dos dados coletados, e por fim, apresentamos as considerações finais do presente trabalho.

## 2 A TEORIA DA RELATIVIDADE

Neste capítulo, debatemos aspectos históricos e teóricos da teoria da relatividade, correspondendo à fundamentação histórica e à revisão da literatura, assim como à discussão e apresentação das leis e dos princípios da teoria da relatividade restrita

### 2.1 TEORIA DA RELATIVIDADE UM TRABALHO COLETIVO

Ao longo dos quatro últimos séculos, uma série de observações e experimentos astronômicos alterou radicalmente a forma como a humanidade vê o universo. Assim como o universo geocêntrico de Aristóteles foi substituído pelo universo heliocêntrico de Copérnico, Kepler e Galileu, assim também essa concepção foi modificada e quantificada pelo universo mecânico de Newton. No início do século XX o universo de Newton foi substituído pelo de Einstein. Vivemos atualmente no universo de Einstein, quer o entendamos bem ou não (BRENNAN, 2003, p. 58).

A Teoria da Relatividade Restrita (TRR) originalmente surgiu em um artigo intitulado “Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos Movimento”, publicado na revista *Annalen der Physik* pelo jovem físico Albert Einstein no ano de 1905. Quando publicou sua teoria, ela estava basicamente desenvolvida, e cabe-nos ressaltar que a TRR não se trata de uma teoria obtida a partir da “genialidade” de Einstein, mas sim a partir de uma construção científica gradual e colaborativa.

Einstein é considerado um gênio de nossa era, por ser unicamente atribuído a ele a elaboração da TRR; no entanto seu trabalho foi um trabalho coletivo, embasado nos trabalhos desenvolvidos por outros cientistas tão importantes quanto ele, de modo que os resultados não surgiram do nada, e não podemos perpetuar a ideia de um trabalho individual. Conforme Martins, a teoria da relatividade em sua maior parte se desenvolveu antes do envolvimento de Einstein, graças a importantes pesquisadores, como por exemplo Newton, Galileu, Maxwell, Lorentz e Poincaré, entre outros, antes mesmo da sua formulação, assim como após formulada ainda contou com colaboração dos físicos Minkowski, Planck e Von Laue.

Deste modo, apresentaremos aqui uma descrição histórica sobre o desenvolvimento da TRR e seus principais contribuintes. Buscarei seguir uma abordagem cronológica; no entanto, em alguns momentos, isso não será possível, pois os fatos separados, desconectados cronologicamente, muitas vezes são melhores apresentados, pois contribuem na construção e desconstrução dos conceitos.

Antes mesmo do século XIX já se conheciam outras “relatividades”. No século XVI, por exemplo, “Nicolau Copérnico demonstrou que a trajetória dos planetas (do sistema solar) seria mais facilmente explicada se considerássemos o Sol como centro do universo e

não a Terra” (CHESMAN; ANDRÉ; MACÊDO, 2004, p. 03). A mudança de referencial, que consiste em colocar o Sol no centro do Universo em vez da Terra, pode ser considerada a primeira abordagem relativística. Ainda segundo Chesman, André e Macêdo, posteriormente, no século XVII, tem-se a “Relatividade Galileana” na qual as experiências mecânicas realizadas com dois referenciais com velocidades constantes (um em relação ao outro) são descritas pelas mesmas leis físicas. Ao generalizar os resultados de Galileu, Newton concluiu que as leis da mecânica são invariantes para observadores em referenciais inerciais, livres da atuação da aceleração que resultaria na mudança de seu estado natural de movimento uniforme, o que passou a ser chamada de “Relatividade Newtoniana”.

No início do século XIX, em 1818, Fresnel deduziu uma teoria para o éter; ele “admitia que esse meio estava em repouso, em todo o Universo – ou seja, o movimento da Terra não afetaria o éter, e este não seria capaz de arrastar a Terra. O éter seria capaz de atravessar os objetos por mais espesso que fosse” (MARTINS, 2015, p. 48), ainda “admitia que a luz seria uma onda do éter e sua velocidade em relação ao éter seria constante. Porém, dentro de corpos transparentes a velocidade da luz diminui” (MARTINS, 2015, p. 49). O que significa dizer que, para Fresnel, a luz era parcialmente arrastada pelo éter na medida que a Terra passasse por ele.

Já em 1845 o físico G. G. Stokes propôs uma teoria menos complexa do que a teoria de Fresnel. Ele “propôs que o éter seria semelhante a um líquido viscoso, que aderiria à superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra quando ela se move pelo espaço, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo” (MARTINS, 2015, p.53). Ou seja, sugeria que o éter fosse consistente, com velocidade nula na superfície da Terra e que seria impossível medir a velocidade da Terra em relação ao éter; além disso, ele “provou que era possível explicar a aberração estelar, em sua teoria, mostrando que havia uma gradual mudança de direção da luz à medida que ela atravessava as sucessivas camadas de éter com diferentes velocidade” (MARTINS, 2015, p. 53). Mostrando a compatibilidade de sua teoria com os fenômenos conhecidos na época. E em 1846, Stokes generaliza sua teoria afirmando que “embora a Terra se mova em relação ao éter e a luz seja transmitida pelo éter, os fenômenos da óptica geométrica (reflexão, refração e propagação retilínea) não permitem detectar esse movimento” (MARTINS, 2015, p.53).

Foram feitas algumas experiências para verificar a existência do éter, porém não se obtiveram resultados que comprovassem sua existência e “ao contrário do que muitas pessoas pensam, nem Einstein nem qualquer outro pesquisador provou que o éter não existe e que os lugares onde não existe matéria constituem um vazio absoluto” (MARTINS, 2015, p.257).

Os estudos de difração e interferência da luz, apresentados pelo médico Inglês Thomas Young (1773 - 1829) e pelo engenheiro francês Augustin Jean Fresnel (1788 - 1827), são marcos no estudo da ótica discutida desde a antiguidade, pois durante a transição do século XVIII ao século XIX tais estudos representam o momento de “mudança nas teorias sobre a natureza da luz” (MARTINS, 2009, p. 48) ou como expresso por Moysés Nussenzveig (2014) o triunfo da teoria ondulatória, que é marcado por “importantes evidências favoráveis à hipótese ondulatória” (MARTINS, 2009, p. 48). O xeque mate foi dado em 1850, quando Foucault e Fizeau “mediram as velocidades da luz no ar e na água, e mostraram que a velocidade na água era menor que no ar”) (NUSSENZVEIG, 2014, p. 18).

Em 1881, Albert Michelson (1852 - 1931) e depois, em 1887, Edward Morley (1838-1923) tentaram medir experimentalmente a velocidade da Terra em relação ao éter. No “engenhoso experimento no qual a velocidade da luz em relação ao éter era comparada em dois raios luminosos, um na direção do movimento da Terra em relação ao Sol e o outro perpendicular à direção do movimento da Terra” (TIPLER, 2000, p. 89), Michelson e Morley tentaram medir a velocidade da Terra em relação ao éter utilizando um interferômetro de ondas luminosas construído por eles

Paralelamente aos estudos de óptica no século XIX, desenvolvia-se o estudo do eletromagnetismo. M. Faraday<sup>1</sup> defendia a “ideia que as forças eletromagnéticas são transmitidas por *linhas de força* que teriam realidade física. Segundo ele, duas cargas elétricas que se atraem ou repelem não interagem diretamente à distância. Elas são puxadas ou empurradas pelas linhas de força” (MARTINS, 2015, p. 87). “Antes de Faraday, a maior parte dos físicos pensava que as forças elétricas e magnéticas eram ações diretas à distância” (MARTINS, 2015, p. 87) e, mesmo após sua proposta eles ainda trabalhavam usando a ideia preponderante de forças diretas à distância. As linhas de força representam a direção do campo em cada um dos seus pontos, e “é definida como uma *curva tangente à força em cada ponto*” (NUSSENZVEIG, 1997, p. 20).

Em meados do século XIX, J. C. Maxwell<sup>2</sup> formulou a teoria do eletromagnetismo, teoria esta capaz de explicar os fenômenos elétricos e magnéticos conhecidos na época. A velocidade da luz calculada por ele em um meio hipotético corresponde a  $v \cong 2,999792 \times 10^8 \text{ m/s} = c$ ; este resultado encontrado por Maxwell, já era “conhecido pelas experiências com observações

<sup>1</sup> Michel Faraday (1791-1867), filho de ferreiro, com pouca educação formal, aprendeu sozinho ciência o que lhe foi suficiente para torna-se físico experimental, tornou-se assistente no laboratório do instituto Real da Grã-Bretanha, onde permaneceu por 46 anos, terminando diretor do instituto.

<sup>2</sup> James Clerk Maxwell (1831-1879), físico escocês de família abastada, formado na Universidade de Edinburgh. Começou a estudar magnetismo e eletricidade com os artigos de Faraday e aplicando seus prodígios talentos matemáticos.

astronômicas dos satélites de Júpiter e por medições terrestres de Fizeu [...] e de Foucault [...], o valor de  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  havia sido determinado por experiências puramente eletromagnéticas de Kohlraush e Weber” (NUSSENVEIG, 1997 p.271). Segundo Maxwell, citado por Moysés Nussenzveig (1997),

velocidade das ondas transversais em nosso meio hipotético, calculado a partir dos experimentos dos Srs. Kohlrausch e Weber, concorda tão exatamente com a velocidade da luz, calculada pelos experimentos óticos do Srs Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é causa dos fenômenos elétricos e magnéticos” (NUSSENZVEIG, 1997, p.271).

A conciliação dos resultados obtidos pelo cálculo da velocidade da luz em um meio hipotético, estabelecido por Maxwell, com os resultados das observações astronômicas realizadas por Fizeu e Foucault.

Em 1862, Maxwell afirma que a luz é uma onda eletromagnética e que ela se propaga em um meio hipotético. Na época, o idealizado vácuo<sup>3</sup> era uma região onde não existem cargas nem corrente. A hipótese de Maxwell trazia inquietação aos cientistas da época, pois a ideia que prevalecia no século XIX era a da existência do “*éter luminífero*, ou simplesmente éter que preenchia todo o espaço” (MORAIS, 2010, p. 84), pois “se a luz era uma onda, deveria existir alguma coisa que ondulasse, mesmo no espaço aparente vazio” (MARTINS, 2015, p. 48). Assim o éter seria um meio necessário e “deveria corresponder a um sistema de referência absoluto” (MORAIS, 2010, p. 84) de propagação das ondas eletromagnéticas assim como o ar é um meio de propagação necessário para que a onda sonora se propague.

Conforme apresentado por Roberto Martins, Maxwell pensava que todo o espaço poderia estar preenchido de uma substância, o éter e, comprovando teoricamente que no espaço “vazio” poderiam existir ondas eletromagnéticas com velocidade próxima à da luz, que a própria luz é um fenômeno eletromagnético e o éter serve para transmitir forças elétricas e magnéticas além de propagar as ondas luminosas. Para ele o éter era composto de várias propriedades mecânicas, como por exemplo:

A energia eletrostática estaria armazenada sob forma de tensão no éter, sendo portanto um tipo de energia potencial estática. A energia magnética, por sua vez, seria uma forma de energia cinética (de rotação dos elétrons que constituem o éter). O éter seria capaz de produzir não apenas forças e armazenar energia, mais também teria em certas circunstâncias, uma quantidade de movimento (Momentum). Podia, assim, ser pensada como uma realidade física, um ente dotado de propriedades mecânicas (MARTINS, 2015, p. 89).

<sup>3</sup> O vácuo é um meio linear, homogêneo e isotrópico, e suas constantes elétricas são designadas por  $\epsilon_0$  (permissividade do vácuo ou constante elétrica) e  $\mu_0$  (permeabilidade do vácuo ou constante magnética).

Em 1887. “O mundo científico manteve-se cético diante das ideias radicais [de Maxwell] até que Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) efetuou uma série de experimentos” (BRENNAN, 2003, p.66) em laboratório e estudou as ondas eletromagnéticas, demonstrando a validade da teoria de Maxwell através da verificação da proximidade dos valores experimentais e reais para a velocidade de propagação da luz no vácuo. Após, com os experimentos de Hertz, que posteriormente foram reproduzidos por outros pesquisadores, a teoria do eletromagnetismo de Maxwell foi aceita pela comunidade científica, assim como a ideia de um éter eletrostático e óptico.

Além disso, os trabalhos de Maxwell já eram relativísticos, pois eram apresentados levando-se em consideração os referenciais inerciais em repouso em relação ao éter, e quando estudados fenômenos eletromagnéticos em relação ao éter podemos encontrar novos efeitos. Ainda em 1887 foi publicado um livro de Maxwell intitulado *Matéria e Movimento*; nele eram abordados aspectos relativísticos da teoria de Maxwell, conforme Martins. Na obra de Maxwell encontram-se trechos nos quais estão contidas as ideias relativísticas, que na época não eram usuais. Assim, na obra encontra-se a seguinte frase: “Relatividade do conhecimento dinâmico – todo nosso progresso até esse ponto pode ser descrito um desenvolvimento gradual da relatividade de todos os fenômenos físicos”. O que nos mostra que implica dizer que o eletromagnetismo já nasce com um caráter relativístico.

No ano de 1887, Woldemar Voigt (1850-1967), em seus estudos sobre o Efeito Doppler da luz, estudou as propriedades das ondas luminosas em diferentes referenciais. Ele definiu que estas ondas devem possuir a mesma equação de propagação em todos os referenciais, e por isso verificou a necessidade de existir um tipo de transformação de coordenadas para se encontrar a tal equação de onda idealizada por ele. Não veremos aqui as transformações de Voigt, apesar de apresentarem resultados coerentes para a transformações relativísticas das velocidades; além disso elas são antecessoras das transformações de Lorentz<sup>4</sup>.

Em meados de 1892, Fitzgerald e Lorentz “propuseram a hipótese de contração de objetos que se movem através do éter” (MARTINS, 2015, p. 94). Tal hipótese foi proposta com a finalidade de explicar os resultados encontrados experimentalmente por Michelson e Morley, o que posteriormente foi verificada como consequência das transformações de Lorentz. “Em 1895, Lorentz propôs sua primeira teoria de eletromagnetismo para sistemas em movimento, considerando apenas efeitos de primeira ordem em  $v/c$ ” (MARTINS, 2015, p. 94). Para isso,

<sup>4</sup> Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), físico teórico Holandês nascido em Arnhem, estudou em física e matemática na Universidade de Leiden onde obteve aos 21 anos o título de doutor e anos mais tarde a convite da universidade tornou-se professor.

ele utilizou das equações de Maxwell na forma abordada por Oliver Heaviside, em 1884, após a morte de Maxwell. Heaviside reformulou as equações de Maxwell para uma representação mais simples utilizando-se de cálculo vetorial. Ainda como apresentado por Martins, Lorentz assumiu que as equações são válidas apenas para a descrição de fenômenos em referenciais com relação ao éter, e ainda supôs que as equações podem ser válidas em outros referenciais, buscando as condições para que isso pudesse acontecer.

Conforme Martins, Lorentz, em seu estudo sobre a propagação de ondas eletromagnéticas nos corpos, considerou pela primeira vez em 1875 a natureza atômica da matéria, encontrando um fator para a reflexão da luz para cada substância independente da sua densidade. Assim, em 1880, existiam dois pilares que dominavam a Física: a Mecânica Newtoniana e a Eletrodinâmica de Maxwell. Durante essa década Lorentz se dedicou a estudar a questão da termodinâmica, teoria cinética dos gases e mecânica estatística. E na década de 1890 dedicou-se a estudar o que posteriormente foi chamada de “teoria dos elétrons”. Lorentz “foi o primeiro a sugerir que a massa de uma partícula carregada cresceria com a velocidade. Einstein percebeu que o trabalho de Lorentz ao incorporar o elétron à Física newtoniana-maxwelliana da época era fundamental para seu próprio trabalho” (BRENNAN, 2003, p.67).

Henri Poincaré<sup>5</sup> sem dúvida foi um matemático e físico brilhante que durante sua vida contribuiu significativamente para o desenvolvimento científico e aqui merece destaque pelas suas contribuições para a teoria da relatividade. Segundo Martins, em 1899 Poincaré propôs a “lei da relatividade” a qual obedece ao princípio de que somente corpos materiais podem produzir efeitos físicos e que eventuais efeitos devido ao movimento dos corpos se cancelam de tal modo que não podem ser percebidos; deste modo é impossível detectar movimento através do éter em nenhum tipo de experiência. Assim, deve-se procurar uma teoria compatível à lei da relatividade e não ficar buscando soluções a experiências isoladas que acabam criando novas e desnecessárias hipóteses.

Conforme Martins, no ano seguinte, 1900 (mesmo ano em que Einstein receberá seu diploma), Poincaré publicou outro trabalho no qual utilizava a nomenclatura “princípio do movimento relativo” ao invés de “lei da relatividade”; neste novo trabalho ele apresentou novas ideias sobre o “tempo local” de Lorentz, e

mostrou que essa variável [tempo local] representava tempo médio quando dois

<sup>5</sup> Jules Henri Poincaré (1854-1912), nascido na cidade de Nancy, na França. Matemático, físico e filósofo que, no decorrer de sua carreira como professor, foi membro de 35 academias de muitos países e diretor da Academia de ciências francesa em 1906. Desenvolveu grandes trabalhos tanto na matemática quanto na física. Aos 53 anos veio a óbito deixando a ciência em luto e uma herança de 30 livros e cerca de 500 artigos publicados.

relógios estão sincronizados por meios de sinais luminosos. Basicamente, o uso do “tempo local” significava usar a velocidade da luz como um padrão; e, por causa disso a velocidade da luz torna-se um invariante (MARTINS, 2015 p.105).

A cima de tudo, Poincaré se preocupava muito com a interpretação física da teoria de Lorentz. Em 1900, mostrou que o “tempo local” de Lorentz era equivalente ao tempo medido por relógios sincronizados por sinais luminosos (ou ondas eletromagnéticas de qualquer tipo) (MARTINS, 2015 p.129).

em 1902, no seu livro *Ciência e hipótese*, Poincaré utilizou o nome “princípio de relatividade” para sua lei. [...] Para Poincaré, ele seria simplesmente extrapolação dos resultados obtidos durante o século XIX. Por mais que se tentasse, não se conseguia medir a velocidade da luz em relação ao éter (MARTINS, 2015 p.105).

Neste livro Poincaré apresentava o princípio da relatividade, a sincronização de relógios por luz e os resultados que haviam sido obtidos por Lorentz e outros até essa época.

em 1904, publicou um trabalho no qual mostrava que transformações de Lorentz implicavam uma quebra de simetria dos relógios em diferentes referenciais, e que o resultado obtido era exatamente igual ao que se obtém fazendo a sincronização como uso de sinais luminosos e assumindo também que, em relação a todos os referenciais, a velocidade da luz era a mesma (MARTINS, 2015 p.129).

Ainda devido seu interesse pelas interpretações físicas da teoria de Lorentz, conforme Martins, Poincaré, apresenta outras consequências das transformações de Lorentz. Ele

mostrou também que as transformações de Lorentz levam à ideia de uma dilatação do tempo e discutiu o significado físico desse efeito. Utilizando as mesmas transformações, mostrou que a velocidade da luz no vácuo era a velocidade limite que poderia obter utilizando composição de velocidades (MARTINS, 2015 p.129).

Segundo Martins, o desenvolvimento da teoria da relatividade de Poincaré pode ter surgido em resposta aos artigos de Larmor e Lorentz, onde apontou alguns erros, aperfeiçoou vários pontos e propôs complementos das ideias apresentadas, ajudando na construção de novas teorias. Ainda foi Poincaré que batizou as transformações de Lorentz com este nome. Curiosamente o trabalho publicado por Poincaré em 1904 propõe revisão da Física Clássica anterior ao eletromagnetismo. Como nos é apresentado no texto de Martins:

Por fim, nesse mesmo trabalho Poincaré adotou uma posição de ruptura radical com a antiga física, propondo que seria necessário construir uma nova dinâmica geral, aplicável a todos os corpos (não apenas ao elétron) e que todas as leis físicas deveriam ser revisadas de modo a serem conciliadas com os resultados obtidos no eletromagnetismo e com o princípio da relatividade (MARTINS, 2015 p.129).



Ainda segundo Martins, Einstein leu o livro *Ciência e hipótese* de Poincaré entre os anos de 1902 e 1903, no círculo da leitura “*Akademia Olympica*” da qual ele fazia parte; porém não se sabe se fez leituras de trabalhos anteriores a este. E em 1905, Poincaré escreveu um artigo contendo sua maior contribuição. Nele foram feitas algumas correções dos problemas da teoria de Lorentz:

mostrou que ele não havia obtido a transformação adequada para a densidade de corrente elétrica, que necessitaria introduzir essa pequena modificação para que todos os fenômenos eletrostáticos fossem idênticos, em referenciais parados ou em movimento em relação ao éter. [...] Poincaré introduziu, nesse trabalho, a ideia que o tempo pode ser manipulado como uma quarta dimensão, e mostrou a existência de invariantes relativísticos como o intervalo espaço temporal que atualmente representamos com  $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$  (MARTINS, 2015 p.130)

No entanto este trabalho foi encaminhado para a revista *Rendiconti del Circolo Matematico del Palermo*, na Itália, em meados de 1905 e só foi publicado no ano seguinte. Ainda em 1905, Poincaré também escreveu um artigo mais curto, do que o citado acima, que foi publicado na revista da academia de Ciências de Paris no mesmo ano; neste artigo eram abordados os resultados resumidos do artigo mais longo que deveria ter sido publicado no mesmo ano.

Albert Einstein, após formado, teve dificuldades para arrumar emprego e em 1902 dava aulas particulares de Matemática e Física, porém com poucos interessados, e em 1904 trabalhava em um escritório de patentes. Neste mesmo ano ele “foi convidado a escrever resumos de artigos publicados sobre Termodinâmica e Mecânica Estatística, para o periódico *Billetter zu den annalen der physik*. Para desenvolver este trabalho ele recebia artigos publicado em vários países” (MARTINS, 2015 p,189) o que lhe possibilitou estar informado sobre a atualidade científica da época. Em 1905, ao publicar o trabalho mais importante, no qual estava “incluindo suas primeiras contribuições sobre a teoria da relatividade” (MARTINS, 2015 p,190), Einstein não teve grandes repercussões, pois nesta época já eram conhecidos diversos pontos da TRR bem como os principais resultados da dinâmica relativística. Conforme Martins,

O princípio da relatividade; As transformações de Lorentz para o espaço e o tempo, de onde pode ser deduzida toda a cinemática relativística; As transformações das grandezas eletromagnéticas; A maior parte da dinâmica relativística. [...] [e os principais resultados são:] A equação da variação da massa do elétron com a velocidade; Relação entre o fluxo de energia e momentum; A relação entre massa e energia, em alguns casos específicos (sem formulação geral) (MARTINS, 2015 p.224)

Quase todos os resultados encontrados por Einstein em seu primeiro artigo [...] já haviam sido encontrados por Lorentz e Poincaré. No entanto, havia

uma importante diferença epistemológica entre seus antecessores. Enquanto Lorentz e Poincaré aceitavam a existência de um éter (seguindo a concepção de Maxwell), Einstein negou a validade de se falar a respeito do éter, já que ele era imensurável (MARTINS, 2015 p.232).

As ideias apresentadas por Einstein em seu artigo, apesar de não serem novas, compõe-se de outra abordagem mais próxima de uma revisão didática com a inserção epistemológica<sup>6</sup> em suas ideias, o que não deixa de ser uma contribuição para TRR. Na abordagem de Einstein da TRR, segundo Martins, são apresentadas três novidades fundamentais: a primeira delas é referente a uma abordagem mais simples da TRR do que a apresentada por Lorentz e Poincaré. Consiste na apresentação dos resultados da cinemática relativística, deduzidos a partir de dois postulados, o princípio da relatividade e o princípio da invariância da velocidade luz, onde o primeiro havia sido proposto por Poincaré e o segundo consistia na consequência direta da suposição que a luz é uma onda que propaga no éter. Deste modo Einstein deduziu de forma simples que poderíamos adotar os postulados como ponto de partida.

A segunda contribuição se dá pela relação entre a massa e a energia, a famosa equação  $E = mc^2$ , que se estabelece como uma relação geral para a teoria; no entanto “não provou que a relação  $E = mc^2$  era geral, apenas deduziu em um caso particular e depois propôs que fosse considerado aplicável a todos os casos” (MARTINS, 2015, p.226). E essa generalização pode nos dar interpretações errôneas para a TRR. A terceira novidade apresentada por Einstein consiste na negação da existência do éter argumentando que a Física deve trabalhar com o que pode ser observado e medido, o que é uma ideia epistemológica de natureza mais filosófica do que científica. Em 1906 Max Planck descreve os trabalhos de Einstein como uma generalização da teoria de Lorentz” (MARTINS, 2015 p.227), nomeando ao conjunto desses trabalhos “teoria da relatividade”; no entanto Albert preferia chamá-la de “princípios da relatividade”. Planck ainda apresentou em 1907 a termodinâmica relativística. Em 1908 Mikowski criou o conceito de espaço-tempo e do diagrama do cone de luz, que foi utilizado erroneamente na comemoração do centenário da luz em 2005. Assim, devemos deixar de colocar a figura de Einstein como central no desenvolvimento teoria da relatividade quando este foi apenas mais um contribuinte para o desenvolvimento desta teoria.

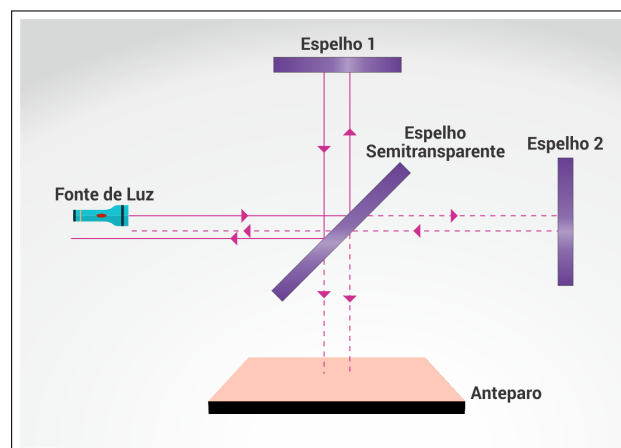
<sup>6</sup> Epistemologia é a teoria do conhecimento, do que este consiste, de como podemos obtê-lo e como podemos defender e justificar o nosso conhecimento.

## 2.2 EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

Em 1881, o físico Albert. A. Michelson inventou o interferômetro, “dispositivo que pode ser usado para medir comprimentos ou variação de comprimento com grande precisão, através de franjas de interferência” (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003, p. 66), e em 1887, Edward W. Morley colaborou com Michelson no desenvolvimento de uma versão mais elaborada do interferômetro com a finalidade de calcular a velocidade da Terra através do espaço em relação ao éter. A experiência realizada foi nomeada experimento Interferômetro de Michelson – IMM; o interferômetro é composto de uma fonte luminosa, um espelho semitransparente, dois espelhos e um anteparo onde será observado o padrão de interferência.

Assim, na medida em que a fonte emite luz, ela percorrerá um trajeto até chegar no espelho semitransparente onde a onda de luz será dividida - uma parte ultrapassará o espelho semitransparente e irá ao encontro do espelho 2 ao lado direito da figura 1 abaixo, e a outra parte de luz irá ser refletida na direção do espelho 1; em ambos os espelhos a luz será refletida e voltará na direção do espelho semitransparente e continuará seu percurso até chegar no anteparo, onde será formado um padrão de interferência.

**Figura 1 – Versão simplificada do interferometro de Michelson Morley**



Fonte – Elaborado pela autora

O objetivo deste experimento era observar um padrão de interferência destrutiva, demonstrando assim a existência do éter, e este “éter luminífero” corresponderia a um meio absoluto de referencial. Deste modo seria possível determinar a velocidade da Terra no espaço com relação ao meio absoluto.

Assim, conforme Nussenzveig (2014), se o experimento de Michelson e Morley fosse válido, poderíamos detectar o movimento retilíneo uniforme da Terra em relação ao éter,

e assumia-se como válidas a mecânica newtoniana e as equações de Maxwell. No entanto, a relatividade não se aplica a todas as leis físicas, pois ao se usar a lei da composição das velocidades de Galileu chega-se ao resultado que a velocidade de propagação da luz em relação ao éter não apresenta variações nas direções de propagação, o que evidenciaria a inexistência do éter como meio absoluto.

Os resultados encontrados neste experimento correspondem a um valor nulo, diferente do valor negativo o qual representaria uma inferência negativa, indicando assim a não existência do éter. O experimento foi refeito diversas vezes, modificando as posições do interferômetro, em estações distintas do ano, porém para a surpresa dos físicos nada foi detectado. Segundo Resnick (1971), o resultado negativo foi um golpe a hipótese do éter e durante cerca de 50 anos vários pesquisadores refizeram o experimento, no entanto, os resultados nulos foram amplamente confirmados, esses resultados negativos foram essenciais para a compreensão da Teoria da Relatividade Restrita publicada em 1905 por Einstein.

### 2.3 POSTULADOS DA RELATIVIDADE RESTRITA

Sabendo se que no início do século XIX as equações de Maxwell foram amplamente confirmadas, Albert Einstein em seu artigo “*Sobre a Eletrodinâmica de Corpos em Movimento*” (RESNICK, 1971, p. 39) apresentou dois postulados que são fundamentais para explicar a eletrodinâmica de corpos em movimento sem ser necessário utilizar a ideia do éter como meio absoluto. Segundo Albert Einstein citado por Gazzinelli:

“o insucesso das experiências feitas para detectar qualquer movimento da Terra em relação ao éter, sugere os fenômenos da eletrodinâmica, tal como os da mecânica, não apresentam nenhuma propriedade que corresponde à ideia de repouso absoluto. Ao contrário, eles sugerem que em todos os sistemas de coordenadas são válidas as leis ópticas e eletromagnéticas – o que até a primeira ordem de grandeza já está demonstrado. Vamos elevar a categoria de postulado essa conjectura (que chamaremos daqui em diante de princípio da relatividade); vamos, além disso introduzir o postulado – só aparentemente incompatível com o primeiro – de que a luz no vácuo, se propaga com velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte de luz” (GAZZINELLI, 2009, p. 25-26).

Em outras palavras podemos escrever os princípios da relatividade apresentados por Einstein como o

1. Princípio da Relatividade Restrita: Todas as leis da física são as mesmas para todos os referenciais inerciais, de modo, que não existe um referencial inercial absoluto e privilegiado.

2. Princípio da Constância da Velocidade da Luz: A velocidade da luz no vácuo,  $c$ , se propaga com a mesma velocidade em todas as direções, independentemente da velocidade e do movimento do observador e da fonte emissora da luz.

Os princípios da relatividade são responsáveis pela formação da base da TRR, ao ser aplicada em referenciais em movimento com velocidades constantes. Sendo o Princípio da Relatividade a generalização do Princípio de Galileu que dizia que todas as leis da mecânica eram as mesmas em todos os referenciais inerciais, tendo a primeira lei de Newton como resultado direto deste postulado; já a relatividade Einstein inclui todas as leis, como o eletromagnetismo e a óptica. Ainda no segundo postulado da Constância da Velocidade da Luz no vácuo podemos afirmar que na natureza existe uma velocidade limite<sup>7</sup>,  $c$ , que é a mesma em todas as direções e que nenhuma partícula com massa, ou capaz de transportar energia ou informações poderá ultrapassar essa velocidade limite (SERWAY; JEWETT, 2014; HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003).

Antes de apresentar o formalismo da teoria da relatividade restrita, convém citar os fatos experimentais que levaram a sua formulação. Assim segundo Chesman, André e Macêdo:

1) A velocidade da luz é uma constante universal e é a velocidade limite para as para partículas materiais. Além disso é invariante quando medida a partir de um sistema de referência inercial (referenciais sem aceleração); 2) A lei da adição de velocidades (relatividade galileana) não é válida para ondas eletromagnéticas; 3) No regime de altas velocidades (velocidades próximas a da luz) a velocidade de uma partícula não é diretamente proporcional à raiz quadrada de sua energia cinética (CHESMAN, ANDRÉ e MACÊDO, 2004, p. 69).

Para formular a TRR inicialmente é necessário encontrar o conjunto transformações necessárias para a mudança entre referenciais inerciais com a imposição da invariância da velocidade da luz. Por razões históricas essas equações são chamadas de transformações de Lorentz.

## 2.4 TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

As transformações de Lorentz representam uma abordagem matemática que foi elaborada afim de demonstrar a invariância da velocidade da luz e das equações de Maxwell, pois

<sup>7</sup> A velocidade limite foi demonstrada em 1964 no experimento de W. Bertozzi, onde o cientista acelerou elétrons até que atingisse varias velocidades diferentes e ao mesmo tempo mediu a energia cinética desses elétrons. E observou que por maior que seja a energia fornecida a um elétron (ou qualquer outra partícula com massa), a velocidade da partícula jamais atinge ou supera a velocidade limite  $c$ , ou seja, quando uma força é aplica em uma partícula massiva em altas velocidades, a energia cinética aumenta, mas a velocidade praticamente não varia. A velocidade limite foi definida exatamente como  $c=299\ 792\ 458$  m/s. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2003)

a constância da velocidade da luz, para qualquer observador, já havia sido confirmada experimentalmente. As transformações de Galileu obedecem "as regras que definem as transformações entre dois sistemas de referenciais inerciais" (CHESMAN; ANDRÉ; MACÊDO, 2004, p. 70),  $S$  e  $S'$  com coordenadas  $(x, y, z)$  e  $(x', y', z')$ , respectivamente. Considera ainda "que o tempo é invariável absoluto e independente do referencial, pois o tempo medido é mesmo nos dois referenciais" conforme Chesman; André e Macêdo (2004, p. 71). Ou seja  $t = t'$ . Assim temos que, para o referencial  $S'$  movimentando-se ao longo do eixo  $x$  de  $S$  mantendo os outros eixos  $y'$  e  $z'$  paralelos a  $y$  e  $z$ , o conjunto de transformações de Galileu é dado por:

$$x' = x - vt; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = t. \quad (2.1)$$

Ainda pela mecânica clássica sabemos que esse conjunto de transformações é válido para o caso de velocidades pequenas se comparadas com a velocidade da luz, ou seja, para  $v \ll c$ . E o fato do tempo ser absoluto implica dizer que dois eventos que são simultâneos em um referencial o serão para os observadores em todos os referenciais.

As transformações de Lorentz devem substituir as de Galileu, segundo Nussenneig (2014). Uma vez que a velocidade da luz é invariante, independentemente do referencial inercial, sendo válido o princípio da relatividade especial, de modo que, o espaço-tempo é homogêneo<sup>8</sup> e isotópico<sup>9</sup>, portanto incompatível com as transformações de Galileu. Assim para encontrarmos as transformações de Lorentz, imaginaremos um evento  $P$ , em determinado ponto do espaço e em um instante  $t$  do tempo.

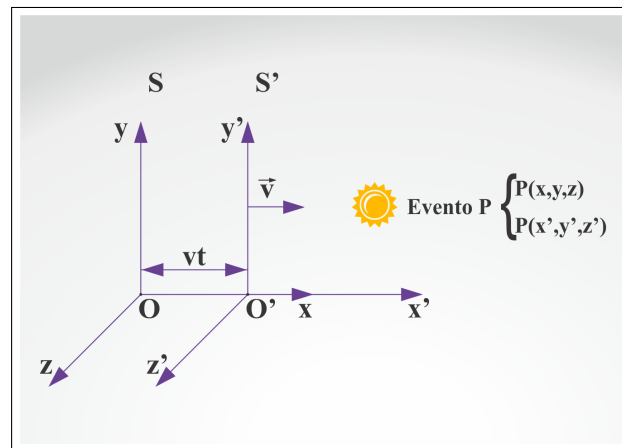
Seja um conjunto de referenciais dados por  $S$  e  $S'$ , cujo os eixos são coordenados e paralelos  $(x//x', y//y', z//z')$ . Supondo que as origens dos referenciais coincidam em  $t = 0$  e  $t' = 0$ , e supondo ainda que o referencial  $S'$  se mova paralelamente no eixo  $Ox$  com velocidade  $V$  constante. Conforme apresentado na figura 2.

Ao pensarmos um evento  $P$ , digamos que uma fonte luminosa se deslocando com velocidade  $V$  junto ao referencial  $S'$ , que obedeça aos princípios da teoria da relatividade, teremos então um sistema quadridimensional, onde a junção espaço-tempo é absoluto e o espaço e o tempo vistos separados passam a ser relativos, com coordenadas dados por  $x, y, z, t$  e  $x', y', z', t'$  nos referenciais  $S$  e  $S'$  respectivamente, de modo que para localizar o evento  $P$  no referencial  $S$  por exemplo, necessitaremos utilizar as quatro variáveis  $x, y, z, t$ , e admitindo ainda, que o referencial  $S'$  está se movendo com velocidade  $V$  constante na direção  $x$ .

<sup>8</sup> Homogêneo, não existe ponto privilegiado.

<sup>9</sup> Isotópico, não existe direção privilegiada.

**Figura 2 – Transformação de Lorentz**



Fonte – Elaborado pela autora

Imagine que o evento  $P$  corresponda a uma emissão de feixe de luz. Temos que o evento obedecerá, conforme Resnick (1971), ao conjunto de funções  $x' = f(x, y, z, t)$ ;  $y' = f(x, y, z, t)$ ;  $z' = f(x, y, z, t)$  e  $t' = f(x, y, z, t)$ , que quer dizer que as transformações das equações da transformação que relacionam as coordenadas do espaço-tempo de um evento, visto por outro observador.

E partindo dessas funções ou da transformação linear das equações que compõem a transformação Galileu encontramos as equações que correspondem a Transformação de Lorentz. Uma vez que  $x$  e  $t$  são lineares, a velocidade da luz é invariante e que a homogeneidade e isotropia são validas, e aplicando a transformação linear nas equações da TG encontraremos a transformação de Lorentz, conforme apresentadas por Tipler (2000). Assim a Transformação de Lorentz de um evento  $P$  visto do referencial  $S$  em relação a  $S'$  é

$$t = \gamma \left( t' + \frac{V}{c^2} x' \right); \quad x = \gamma (x' + Vt'); \quad y = y'; \quad z = z' \quad (\text{transformação de Lorentz}). \quad (2.2)$$

E a transformação inversa

$$t' = \gamma \left( t - \frac{V}{c^2} x \right); \quad x' = \gamma (x - Vt); \quad y' = y; \quad z' = z \quad (\text{transformação inversa de Lorentz}). \quad (2.3)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$  é chamado fator de Lorentz e podemos chamar  $v/c = \beta$ , de modo que fator de Lorentz é uma constante que depende de  $V$  e de  $c$  e não das coordenadas o mesmo é valido para a função inversa, onde a mudança estará

apenas no sinal negativo que será acompanhado da velocidade representando que o referencial  $S'$  está indo em direção do referencial  $S$ .

Assim podemos dizer que na medida que a velocidade da luz se aproxima do infinito,  $c \rightarrow \infty$ , todas as velocidades finitas seriam pequenas, de modo que  $\gamma \rightarrow 1$ . Nota-se que as equações (2.1) e (2.2) da transformação de Lorentz se reduzem a transformação de Galileu quando  $\frac{v}{c^2} \approx 0$  e  $\beta = \frac{v}{c} \ll 1$  ou quando  $\gamma \cong 1$ .

## 2.5 CONSEQUÊNCIAS DOS POSTULADOS

Ao aceitarmos os postulados da teoria da relatividade, nos deparamos com a mudanças de conceitos de tempo e espaço, saindo da ideia do senso comum e da mecânica de Newton, que nos dizia que as medidas de tempo e espaço são absolutas e esta concepção será abordada diferentemente na física relativística, onde passamos a “considerar o tempo, intuitivamente, como uma medida de sucessão dos acontecimentos e o relógio, como instrumento destinado a qualificar sua passagem” (GONDAR; CIPOLATTI, 2011, p. 160). Tal sucessão de acontecimentos ou eventos predominaram na TRR e para entender as consequências da teoria da relatividade é importante termos bem definidos o conceito de eventos.

Podemos definir evento, conforme Damasio e Ricci (2009), um acontecimento que ocorre em um ponto do espaço em um determinado instante de tempo; assim para definirmos um evento devemos considerar as suas coordenadas espaciais que nos dará a localização e o instante de tempo em que o evento ocorreu. O autor ainda nos diz que “Entre dois eventos quaisquer pode haver um intervalo de tempo. Entre o início e fim de uma aula, por exemplo, existe um intervalo de tempo, assim como entre o Big Bang e o nascimento do leitor, que são os dois eventos mais importantes da história do universo, certo?” (DAMASIO; RICCI, 2009, p. 25).

Portanto descaracterizar o tempo e o espaço como grandezas absolutas é extremamente necessário para a compressão dos eventos que são definidos a partir do local e instante de tempo em que este evento acontece. As deduções das consequências da TRR levam como base primordial as transformações de Lorentz vistas na seção anterior, além dos postulados fundamentadores da TRR.

### 2.5.1 Relatividade e Simultaneidade

“Absoluto, verdadeiro e matemático, o tempo, por si só, e de sua própria natureza, flui unicamente sem relação com qualquer coisa externa” (NEWTON apud SERWAY; JEWETT



JR, 2015, p. 288) esse tempo caracteriza a hipótese básica da Mecânica Clássica que estabelece a existência de uma escala universal, que é a mesma para todos os observadores, e implicitamente afirmar que a ideia de que a simultaneidade é absoluta, segundo Chesman, André e Macêdo (2004). No entanto, nas ideias expressas por Einstein, a simultaneidade tem característica relativística pois medidas de tempo passam a depender agora do referencial utilizado, portanto isso nos garante que eventos que são simultâneos para um observador não serão necessariamente simultâneos para observadores em referenciais inerciais distintos.

Afirmar a simultaneidade em relatividade implica dizer que existirão dois observadores em referenciais distintos, observando um mesmo evento. Na medida que o evento acontece os observadores verificarão que os tempos medidos por seus relógios idênticos ocorrem em instantes dados por  $t$  e  $t'$ , e diz-se que os relógios estarão sincronizados se  $t = t'$ . Em um outro evento posterior ao primeiro, contudo, os instantes de tempo não serão mais iguais, pois os relógios não estarão mais sincronizados, especialmente no caso em que os observadores se deslocam com velocidade constante relativa. Portanto, podemos afirmar que a simultaneidade é conceito relativo e não absoluto. Conforme apresentado por Tipler e Llewellyn (2001) definimos o conceito de relatividade e simultaneidade entendendo que os paradoxos relativísticos podem ser respondidos uma vez que entendamos que os postulados da TRR implicam na simultaneidade relativística, que nos diz que:

**Dois eventos que são simultâneos em um referencial não são simultâneos em nenhum outro referencial inercial que esteja em movimento em relação ao primeiro.**

Um corolário da afirmação acima:

**Dois relógios que estão sincronizados em um referencial não estão sincronizados em nenhum outro referencial inercial que esteja em movimento em relação ao primeiro (TIPLER; LLEWELLYN, 2001, p. 15).**

Ou seja, os eventos que acontecem para um observador não serão simultâneos para outros observadores em outros referenciais, bem como a sincronização plena dos relógios só é possível quando estes encontram-se no mesmo referencial.

Para melhor compreender o conceito de simultaneidade, podemos conferir o exemplo apresentado e resolvido por Chesman, André e Macêdo. O exemplo diz:

Um observador em repouso recebe dois sinais luminosos emitidos pelas fontes  $A$  e  $B$ , separadas por uma distância de  $2,5\text{km}$ . A fonte  $A$  emite uma luz verde e,  $5\mu\text{s}$  depois, a fonte  $B$  emite uma luz vermelha. O observador em repouso verá, primeiro a luz verde e posteriormente a luz vermelha. Admitamos outro observador que se descola paralelamente com velocidade de

$v = 0,85c$  em movimento relativo ao primeiro. Podemos questionar se o segundo observador verá os feixes de luz tal qual o primeiro observador? Para responder esta pergunta, basta utilizar a transformação do tempo que apresentamos nas transformações de Lorentz. Deste modo temos:

$$\begin{aligned} t' &= \gamma \left( t - \frac{V}{c^2} x \right) \rightarrow t' \\ &= 1,9 \left( 5 \cdot 10^{-6} - \frac{0,85c}{c^2} 2,5 \cdot 10^3 \right) s \\ &\cong -4 \cdot 10^{-6} s \\ t' &= -4 \mu s. \end{aligned}$$

Como o valor de  $t'$  é negativo, implica dizer que o observador que está em movimento verá primeiro a luz verde, mostrando assim que mesmo a ordem de eventos muda de acordo com os observadores.

Para que esses eventos fossem considerados simultâneos o observador em repouso deveria ver os dois feixes de luz no mesmo instante, o que implicaria dizer que ele se encontra no ponto médio entre a distância das duas fontes A e B ou seja o observador estaria a 1,25km dos pontos A e B.

Sabendo-se que os relógios são instrumentos de medir a passagem do tempo e que a velocidade da luz define um padrão de tempo, podemos ainda representar matematicamente a equação que descreve a sincronização de relógios para eventos simultâneos e não simultâneos. Tais equações são dada por:

$$\Delta t' = \gamma \left( \Delta t - \Delta L \frac{v}{c^2} \right), \text{ (sincronização de relógios em eventos não simultâneos)} \quad (2.4)$$

Para  $\Delta t = 0$ , temos que os eventos simultâneos em S.

$$\Delta t' = \gamma \Delta L \frac{v}{c^2}, \text{ (sincronização de relógios em eventos simultâneos)} \quad (2.5)$$

Onde  $\Delta t'$  é a variação do tempo verificado nos relógios no mesmo referencial seja em repouso ou em movimento, e  $\Delta L$  é a distância própria entre os dois relógios.

### 2.5.2 Dilatação Temporal

A dilatação temporal é uma das consequências mais famosas da TRR, que nos diz que corpos com altas velocidades, da mesma ordem que a da luz que viaja no vácuo, o intervalo de tempo transcorrerá mais lentamente se comparado com um observador em repouso em relação a ele. Em outras palavras "Dois eventos podem estar separados por intervalos de tempo diferentes dependendo de quem o mede" (DAMASIO; RICCI, 2009, p. 25). Assim conforme Halliday e Resnick (2009):

Quando dois eventos ocorrem no mesmo ponto de um referencial o intervalo de tempo entre os eventos, medido nesse referencial é chamado de intervalo de tempo próprio ou tempo próprio. Quando esse intervalo de tempo é medido em outro referencial o resultado é sempre maior que o intervalo de tempo próprio (HALLIDAY; RESNICK, 2009, p. 153).

Ao analisarmos dois eventos ocorridos no mesmo ponto do espaço  $x_n$  do referencial  $S$  nos instantes  $t_2$  e  $t_1$  e são observados no referencial  $S'$  nos instantes  $t'_2$  e  $t'_1$ . Assim o intervalo de tempo entre os dois eventos no referencial  $R'$  é dado por:

$$\begin{aligned}\Delta t' &= t'_2 - t'_1 = \gamma \left( t_2 - \frac{v}{c^2} x_n \right) - \gamma \left( t_1 - \frac{v}{c^2} x_n \right) \\ \Delta t' &= \gamma \Delta t_0 \quad (\text{equação da dilatação temporal}).\end{aligned}\tag{2.6}$$

Como  $\gamma \geq 1$ ,  $\Delta t' \geq \Delta t_0$ . Assim o tempo próprio é sempre menor ou igual ao tempo entre os eventos em qualquer referencial inercial.

### 2.5.3 Contração Espacial

Um corpo que viaja em alta velocidade, da mesma ordem da velocidade da luz no vácuo, terá seu comprimento reduzido. Assim "a distância de quaisquer dois pontos é medida por um observador como contraída ao longo da direção da velocidade do observador com relação ao ponto" (SERWAY; JEWETT JR, 2015, p. 239).

Seja uma régua de comprimento  $L_0$ , em repouso no referencial  $S$ , é medida no referencial  $S'$ . O observador em  $S'$  com velocidade constante  $v$ , mede as extremidades da régua simultaneamente. A régua tem comprimento próprio  $L_0 = x_2 - x_1$ . Assim temos:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \gamma(x'_2 - vt'_2) - \gamma(x'_1 - vt'_1),$$

$$\Delta x = \gamma(x'_2 - x'_1) - \gamma v(t'_2 - t'_1).$$

Para  $t'_2 = t'_1$

$$\Delta x = \gamma x' \quad \text{ou} \quad L_0 = \gamma L \quad (\text{contração do comprimento}). \quad (2.7)$$

Como  $\gamma \geq 1$  conclui-se que  $L_0 > L$ , o comprimento próprio é maior do que o comprimento medido em outro referencial.

## 2.6 PARADOXOS DA RELATIVIDADE

Nesta seção apresentaremos ideia de experimentos mentais, conceituaremos paradoxos da física e através de experimentos mentais apresentaremos alguns paradoxos relativístico.

### 2.6.1 Experimentos Mentais

No estudo científico é muito comum a utilização de experimentos; tais processos podem ser usados com a finalidade de solucionar determinados problemas ou verificar a validade de determinada teoria, e "todo e qualquer experimento é, a priori, um experimento pensado, pois ele é, no mínimo, antecipadamente planejado" (KIOURANIS, SOUZA e FILHO, 2010, p.02), e posteriormente colocado em prática nos laboratórios experimentais. Tal ideia pode ser sintetizada na expressão vista em diversas literaturas que é enunciada com o termo *gedankenexperiment*<sup>10</sup>.

No entanto, existe uma certa modalidade de experimentos, ditos mentais, com este termo sendo muito utilizado na Física Moderna, tanto na relatividade como na mecânica quântica, objetivando explicar fenômenos físicos através do pensamento. Tais mentalizações surgiram muito antes da Física Moderna, ainda na Grécia antiga, onde filósofos abriam mão dos experimentos físicos para debatê-los no mundo das ideias, conforme Kiouranis, Souza e Filho (2010) em seu artigo Experimentos Mentais e Suas Potencialidades Didáticas:

Tais "experimentos pensados" ou ainda "mentais" permitiram a Aristóteles fundar um edifício filosófico de explicação da natureza cujos alicerces e envergadura se mostrou tão robusto que persistiu até os trabalhos de Galileu e de

<sup>10</sup> Termo alemão que traduzido livremente para o português significa "experiência de pensamento", tal expressão foi proposta em 1897 pelo o físico Ernst Mach que utilizava o vocábulo para exprimir uma conduta imaginária de investigação científica análoga aos procedimentos que deveriam ser utilizados pelos seus educandos durante a realização de experimentos físicos no ambiente de laboratório.

alguns de seus contemporâneos e antecessores. Galileu, incomparável defensor das práticas experimentais, iniciou o desenvolvimento de alguns experimentos conduzidos no intelecto, ou seja, no laboratório da mente, logrando êxito em algumas destas situações. Mais recentemente encontramos também, na história da ciência, esta modalidade de busca da explicação da Natureza como, por exemplo, aqueles descritos no início do desenvolvimento da mecânica quântica e da teoria da relatividade (KIOURANIS; SOUZA; FILHO, 2010, p. 10).

Esta classe de experiências visa chegar a um resultado assim como os experimentos planejados e executados; no entanto, eles apresentam reflexões mais profundas a respeito da temática idealizada, e "assim, as experiências mentais levam-nos muito longe do mundo real" (KIOURANIS, SOUZA e FILHO, 2010, p.01), porém só serão consideradas legítimas até o instante que não violem as leis da natureza.

Portanto adotaremos aqui o conceito apresentado por Brown, no livro *THE LABORATORY OF THE MIND: Thought Experiments in the Natural Sciences*, referente aos experimentos mentais:

Experimentos mentais são realizados no laboratório da mente. Além dessa metáfora, é difícil dizer exatamente o que são. Nós os reconhecemos quando os vemos: eles são visualizáveis; eles envolvem manipulações mentais; eles não são a mera consequência de um cálculo baseado em teoria; eles são frequentemente (mas nem sempre) impossíveis de implementar como experimentos reais, seja porque nos falta a tecnologia relevante ou porque eles são simplesmente impossíveis em princípio. Se tivermos sorte o suficiente para chegar a uma definição precisa do experimento mental, é provável que seja no final de uma longa investigação (BROWN, 1991, p. 01).

Deste modo, temos que os experimentos realizados no intelecto apresentam suas finalidades. Mesmo com seu conceito ainda em construção de significados, esta modalidade se apresenta por si só com grande importância no meio científico.

## 2.6.2 Paradoxos na Física

Segundo Gondar e Cipollate (2011), "Em geral, toda vez que surge uma nova teoria, idealizam-se 'paradoxos' em torno dela, com o intuito de submetê-la à prova e, se possível, descartá-la. A Teoria da Relatividade não fugiu a essa regra". No estudo da relatividade encontramos diversos paradoxos, e mais adiante abordaremos alguns deles. Apresentaremos algumas definições do que são paradoxos.

O paradoxo é uma ideia incrivelmente fundamentada, coerente e coesa na qual apresenta uma espécie de contradição lógica, que diverge a um caminho contrário do que se pensa, possuindo assim presunções contraditórias à sua própria estrutura. Este conceito rudimentar é

mais apropriado quando tratamos dos paradoxos presentes na literatura e na linguística (estudo da linguagem humana) já as literaturas da física não apresentam uma definição mais elaborada sobre o mesmo, e o tratamento usados na área de linguagem e códigos também é coerente ao tratamento dos paradoxos da física.

Utilizaremos aqui com mais respaldo científico a abordagem de Gondar e Cipolatte (2011) no livro de Iniciação à Física Matemática, Modelagem de Processos e Métodos de Soluções. Nele os autores esboçam uma definição de paradoxo que contribui satisfatoriamente a esta pesquisa científica.

Entende-se por paradoxo uma situação elaborada que leva a uma conclusão lógica em relação a uma dada teoria, ou ainda, que ainda transgrida o senso comum, contrariando o que, convencionalmente, é admitido como verdade. Um paradoxo pode ser utilizado na modelagem matemática como um "teste de confiabilidade" e, neste caso, se a teoria consegue provar que a contradição é só aparente (portanto, fictício), ou que o paradoxo está mal formulado, então, sai desta tese e, portanto, pelo menos neste aspecto permanece inquestionável. Caso contrário, tal teoria estará errada ou, no melhor das hipóteses dos casos incompleta (GONDAR; CIPOLATTI, 2011, p. 184).

Deste modo, com base no conceito apresentado pelo autor veremos se os paradoxos, que apresentaremos em seguida, apresentam características que permitam-nos questionar se estes apresentam conclusões lógicas com relação à Teoria da Relatividade. Os paradoxos que estudaremos adiante tratam de experiências mentais, que foram propostos com a finalidade de questionar a Teoria da Relatividade Restrita.

### **2.6.3 Paradoxo do Espelho de Einstein**

Em 1896, Einstein com apenas 16 anos de idade realizou a sua primeira "experiência mental", visualizando uma viagem lado a lado com um feixe de luz e questionando o que aconteceria se isso fosse possível, Moon (2011). O que aconteceria ao viajarmos com uma velocidade tão alta quanto um raio de luz? Desta ideia partiremos ao paradoxo do espelho.

Imagine a seguinte situação: Uma pessoa viajando com a mesma velocidade da luz no vácuo e segurando um espelho à sua frente poderia ver a sua imagem refletida no espelho? Tal pergunta tão inocente gerou um paradoxo, pois classicamente a pessoa que está viajando com a mesma velocidade que a da luz estará em repouso em relação a ela, e, portanto, não verá sua imagem refletida no espelho, pois a luz emergente da pessoa nunca atingirá o espelho. Porém para Einstein essa situação era respondida pelo segundo postulado da TRR que afirma que a velocidade da luz independe do movimento da fonte, portanto a luz emergente da pessoa chegará

ao espelho formará a imagem e será refletida independentemente da pessoa está se locomovendo com a mesma velocidade da luz.

O paradoxo é criado no questionamento se a pessoa veria ou não sua imagem, o que na verdade hoje sabemos que a velocidade da luz não depende da velocidade da pessoa ou do espelho pois para qualquer observador sua velocidade sempre será constante ainda é importante ressaltar que nenhum corpo matéria é capaz de atingir a velocidade da luz, o que reflete e reforça a importância dos experimentos mentais, decorrente disto a experiência do "Espelho de Einstein" é impossível.

#### 2.6.4 Paradoxo dos Gêmeos

O paradoxo dos gêmeos ou paradoxo dos relógios, refere-se a um desacordo temporal entre dois observadores, sendo que, um fica na Terra e outro viaja para o espaço. Para tal experimento mental, consideramos que os irmãos são gêmeos univitelinos<sup>11</sup>, Adriel e Bruno. Logo, podemos considerar que ambos possuem relógios biológicos semelhantes. Suponhamos que um dos irmãos gêmeos, Bruno, seja astronauta e terá que fazer uma viagem até a estrela Alpha Centauri  $\alpha\text{Cen}$ <sup>12</sup> a uma distância de aproximadamente 4 anos luz da Terra<sup>13</sup>. Além disso imaginamos que a nave, utilizando dos avanços tecnológicos, viaja com velocidade de 80% da velocidade da luz; assim, a partir desta experiência mental, podemos determinar a estimativa do tempo de viagem que Bruno fez para sair da Terra até a estrela Alpha Centauri. A figura 3 representa este acontecimento:

O planeta Terra, o irmão Adriel e a estrela Alpha Centauri, estão no referencial  $S$  enquanto a nave e Bruno viajam com velocidade  $v$  no referencial  $S'$  e  $S''$  na ida e na volta, respectivamente. Bruno sai da Terra, atinge a velocidade  $v$  no referencial  $S'$  e dirige-se à estrela  $\alpha\text{Cen}$ , onde desacelera momentaneamente e muda de direção, retornando ao seu planeta com velocidade  $v$  no referencial  $S''$ .

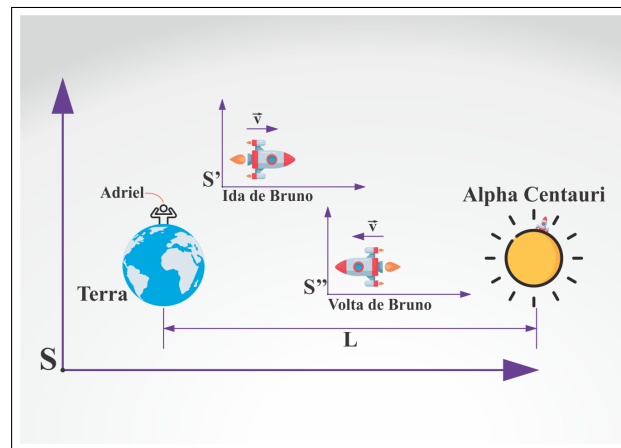
Matematicamente, podemos comparar a idade dos irmãos no instante em que Bruno chega na Terra e ambos os gêmeos estão em repouso no referencial  $S$ . Seja  $L = 4$  anos-luz a distância da Terra até a estrela e sabendo-se que a nave viaja a 80% da velocidade da luz, ou seja

<sup>11</sup> Os gêmeos monozigóticos são também chamados de idênticos ou univitelinos. Eles se originam de um único zigoto, ou seja, um único óvulo fecundado por um único espermatozoide. A célula por um processo ainda não muito esclarecido, se divide em duas partes iguais, as quais, cada uma originará um bebe.

<sup>12</sup> Alpha Centauri  $\alpha\text{Cen}$ , conhecida, também, pelos nomes próprios de Toliman e Rigil Kentaurus (o pé do Centauro). Encontra-se na grande constelação astral de Centauro, que envolve quase totalmente o Cruzeiro do Sul, encontra-se a terceira estrela mais brilhante do céu noturno a  $\alpha\text{Cen}$ .

<sup>13</sup> Vale lembrar ao leitor que 1 ano-luz vale  $9,48 \cdot 10^{15}$  m e que 1 Unidade Astronômica (1UA ou 1A) equivale a 149.597.870 km ou, aproximadamente, a  $150 \cdot 10^6$  km, que é a distância média da Terra ao Sol.

**Figura 3 – Esquema representativo da viagem de ida e volta de Bruno**



Fonte – Elaborado pela autora

$v = 0,8c$ , do ponto de vista de Adriel que ficou na Terra, a viagem de seu irmão de ida e volta, durou:

$$\Delta t = 2 \frac{L}{v} = 2 \cdot \left( \frac{4c}{0,8c} \right) \text{ anos} = 10 \text{ anos.}$$

Assim, Adriel ficou 10 anos mais velho. Já Bruno que viajou para o espaço com velocidade  $v$ , terá uma percepção diferente do tempo e em consequência da dilatação temporal sua viagem durou

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\gamma},$$

onde neste caso o  $\Delta t$  corresponde ao intervalo de tempo de sua viagem vista da Terra, adotaremos o tempo total de ida e volta calculado por Adriel, ou seja  $\Delta t = 10$  anos, e  $\gamma$  corresponde ao fator de Lorentz que vimos na seção 2.4, assim tem-se

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

com

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{0,8c}{c} = 0,8.$$

Assim,

$$\gamma = \frac{1}{1 - 0,8^2} = \frac{1}{0,6} = 1,6666666667 \cong 1,66.$$

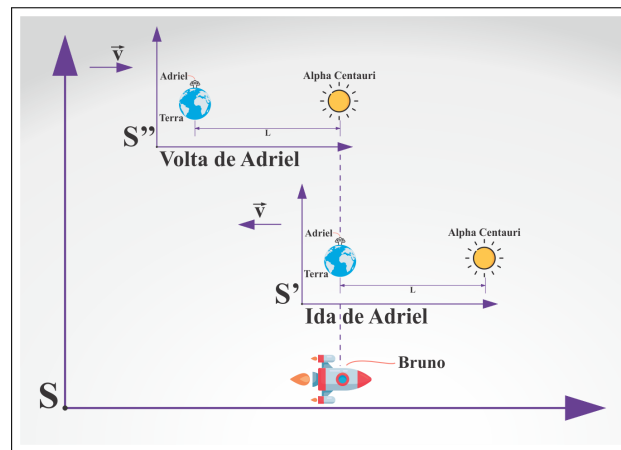
Logo que  $\Delta t'$  é dado por

$$\Delta t' = \frac{10}{1,66} \cong 6 \text{ anos.}$$



Ou seja, Bruno envelheceu apenas 6 anos após sair e retornar a Terra. Ao compararmos as idades dos irmãos gêmeos no instante em que Bruno retorna a Terra, veremos que ele está 4 anos mais jovem do que o irmão que ficou na Terra. O problema consiste na mudança de observador, supondo agora Adriel que se move em relação a Bruno teremos uma nova análise das idades dos irmãos no instante em que eles se encontram. Para facilitar a compreensão podemos observar a figura 4 em seguida.

**Figura 4 – Analisando a situação em que para Bruno é seu irmão Adriel que está se deslocando enquanto este permanece em repouso**



Fonte – Elaborado pela autora

Fazendo os cálculos para Adriel a partir da visão de Bruno. Temos que a Terra e a estrela movem-se com velocidade  $v = -0,8c$  com relação a Bruno, para ele a viagem de ida e volta durou 6 anos, ou seja  $\Delta t' = 6$  anos. Assim o intervalo  $\Delta t''$  deverá ser reduzido para

$$\Delta t'' = \frac{\Delta t'}{\gamma} = \frac{6}{1,66} \cong 3,6 \text{ anos.}$$

Esse valor corresponde a quantidade de anos que Adriel envelheceu durante a viagem, quando calculado por Bruno. Comparando as idades temos Bruno envelheceu 6 anos e Adriel 3,6 anos, isso nos dá uma diferença de 2,4 anos de idade. E assim constata-se o paradoxo dos Gêmeos, pois como se explica essa mudança da idade de Adriel quando calculada por Bruno? Ele envelheceu 10 ou 3,6 anos? Afinal quem está mais velho? Adriel está 4 anos mais velho ou 2,4 anos mais jovem que Bruno?

O paradoxo dos gêmeos nos mostra de forma simples como se dá o conceito de dilatação do tempo, que até então para a mecânica clássica era definido como absoluto; com o tratamento relativístico este tempo tende a sofrer efeitos que não eram previstos antes.

Em razão do caráter absoluto da classe dos referenciais inerciais, toda simetria entre as viagens dos gêmeos é quebrada (um e somente um gêmeo pode completar a viagem inteiramente dentro da classe dos referenciais inerciais - de fato aquele que permanece em casa, no referencial fixo da Terra) (RUSSELL, 2005 p.10).

E este paradoxo é bastante relevante na TRR, no entanto encontramos sua solução na teoria da relatividade geral, pois na medida que Bruno está saindo da Terra ele tem que acelerar para sair da Terra e frear quando está próximo a estrela, ainda sabemos que o mesmo ocorre no percurso de volta a nave é acelerada após Bruno mudá-la de direção e quando próxima às imediações da terra ele deverá desacelerar para pousar sua nave em segurança. "Portanto, por causa da quebra da simetria, não há nenhuma reciprocidade, e daí não decorre nenhum paradoxo. Isso é simplesmente um reflexo do caráter absoluto da classe dos referenciais inerciais postulado pela relatividade especial" (RUSSELL, 2005, p. 10). A TRR não soluciona este paradoxo pois trata apenas de referenciais inerciais, já a relatividade geral trabalha com referenciais não inerciais, ou seja, referenciais acelerados.

### 2.6.5 Paradoxo da Garagem

O Paradoxo da garagem<sup>14</sup> está relacionado com a contração do comprimento, e para entender esse paradoxo devemos imaginar que vivemos em um mundo de altas velocidades no qual existam carros relativísticos que viajam com velocidades próximas a velocidade da luz. Partindo deste pressuposto, imagine ainda que você esteja pilotando um carro a uma velocidade de  $0,866c$ ; você em seu carro, que mede 10 metros, está indo em alta velocidade para um estacionamento, calculando o fator de Lorentz para seu referencial encontramos que o valor é aproximadamente igual a 2. No estacionamento estará presente um vigilante responsável por abrir e fechar a porta da garagem, e à medida que você se aproxima do vigilante ele nota que seu carro mede 5 metros e abre a porta da garagem de exatamente 5 metros para que você estacione seu carro. Porém, dificultando ainda mais a situação, você do interior de seu carro verifica que a garagem na verdade mede apenas 2,5 metros e se pergunta, como pode seu carro de 10 metros de comprimento caber em uma garagem que mede apenas 2,5 metros?

Uma análise para este paradoxo envolverá os conceitos de medida de comprimento, visto que a garagem do ponto de vista do piloto dentro do carro foi quem sofreu uma contração do comprimento, assim como do ponto de vista do vigilante foi o carro que se comprimiu facilitando

<sup>14</sup> O paradoxo da garagem que apresentamos aqui corresponde a uma citação indireta do texto de Chesman, André e Macêdo (2004, p.83) que adaptaram ao ensino médio do artigo de E.E.F Taylor e J.A. Wheeler, Spacetime Physis, dos quais não tive acesso ao artigo original.

assim o ato de estacionar. No entanto para solucioná-lo devemos levar em consideração o conceito de simultaneidade que nos diz que "dois eventos simultâneos ocorrendo em pontos distintos em um referencial não serão simultâneos em outro referencial" (CHAVES, 2001, p. 44), pois para a medida do carro parado o tempo não é um fator importante, já para a medida do carro em altas velocidades o tempo passa a ser um fator importante e as medidas de comprimento do carro e da garagem devem ser feitas de forma simultâneas, ou seja no mesmo instante deve-se medir as duas extremidades, parte traseira e dianteira, do veículo e da garagem. Portanto o aparente paradoxo é solucionado utilizando-se da ideia de relatividade e simultaneidade.

### 2.6.6 Paradoxo do Submarino

O paradoxo do submarino, conforme Vieira (2017), foi descrito em 1989 por J. M. Suppler. Trata-se de um paradoxo relativístico, que busca responder a seguinte indagação: O que deve acontecer quando um submarino é colocado para se mover com uma alta velocidade na água? Antes de tentar responder a essa questão, vale ressaltar, segundo Matsas (2003), que o paradoxo do submarino sugere um novo "*gedankenexperiment*", experimento mental, que já discutimos anteriormente e que, segundo Vieira (2017), em sua versão original, foi utilizada uma bala ao invés de um submarino.

Assim, para facilitar a resolução do questionamento acima, imaginemos a seguinte situação: Seja um submarino que se desloca com altas velocidades, próximas a velocidade da luz, visto por dois observadores, sendo o primeiro um mergulhador em repouso no fundo do oceano e o segundo o submarinista (piloto do submarino). Suponha que, em repouso, o submarino nem afunda e nem flutua, tendo, portanto, a mesma densidade da água circundante. Vamos analisar o que acontece com o submarino em movimento, do ponto de vista dos dois observadores.

Para o observador 1, o mergulhador em repouso no fundo do mar, o submarino afundaria, pois devido à contração de Lorentz, um objeto que se move com velocidades elevadas tem seu comprimento achatado na direção do seu movimento; por conseguinte, a massa aumentaria e logo a sua densidade também, de modo que o submarino afundaria, pois teria densidade superior à da água. Conforme Vieira (2017), para essa análise desconsidera-se "quaisquer efeitos hidrodinâmicos como arrasto, viscosidade, turbulência, etc" (VIEIRA, 2017, p. 1). Já para o observador 2, dentro do submarino, quem está se deslocando é a água, logo para ele a sua densidade permaneceria a mesma enquanto a da água aumentaria e assim ele passaria a flutuar.

O aparente conflito surge ao se analisar o que aconteceria com este submarino do

ponto de vista dos dois observadores, uma vez que para o mergulhador o submarino afundaria enquanto que para o submarinista ele flutuaria. Logo temos um paradoxo, que segundo Vieira (2017), é gerado a partir do mal uso do princípio de Arquimedes para o caso relativístico. E “para solucionar esse quebra-cabeça” (MATSAS, 2003, p. 01), deve-se sair da esfera da relatividade restrita e adentrar na relatividade geral, já que o campo gravitacional está envolvido a partir do empuxo a que o submarino está submetido, além de seu peso. Logo, estamos diante de um paradoxo aparente, sendo que Vieira (2017) diz que:

Considerando um espaço-tempo plano de Rindler como fundo e assumindo razoáveis condições sobre a rigidez submarina, Matsas analisou o movimento de um submarino que acelera do repouso a uma dada velocidade  $v$ . Ele concluiu que a forma do submarino fica deformada à medida que acelera, com seu comprimento se contraindo mais e mais, de modo que em conformidade sua densidade aumenta, o que leva o submarino a afundar (VIEIRA, 2017, p. 01).

Assim, temos que para a solução desse paradoxo temos que levar em conta a lei da gravitação presente na teoria da relatividade geral, e nosso intuito não é solucionar o paradoxo, mas sim apresentá-lo, pois tal solução requer rigor matemático que não está em conformidade com os objetivos deste trabalho.

### 3 METODOLOGIA E RESULTADOS

Neste capítulo apresentaremos a metodologia adotada no trabalho e faremos uma análise dos dados obtidos através da aplicação do questionário junto aos alunos do curso de Licenciatura Plena em Física da UECE – FECLI, objetivando sondar o seu perfil e o eventual contato desses alunos com o ensino de FMC desde o Ensino Médio.

#### 3.1 METODOLOGIA

Respaldados por Gressler (2004), utilizamos neste trabalho o modelo de pesquisa quantitativo que segundo a autora “estabelece hipóteses que exigem, geralmente, relação entre causa e efeito e apoia suas conclusões em dados estatísticos, comprovações e testes. [...] Valoriza a experiência sensível, a verificação, o controle, e quantitativo e a neutralidade científica” (GRESSLER, 2004, p. 43).

Decorrente da pesquisa quantitativa utilizaremos a estatística<sup>1</sup> descritiva que, segundo Moreira (2003), tem por finalidade descrever o conjunto de dados através de meios infográficos, como por exemplo tabelas, representações numéricas ou gráficas na busca de sintetizar os dados da pesquisa tornando-os cada vez mais manipuláveis.

Para coleta dos dados utilizamos questionário semiestruturado correspondente a unificação de questionamentos abertos e fechados, e conforme Gil, 1999 apud Andrade (2010, p. 36) “o emprego desse instrumental, nessa etapa da pesquisa, justificou-se pela possibilidade de permitir o acesso a um número maior de sujeitos”, tendo em vista que o público alvo são os alunos do curso de Física que, conforme verificado na coordenação do curso, existem 50 alunos regularmente matriculados<sup>2</sup>.

Inicialmente foi pensado na possibilidade de uma pesquisa quantitativa, abordando apenas duas questões de natureza exploratória (questões 1 e 2 do questionário, em apêndice), nas quais os pesquisados expressariam seus conhecimentos sobre o tema da pesquisa, neste caso o estudo da relatividade. No entanto, como a pesquisa no seu aspecto geral busca fazer uma sondagem do ensino de física moderna no EM, bem como as ideias de experimentos mentais em física, surgiu a necessidade de inserir e investigar se os pesquisados tiveram contato com o

<sup>1</sup> Estatística é a teoria e método de analisar dados obtidos de amostras de observações com o fim de descrever populações, estudar e comparar fontes de variância, para ajudar a tomar decisões sobre aceitar ou rejeitar relações entre fenômenos e para ajudar a fazer inferências fidedignas de observações empíricas. (KERLINGER, 1980 apud MOREIRA, 2003, p. 13)

<sup>2</sup> Conforme dados retirados do portal do curso de Física da FECLI disponível em: <<http://www.uece.br/fisicaiguatu/index.php/alunos-do-curso>>. Acesso em 4 abr. 2018.

ensino de FMC durante o ensino médio.

Partimos do objetivo geral, conforme apresentado na introdução deste trabalho, que compete analisar o ensino de relatividade no EM alicerçado pela visão dos alunos do curso de Licenciatura Plena em Física da UECE – FECLI, que são o público alvo desta pesquisa. É importante destacar que mesmo fazendo parte do grupo pesquisado em questão, permaneço na situação de observador não participante, visto que o pesquisador deve ser imparcial resguardando assim, a “neutralidade científica” conforme apresentado por Gressler (2004. p. 43).

O questionário (em apêndice) foi dividido em três partes, a primeira visando a identificação do perfil dos pesquisados, contendo cinco questões, abertas e fechadas, de escolha simples, sendo estas: nome (caráter opcional), sexo, idade, curs<sup>3</sup> e se o mesmo é aluno. A segunda explora através de duas questões de múltipla escolha os conhecimentos de Física dos estudantes através de experimentos mentais, e a terceira envolvendo questões que buscam sondar o ensino de FMC, especificamente relatividade, composta por uma questão de múltipla escolha e uma aberta.

É importante destacar que as perguntas de múltipla escolha possuem espaço reservado para justificativa e/ou exemplificação de determinado item que venha ser escolhido, proporcionando assim ao aluno pesquisado a possibilidade de colocar sua própria impressão dentro da pesquisa. Em suma, as perguntas levantadas pelo questionário se entrelaçam, fazendo que a pesquisa não se restrinja a uma pesquisa fechada na qual a subjetividade do respondente não possa ser levada em consideração.

Para a aplicação deste questionário utilizamos a plataforma *google forms*<sup>4</sup>, recurso gratuito da google que proporciona aos usuários aplicar pesquisas online e de forma gratuita. A pesquisa em questão tem por objetivo avaliar os conhecimentos prévios e atuais dos licenciandos em Física da UECE-FECLI acerca de relatividade especial e, tentar identificar a falta de contato desses alunos com a relatividade desde o ensino médio.

Sabendo-se que comumente não existe a cobrança do ensino de FMC nas avaliações externas, tais como vestibular e ENEM e além de um conjunto de outros fatores como por exemplo carga horária destinada ao ensino de Física reduzida, buscamos através desta pesquisa

<sup>3</sup> Questionar se o pesquisado era aluno ou não do curso possibilita ter total certeza que os respondentes fazem parte do grupo que esta sendo pesquisado, uma vez que o modelo de pesquisa é um questionário online e poderíamos ter respostas de indivíduos que não fazem parte do grupo de alunos do curso de Física da UECE-FECLI

<sup>4</sup> A plataforma do google tem vinculado a se diversos recursos para seus usuários, assim como google fotos, google drive, google maps o google forms, também é um recurso gratuito ao usuário e está diretamente vinculado ao endereço eletrônico (e-mail) do usuário e para acessá-lo basta pesquisar pelo nome google forms ou pelo link de direcionamento da página e dá início a criação de seu formulário online. Plataforma disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-br/forms/about/>>. Acesso em 27 de maio de 2018.

apresentar-lhes os dados coletados e fazer a devida discussão no próximo subtópico.

## 3.2 RESULTADOS

Buscamos aqui analisar os dados coletados no questionário casando-os com os nossos objetivos, apresentando de forma clara e sucinta as respostas dos alunos, por meio de abordagem estatística. Esta seção será subdividida em três subtópicos e são eles: 3.2.1 Características dos sujeitos; 3.2.2 Análise dos paradoxos e experimentos mentais e 3.2.3. Análise do ensino de relatividade. Nestes tópicos analisaremos e sintetizaremos os dados encontrados na pesquisa acadêmica. É importante destacar que participaram desta pesquisa 31 alunos e para distinção das falas optamos por utilizar os termos “Aluno 1”, “Aluno 2”, “Aluno 3”, ... , “Aluno 31”, prevalecendo o anonimato dos mesmos.

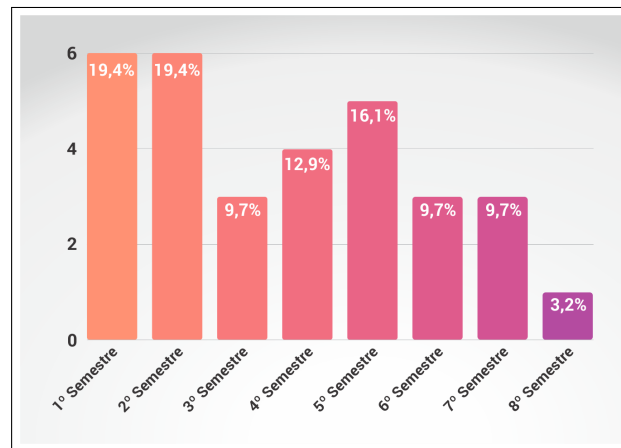
### 3.2.1 Características dos Sujeitos

Os sujeitos pesquisados correspondem aos alunos do curso de Licenciatura Plena em Física da UECE – FECLI, conforme apresentado na metodologia deste trabalho, sabendo-se que o curso contém 50 acadêmicos regularmente matriculados, excluídos os alunos desistentes e evadidos. Dentro desta pesquisa obtivemos a adesão de 31 discentes, o que equivale a 63,26% dos alunos regularmente matriculados no curso de graduação da FECLI, uma vez que para fazer essa porcentagem, excluímos a autora da pesquisa do quadro total de alunos.

Inicialmente os pesquisados responderam um bloco de questões de caráter identitário: nome, sexo, idade, curso e semestre; tais perguntas tiveram por finalidade traçar o perfil dos participantes. Assim, através da investigação, obtivemos que 68,7% dos entrevistados são do sexo masculino e apenas 32,2% são do sexo feminino. Os participantes possuíam idade entre 18 e 31 anos, com uma média de idade de 22 anos, sendo que a maioria dos alunos têm 21 anos, o que corresponde a 29%.

Os alunos entrevistados estão distribuídos em todos os semestres do curso; vale ressaltar que o curso de licenciatura plena em física da UECE – FECLI contém oito semestres letivos. Assim podemos ver na figura 5 a distribuição dos pesquisados por semestre letivo.

Podemos inferir da figura 5 por meio de cálculo simples de média aritmética, que 15,35% dos alunos participantes da pesquisa corresponde ao valor médio de acadêmicos entre o primeiro e quarto semestre, sendo que 38,8% dos entrevistados estão cursando o primeiro e o segundo semestre.

**Figura 5 – Divisão dos entrevistados por semestre**

Fonte – Elaborado pela autora.

Portanto, em um aspecto geral, temos que a maior parte dos acadêmicos está concentrada no primeiro e segundo semestre do curso, além de os entrevistados em sua maioria corresponderem ao sexo masculino. Ainda dentro deste aspetos vale ressaltar que os alunos que estão cursando entre o primeiro e o sexto semestre não tiveram aulas de relatividade na Universidade o que não influenciará na coleta de dados referentes a análise dos experimentos mentais.

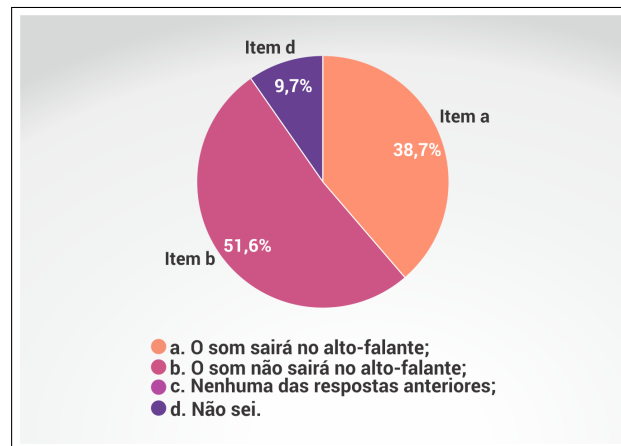
### 3.2.2 Análise dos Experimentos Mentais

Para resolver os experimentos mentais o indivíduo tem que utilizar seu laboratório mental, no qual deve realizar a situação idealizada; assim criamos duas situações nas quais cada pesquisado deveria utilizar dos seus conhecimentos prévios de Física para respondê-las.

Conforme apresentado no questionário a situação I, na qual pergunta-se: *O que você acha que acontece na seguinte situação: Uma pessoa segura, na sua frente e a certa distância, um microfone e começa a falar enquanto se desloca a uma velocidade igual à do som.* A partir do que foi coletado, a figura 6 nos dá a porcentagem para cada item escolhido.

Assim, obtivemos que 51,6% dos pesquisados acreditam que o som não sairá no alto-falante, enquanto 38,7% responderam que o som sairá do alto-falante, os que responderam não saber se o som sairá ou não do alto-falante corresponde a apenas 9,7% dos entrevistados e nenhum participante da pesquisa respondeu o item c, que corresponde a nenhuma das respostas anteriores. Ainda dentro desta questão o participante que assinalasse o item c deveria apresentar justificativa à sua escolha, explicando fisicamente qual seria a resposta ao item assinalado de acordo com sua visão.



**Figura 6 – RESULTADOS DA SITUAÇÃO I**

Fonte – Elaborado pela autora.

No entanto, ao analisar o questionário encontramos uma “anomalia”, pois tivemos no espaço destinado a justificativa do item c uma resposta, o que não deveria ter acontecido, visto que nenhum dos pesquisados marcou o item em questão, o Aluno 6 respondeu que: “Se ele estiver em velocidade do som “constante” ou “parado” o resultado será o mesmo, já que as leis da física são as mesmas não importa o seu estado de movimento (MRU ou repouso)”. Ao analisar a resposta individualmente, nota-se que o Aluno 6 utiliza do espaço destinado a justificar o item c para comentar sua escolha, no caso o item a.

Assim, para solucionar essa situação, temos que retomar aos nossos conhecimentos de ondas, sabendo-se que o som é uma onda mecânica, esta necessita de um meio para se propagar, e sua velocidade varia de acordo com o meio pela qual se propaga, usaremos aqui que o meio é o ar. Assim, conforme (OLIVEIRA, 2005), a velocidade de propagação da onda sonora no ar e a 0°C é de 343 m/s, ou cerca de 1235 km/h. Hewitt (2015) diz:

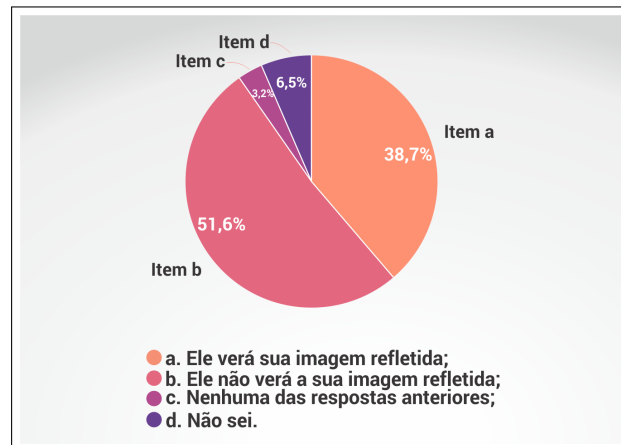
Quanto a rapidez com que uma fonte se move é maior do que a rapidez de propagação das ondas que ela produz, acontece algo interessante. As ondas se amontoam na frente da fonte. Considere o inseto de nosso exemplo anterior [um inseto nadando sobre a superfície de um rio], quando ele está nadando tão rápido quanto a onda produzida. [...] Em vez das ondas geradas se moverem adiante do inseto, afastando-se dele, elas passam a se superpor e a se amontoarem umas nas outras na parte que está diretamente na frente dele [...]. o inseto move-se exatamente junto com as partes frontais das cristas de ondas circulares que ele produz (HEWITT, 2015, p. 367).

Um fato semelhante acontece com um avião que voa à velocidade do som. Assim da situação I, uma pessoa que segura a sua frente e a certa distância um microfone e começa a falar enquanto se desloca a uma velocidade igual à do som não ouviria a sua voz, pois ela estaria com a velocidade igual a velocidade das ondas produzidas por ela.

Ainda temos do questionário a situação II, na qual pergunta-se: *O que você acha que*

*acontece na seguinte situação: Uma pessoa segura, na sua frente e a certa distância, um espelho, enquanto viaja a uma velocidade aproximadamente igual à da luz. Para tal questionamento observa-se que os alunos pesquisados em sua maioria assinalaram o item b, correspondendo a 51,6%, que diz que “ele não verá sua imagem refletida”, conforme podemos na figura 7 abaixo.*

**Figura 7 – Resultados da situação II**



Fonte – Elaborado pela autora.

Ainda na situação II podemos inferir que 38,7% dos pesquisados acreditam que poderá ver a imagem refletida no espelho, 6,5% não sabem a resposta e 3,2% assinalaram a opção nenhuma das respostas anteriores.

Logo temos que 3,2% dos entrevistados não acreditam que nenhuma das respostas anteriores soluciona o problema envolvendo a situação II, porém, assim como na situação anterior, o aluno 6 novamente utilizou o espaço destinado a justificar a escolha do item c para comentar sua escolha, que neste caso foi o item a, que diz que ele verá a imagem refletida, ele justificou usando a seguinte afirmação: “ele verá sim a imagem refletida eu acho... pois a velocidade da luz é a mesma não importa quem esteja medindo. As coisas acontecem de acordo com o nosso ponto de vista subjetivo”.

Já o aluno que assinalou o item c, apresentou a seguinte justificativa: “Depende, pois deve-se considerar o efeito Doppler relativístico, logo o sentido do movimento influenciará a resposta” (Aluno 19).

Da segunda situação temos que, o aluno 6 justifica sua resposta coerentemente uma vez que ele traz em seu comentário um dos princípios da relatividade para responder essa questão, quando ele diz “que a velocidade da luz é a mesma não importa quem esteja medindo” (Aluno 6) ele está usando o princípio da constância da luz e é importante ressaltar que tal pesquisado faz parte do grupo de alunos que não tiveram acesso ao ensino de relatividade durante o ensino

médio, estando também inserido no grupo de alunos que cursam o 3º semestre, contudo não foi possível identificar onde o aluno aprendeu relatividade pois o mesmo não especificou na terceira questão do questionário. E ainda por se tratar de um pesquisado dos semestres iniciais o mesmo não teve aulas na universidade de relatividade pois a disciplina de Teoria da Relatividade Restrita é vista no 7º semestre letivo de acordo com a fluxograma de 2012.1<sup>5</sup>.

Já o aluno 19 em sua justificativa ao item c, nos diz que para o observador a formação da imagem no espelho dependeria do efeito Doppler relativístico que é um tema da cinemática relativística que não descrevemos nos capítulos anteriores.

Assim o efeito Doppler relativístico como apresentado por Bauer, Westfall, e Dias tem a ver com o deslocamento de frequência relativística, que segundo os autores,

“se  $v$  é a velocidade relativa entre a fonte e o observador, e se o movimento relativo se dá em uma direção que é radial (diretamente em direção, ou diretamente para fora, de qualquer um deles), então a fórmula para a frequência do observador,  $f$ , da luz que foi emitida com frequência  $f_0$  é  $f = f_0 \sqrt{\frac{c \pm v}{c \mp v}}$ , onde os sinais superiores [...] são usados no caso de afastamento entre a fonte e o observador, e o inferior [...] são usados no caso em que a eles se aproximam” (BAUER; WESTFALL; HELIO, 2013, p. 285).

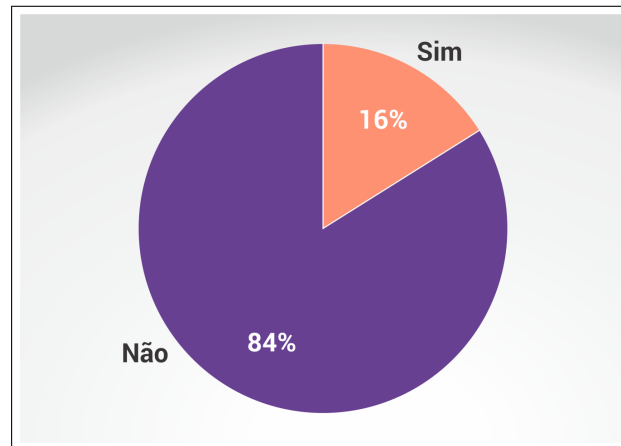
Portanto, sabemos que o efeito Doppler relativístico não é coerente para responder a segunda situação, pois a resposta a esse experimento mental, que é o paradoxo do espelho como apresentado na subseção 2.6.3, que nos diz que o paradoxo do espelho de Einstein é solucionado utilizando-se do segundo princípio da relatividade, que diz que: a luz se move com velocidade constante independentemente do movimento da fonte, e ainda sabendo-se que nenhum corpo material pode alcançar a velocidade da luz, não usando o ideia de efeito Doppler relativístico, pois na situação em questão a fonte e o observador e o espelho se deslocam com velocidade  $c$  constante, o que implica também que a frequência que chega ao observador será a mesma que a frequência emitida pela fonte; isso muda para qualquer observador em outro referencial inercial.

### 3.2.3 Análise do Ensino de Relatividade

Os dados que apresentaremos agora refletem a “inserção” do ensino de FMC, especificamente do ensino de relatividade restrita no ensino médio, assim como se os pesquisados tiveram acesso a este conhecimento. Logo pode-se verificar na figura 8 que apenas 16% dos entrevistados estudaram relatividade no ensino médio.

<sup>5</sup> Fluxograma de 2012.1, está disponibilizado no Portal do Curso de Física da FECLI, na área de downloads – Programa de disciplinas Disponível em: < <http://www.uece.br/fisicaiguatu/index.php/downloads/cat-view/23-programas-e-disciplinas> > Acesso em: 02 jun. 2018.

**Figura 8 – Resposta dos alunos ao serem indagados a respeito se tiveram ou não aulas de relatividade durante o ensino médio**



Fonte – Elaborado pela autora.

Ao serem indagados sobre quais os conteúdos que foram abordados, dos 16% apenas 6,4% dos entrevistados responderam, o Aluno 4 disse não saber, enquanto o Aluno 23 afirmou que:

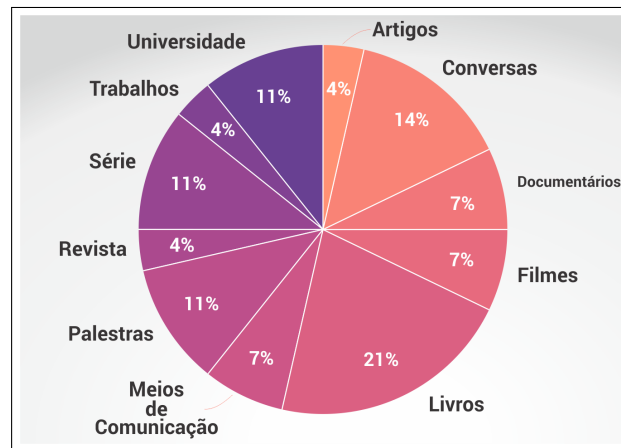
“Tudo é relativo. Outra conclusão da Teoria Restrita é que o tempo passa mais devagar num objeto que se desloca em grande velocidade. O exemplo clássico é a hipótese do astronauta que viaja espaço afora. Quando retornar à terra, seus amigos terão envelhecido, mas, para ele, poucos anos terão se passado. A noção de tempo, portanto, é relativa” (Aluno 23).

Na fala do Aluno 23, ele deixa implícito que durante o ensino médio estudou relatividade; o mesmo estudou a dilatação temporal, uma vez que ele nos apresenta um exemplo de paradoxo temporal afirmando ainda a concepção relativística de que o tempo não é mais uma grandeza absoluta, mas sim uma grandeza relativística. No entanto, generaliza a ideia de relativo, usando a expressão “Tudo é relativo” o que sabemos que não ser correto, pois, a concepção de espaço-tempo é absoluta na relatividade.

Já os pesquisados que disseram não terem assistido a aulas de relatividade no ensino médio correspondem ao valor de 84%, e estes quando foram indagados se em algum momento de suas vidas tiveram contato com a temática relativística, 71% expressaram que sim. Utilizamos das respostas dadas a esta indagação para elaborar um gráfico com todas formas de contato que os pesquisados apresentam, conforme figura 9 a seguir.

Da figura 9, observa-se que a maioria dos entrevistados tiveram contato com o ensino de relatividade restrita através de livros, seja livro didático ou outros livros, e em conversas informais com professores e amigos. A universidade e as palestras que nela ocorrem vêm ocupando um espaço de destaque dentro da apresentação da relatividade, pois grande parte dos alunos

**Figura 9 – Formas de contato com a relatividade apresentado pelos entrevistados**

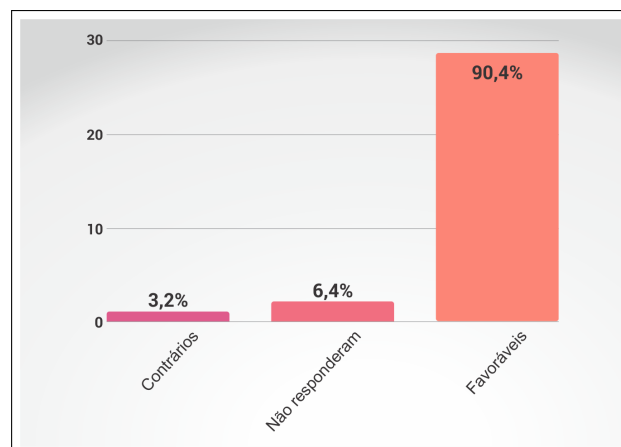


Fonte – Elaborado pela autora.

respondentes desta pesquisa são alunos do primeiro e segundo semestres, conforme apresentado anteriormente, e que tiveram o real contato com a relatividade nas palestras promovidas pelo curso de Licenciatura Plena em Física da UECE – FECLI.

Outra questão lançada nesta pesquisa diz respeito a importância em abordar o ensino de FMC, especificamente relatividade, no ensino médio; a figura 10 representa o percentual de alunos favoráveis e contrários a esta questão.

**Figura 10 – Percentual de alunos que acham importante o Ensino de Física Moderna – Relatividade – no Ensino Médio**



Fonte – Elaborado pela autora.

Dos 31 respondentes da pesquisa, obtivemos que 94,4% dos entrevistados posicionaram-se de forma favorável ao ensino de relatividade no ensino médio e estes justificaram suas respostas. No quadro 01 podemos ver algumas respostas dos alunos favoráveis ao ensino de relatividade.

O quadro 01 apresenta alguma das falas dos alunos pesquisados que consideram o

**Quadro 1 – RESPOSTAS DOS ALUNOS SOBRE A PERGUNTA: *Você acha o Ensino de Física Moderna, em particular de Relatividade, no Ensino Médio importante? Por que?***

ALUNOS	RESPOSTAS
Aluno 1	Sim. Pois várias tecnologias que estão à nossa volta funcionam seguindo os princípios da relatividade.
Aluno 2	Sim, pois apresenta conceitos diferentes da mecânica clássica, que devem ser apresentados para os alunos.
Aluno 3	Sim, pois seus conceitos representam uma parte crucial da Física e, conseqüentemente, da natureza que ela descreve. No entanto, é importante observar que a Física possui um vasto arsenal de conteúdo a serem vistos no Ensino Médio, e essa grande quantidade de conceitos acaba por superlotar a mente dos alunos e sobrecarregar os professores. Então, é necessário analisar como será feito o "encaixe" desses novos conteúdos dentro do contexto da realidade das Escolas.
Aluno 6	Sim, por que as pessoas precisam saber como funciona a realidade em que vivem. Isso é muito importante.
Aluno 12	Sim, porque podemos ter mais clareza de quem foi Albert Einstein e como desenvolveu a teoria que mudou a nossa concepção do universo. Precisaria de Introduzir a teoria de Einstein e entender os postulados e teoria geral da relatividade que foi uma das descobertas mais impactantes no ramo da ciência.
Aluno 17	Torna o ensino da Física mais atraente aos estudantes.
Aluno 19	Sim, pois a Física Moderna atualmente é uma das áreas que está em evolução, dessa forma se faz necessário que os estudantes do ensino básico devam ter um mínimo de conhecimento relacionado ao tema. Devemos lembrar que boa parte da tecnologia do século XXI foi desenvolvida como consequência do conhecimento adquirido em Física Moderna, ou seja, é importante entender essa área, pois coincide com a necessidade de a pessoa humana compreender e refletir sobre o meio em que está inserido, permitindo o desenvolvimento do mesmo como alguém que pensa de forma crítica o que está ao seu redor.
Aluno 21	Sim, pois é a parte da Física na qual há mais pesquisas atualmente.
Aluno 29	Física ocorre no ensino médio. E é muito importante esses alunos terem acesso aos conteúdos presentes na Física Moderna para entender o mundo ao seu redor.

Fonte – Elaborado pela autora.

ensino de relatividade na escola secundária; dessa maneira, a discussão apresentada pelos alunos demonstra que estes entendem a relatividade como sendo importante para compreensão do mundo atual em que vivem e se trata de um conhecimento científico usado no desenvolvimento das novas tecnologias. As ideias debatidas no quadro 01 refletem a prática reflexiva que é apresentada no PCNEM “é preciso rediscutir qual física ensinar para possibilitar uma melhor compreensão do mundo e uma formação para a cidadania mais adequada” (BRASIL, 2000, p. 23).

Temos ainda que, 3,2% dos entrevistados são contrários, pois conforme justificado pelo Aluno 13, “no momento de crise na educação em que vivemos não julgo necessário inserir o ensino de física moderna, especificamente relatividade, no ensino médio. Os alunos não têm base nem pra física básica.”

O ponto levantado pelo aluno 13 é importante e deve ser discutido, pois segundo Moreira (2015), certamente, “nesta crise é também necessário considerar que as condições

de trabalho dos professores são precárias: baixos salários, carga horária excessiva, muitos alunos, várias escolas e, muitas vezes, formação deficiente”. Moreira (2015) ainda apresenta a diminuição da carga horária destinada ao ensino de Física, o que em décadas passadas eram seis horas semanais; hoje, em muitas escolas, é uma ou duas por semana, fragilizando assim o ensino da Física como um todo. O autor ainda afirma que o ensino de Física pode cair a zero se for implantado a unificação da Física, Química e Biologia nas Ciências da Natureza. Quanto ao currículo, segundo ainda Moreira (2015).

O currículo está altamente desatualizado em termos de conteúdo e tecnologias. Não se ensina nada de Física Moderna e Contemporânea e não se incorpora, efetivamente, as tecnologias de comunicação e informação nas práticas docentes. Como já é lugar comum dizer, os alunos são do século XXI, os professores do século XX e a escola é do século XIX (MOREIRA, 2015).

Contudo, é importante destacar que o ensino de Física é amplamente fragilizado, pois apesar de serem colocados em pauta as discussões de ampliação e melhoramento do ensino nos textos bases do currículo nacional de ensino de Física bem como nos PCN's, na prática essa ampliação não acontece, pois com a carga horária destinada ao ensino de Física nas escolas médias fica inviável para os professores darem todos os conteúdos programáticos, e tal ponto reflete-se diretamente no ensino de relatividade, pois trata-se de um conteúdo que só é visto no terceiro ano letivo e ainda nos últimos bimestres.

## 4 CONCLUSÃO

O ensino de Física vem sendo fragilizado no decorrer dos anos, e um fator que contribui significativamente para este enfraquecimento é a redução da carga horária voltada ao ensino da disciplina; devido a esta flagelação, alguns pontos são mais impactados a ponto de serem deixados de lado, como é caso dos tópicos presentes em Física Moderna e Contemporânea. Entendemos como fundamental a abordagem dos tópicos de Física Moderna no ensino médio, por se tratar de uma parte da Física que aborda conhecimentos voltados ao avanço tecnológico atualmente observado, despertando assim a curiosidade em nossos estudantes. Dessa forma, nesta pesquisa pudemos analisar do ponto de vista dos acadêmicos do curso de Licenciatura Plena em Física da UECE/FECLI, a opinião destes em relação a abordagem de tópicos de Física Moderna no ensino médio, especialmente relatividade.

Apesar da clara abordagem do ensino de FMC apresentado nos documentos norteadores do ensino, (PCNEM, PCN+ e as Orientações Curriculares para o Ensino Médio), os textos bases são desatualizados, apresentando um conjunto de tópicos estruturadores que em geral são importantes para a formação científica dos alunos; no entanto, quando se trata do tópico de FMC, nota-se uma redução de conteúdos, privilegiando uns e omitindo outros, tornando-se um obstáculo pois os documentos devem focar, nortear, apresentar os conteúdos bases orientando os profissionais sobre a importância de cada temática e apresentando metodologias de ensino, e deste modo entendemos a importância da revisão do currículo de Física enfatizando o ensino das novas tecnologias e da Física construída no período de transição entre os séculos XIX e XX.

A contextualização histórica do conhecimento é de suma importância para compreendermos como se dá o processo de desenvolvimento científico; portanto apresentar a TRR como uma teoria coletiva fornece os devidos créditos aos antecessores de Einstein que muito contribuíram para formulação do que conhecemos hoje como Teoria da Relatividade Restrita e, de quebra, aprendemos um pouco sobre a história da ciência, além de entender os princípios e as leis que a compõem. É importante ressaltar que os experimentos mentais em Física, produzidos no laboratório da mente, são situações idealizadas que usamos com tanta frequência que nos passam despercebidos, usando uma linguagem lógica e direcionada a fim de responder situações que não podem ser executadas em laboratórios reais e que descrevem paradoxos. Tal recurso foi bastante utilizado na construção das situações propostas aos alunos que contribuíram com nossa pesquisa.

A presente pesquisa analisou a abordagem do ensino de relatividade, assim como o



nível de compreensão desse tópico através de situações idealizadas em forma de experimentos mentais, e o público alvo foi em sua maioria constituído de alunos de graduação em Física da UECE-FECLI do primeiro ao sexto semestre (87,2%). Os acadêmicos, quando no ensino médio (84%) não estudaram relatividade; no entanto, quanto às situações I e II, que envolvem compreensão da mecânica clássica e dos princípios relativísticos, tivemos um quadro de respostas satisfatórias, o que não era esperado, uma vez que os entrevistados em sua maioria não estudaram relatividade no ensino médio nem na universidade, pois a disciplina só é vista no sétimo semestre letivo do curso. E dentro da exposição dos meios aos quais os pesquisados tiveram acesso à relatividade, comprovamos também que FMC constitui uma área atrativa da Física, pois esta faz parte do nosso cotidiano e está inserida nos aparelhos tecnológicos, em produções cinematográficas, documentários e séries, e ainda estão presentes nas mídias, como programas de TV e jornais que debatem ciência, ou aqueles que esporadicamente apresentam alguma notícia.

Assim é importante apresentar as justificativas sobre a importância de efetivar a inserção de FMC nas escolas médias e algumas dificuldades, mas que no geral as falas casam com as propostas de inserção apresentadas pelos documentos oficiais do MEC; no entanto quando analisamos a prática, verificamos que é um conteúdo esquecido, deixado de lado e assim como afirma Moreira (2015), as escolas são do século XIX, os professores do século XX e os alunos do XXI.

Portanto, temos que, enquanto futuros professores, apresentar aos nossos alunos a Física com o que ela tem de melhor, uma vez que o que é ensinado na escola não está em contraste com a tecnologia atual; se a FMC explica em parte o desenvolvimento científico do mundo em que vivemos, e de quebra trata pontos da Física Clássica como pontos particulares, porque não ensiná-la nas escolas? Através dessa indagação, buscamos uma consonância das atuais tecnologias com o ensino de FMC, o que não é novidade, posto que já é há bastante tempo apresentado nos documentos oficiais norteadores do ensino de Física, trazendo assim os PCN's em seu texto base a incorporação do estudo da natureza com as questões tecnológicas. Logo podemos utilizar desta temática para buscar inserir nos alunos curiosidade e vontade de aprender Física.

Sabemos que só a revisão curricular, atualização dos PCN's e a efetivação do ensino de FMC não resolvem o problema da educação, pois todos esses pontos sendo "resolvidos" temos uma série de problemas estruturais e sociais que acometem a educação, tais como, escolas precarizadas, constante necessidade de inovação, superlotação das salas de aula, professores de outras áreas que dão aulas de Física, a não inserção do ensino de Física nas séries iniciais, a

fragilização da formação docente, carga horária do ensino de Física reduzida nas escolas públicas além da utilização de avaliações externas como parâmetro estruturador de ensino. Assim, como é esperado no fim de um trabalho acadêmico uma apresentação das soluções dos problemas propostos, aqui não será possível fazê-la, pois a educação é um conjunto de ações que necessita de forte investimento por parte dos governantes bem como o interesse daqueles que também fazem parte do processo educacional, ou seja de toda a sociedade.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. B. P. d. **Educação infantil: discurso, legislação e práticas institucionais**. São Paulo: Cultura Acadêmica - Coleção PROPG Digital - UNESP, 2010.
- BAUER, W.; WESTFALL, G. D.; HELIO, D. **Física para Universitários - Relatividade, Oscilações, Ondas e Calor**. Porto Alegre: McGraw-Hill – Bookman, 2013.
- BRAIT, L. F. R.; MACEDO, K. M. F. d.; SILVA, F. B. d.; SILVA, M. R.; SOUZA, A. L. R. d. A relação professor/aluno no processo de ensino e aprendizagem. **INTINERARIUS REFLECTIONIS**, v. 8, n. 1, 2010. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/rir/article/view/40868>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Diário Oficial da União, 1988.
- BRASIL. **Ministério da Educação, Secretária de Educação Média tecnológica**. Brasília: MEC, 2000.
- BRASIL. **Ministério da Educação, Secretária de Educação Média tecnológica**. Brasília: MEC, 2002.
- BRASIL. **Ministério da Educação, Secretária de Educação Média tecnológica**. Brasília: MEC, 2006.
- BRENNAN, R. **Gigantes da Física: Uma História da Física Moderna Através de Oito Biografias**. São Paulo: Zahar, 2003.
- BROWN, J. R. **WN THE LABORATORY OF THE MIND: Thought Experiments in the Natural Sciences**. Londres: Routledge, 1991.
- CHAVES, A. S. **Onda, Relatividade e Física Quântica**. Rio de Janeiro: Reichmann e Affonso Ed., 2001.
- CHESMAN, C.; ANDRÉ, C.; MACÊDO, A. **Física Moderna: Experimental e Aplicada**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Livraria da física, 2004.
- DAMASIO, F.; RICCI, T. F. Relatividade de einstein em uma abordagem histórico-fenomenológica. **Intinerarius Reflectionis**, v. 20, n. 2, 2009. Disponível em: <[https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/v20n2\\_Damasio\\_Ricci.pdf](https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/v20n2_Damasio_Ricci.pdf)>. Acesso em: 26 maio 2018.
- GAZZINELLI, R. **Teoria da Relatividade Especial**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 2009.
- GOMES, V. C.; SOUSA, J. R. d.; ROBELO, J. J. **Gramsci, Educação e Luta de Classes: pressuposto para formação humana**. Fortaleza: UFC, 2015.
- GONDAR, J.; CIPOLATTI, R. **Iniciação à Física Matemática: Modelagens de Processo e Métodos de Solução**. Rio de Janeiro: IMPA, 2011.
- GRESSLER, L. A. **Introdução à pesquisa: projetos e relatórios**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Loyola, 2004.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**. 8<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna**. 6<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 12<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill – Bookman, 2015.

KIOURANIS, N.; SOUZA, A.; FILHO, O. Experimentos mentais e suas potencialidades didáticas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 1, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v32n1/a19v32n1.pdf>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

MARQUES, A. A. A pedagogia tecnicista: Um breve panorama. **Intinerarius Reflectionis**, v. 1, n. 12, 2012. Disponível em: <<https://www.revistas.ufg.br/rir/article/view/20378>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

MARTINS, R. A. **A Origem da Teoria da Relatividade Especial**. São Paulo: Livraria da física, 2015.

MATSAS, G. E. Lei de arquimedes relativista para corpos em movimento rápido e a resolução geral-relativista do "paradoxo submarino". **Phys. Rev. D**, American Physical Society, v. 68, n. 2, p. 027701–1–027701–4, 2003. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.68.027701>>.

MOON, P. Einstein e a obsessão pela natureza da luz: As cinco idades do universo – parte. **Revista Época**, 2011. Disponível em: <<http://revistaepoca.globo.com/Ciencia-e-tecnologia/noticia/2011/11/einstein-e-obsessao-pela-natureza-da-luz.html>>. Acesso em: 24 maio 2018.

MORAIS, A. M. A. **Gravitação e Cosmologia: Uma introdução**. São Paulo: Livraria da Física, 2010.

MOREIRA, M. A. Orientações sobre o currículo. **Programa de Pós-Graduação em Física**, Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, 2015. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/pesquisaemensino.pdf>>. Acesso em: 27 maio 2018.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Eletromagnetismo**. São Paulo: Blucher, 1997.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Relatividade e Física Quântica**. 2<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 2014.

OLIVEIRA, I. S. **Física Moderna para Iniciados, Interessados e Aficionados**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PEREIRA, M. R. S. Considerações sobre a epistemologia dos experimentos mentais. **Conjectura: Filos. Educ.**, Caxias do Sul, RS, v. 20, n. 2, p. 181–197, 2015. Disponível em: <[http://www.uces.br/etc/revistas/index.php/conjectura/article/viewFile/3327/pdf\\_454](http://www.uces.br/etc/revistas/index.php/conjectura/article/viewFile/3327/pdf_454)>. Acesso em: 10 maio 2018.

RESNICK, R. **Introdução a Relatividade Especial**. São Paulo: Ed. Univ. de S. Paulo e Ed. Póligono, 1971.

RUSSELL, B. **ABC da Relatividade**. Rio de Janeiro: Zahar, 2005.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR, J. W. **Princípios de Física: Mecânica Clássica e Relatividade**. 5<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

TIPLER, P. A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 4<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 3<sup>a</sup>. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

VIEIRA, R. S. Solution of supplee's submarine paradox through special and general relativity. **Europhysics Letters**, EPL, v. 116, n. 5, p. 50007–1–50007–7, 2017. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1611.07517.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A – Questionário da Pesquisa Acadêmica

25/05/2018	Formulário online de Pesquisa Acadêmica
<b>Formulário online de Pesquisa Acadêmica</b>	
<p>Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa acadêmica a respeito do Ensino de Física Moderna - Relatividade - no Ensino Médio, contamos com a sua colaboração nesta pesquisa, respondendo a um questionário sobre o tema aqui proposto. Garantimos que a pesquisa não trará nenhuma forma de prejuízo, dano ou transtorno para aqueles que participarem. Vale ressaltar, que sua participação é voluntária e você poderá a qualquer momento deixar de participar deste, sem qualquer prejuízo ou danos. Comprometemo-nos a utilizar os dados coletados somente para a pesquisa e os resultados poderão ser veiculados através de trabalhos acadêmicos, artigos científicos e revistas especializadas e/ou encontros científicos e congressos, sempre resguardando sua identificação.</p>	
<p><b>*Obrigatório</b></p>	
<b>INFORMAÇÕES PESSOAIS</b>	
<p>Todas as informações obtidas neste estudo serão mantidas em sigilo e sua identidade não será revelada.</p>	
<b>1. Nome</b>	
<hr/>	
<b>2. Sexo *</b>	
<i>Marcar apenas uma oval.</i>	
<input type="radio"/> Masculino	
<input type="radio"/> Feminino	
<b>3. Idade (apenas números) *</b>	
<hr/>	
<b>4. Curso *</b>	
<i>Marcar apenas uma oval.</i>	
<input type="radio"/> Licenciatura Plena em Física	
<input type="radio"/> Outros	
<b>5. Você é: *</b>	
<i>Marcar apenas uma oval.</i>	
<input type="radio"/> Aluno(a)	
<a href="https://docs.google.com/forms/d/1LZmlwmJNTFvvaagKF5NCUEcvKS0gPyqUfzNp6KTEzKA/edit">https://docs.google.com/forms/d/1LZmlwmJNTFvvaagKF5NCUEcvKS0gPyqUfzNp6KTEzKA/edit</a>	1/3

Fonte – Elaborado pela autora.

25/05/2018

Formulário online de Pesquisa Acadêmica

**6. Qual seu semestre? \****Marcar apenas uma oval.*

- 1° semestre  
 2° semestre  
 3° semestre  
 4° semestre  
 5° semestre  
 6° semestre  
 7° semestre  
 8° semestre

**QUESTIONÁRIO**

Aqui apresentaremos questões mais específicas referente a temática da pesquisa. E pedimos para que suas respostas sejam sinceras e que não busquem outros meios para respondê-la, pois, caso seja utilizado outros recursos ocasionará alteração dos resultados coletados.

**7. 1. O que você acha que acontece na seguinte situação: Uma pessoa segura, na sua frente e a certa distância, um microfone e começa a falar enquanto se desloca a uma velocidade igual à do som. \****Marcar apenas uma oval.*

- a. O som sairá no alto-falante;  
 b. O som não sairá no alto-falante;  
 c. Nenhuma das respostas anteriores.  
 d. Não sei.

**8. Se você assinalou o item c, qual seria a resposta, então.**

---

---

---

---

---

**9. 2. O que você acha que acontece na seguinte situação: Uma pessoa segura, na sua frente e a certa distância, um espelho, deslocando-se a uma velocidade praticamente igual à da luz. \****Marcar apenas uma oval.*

- a. Ele verá a sua imagem refletida;  
 b. Ele não verá a sua imagem refletida;  
 c. Nenhuma das respostas anteriores;  
 d. Não sei.

**10. Se você assinalou o item c, qual seria a resposta, então.**

---

<https://docs.google.com/forms/d/1LZmlwmJNTFvvaagKF5NCUEcvKS0gPyqUfzNp6KTEzKA/edit>

2/3



25/05/2018

Formulário online de Pesquisa Acadêmica

**11. 3. Durante o ensino médio você teve aulas referentes aos conteúdos de relatividade? \****Marcar apenas uma oval.*

- a. Sim
- b. Não

**12. Se você assinalou o item a, quais foram os tópicos abordados?**

---

**13. Caso tenha assinalado o item b. Mesmo sem ter tido aula de relatividade, em algum momento já foi apresentado a temática da física relativística? Seja na escola, jornal, livros didáticos ou paradidáticos, TV, filmes, séries, rodas de conversas com amigos ou em qualquer outro espaço ou meio de comunicação?**

---

---

---

---

---

**14. 4. Você acha o Ensino de Física Moderna, em particular de Relatividade, no Ensino Médio importante? Por que? \***

---

---

---

---

---

Powered by  
 Google Forms