



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS (UFAM)
INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS (IFAM)
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA
POLO 04

Arleson Protázio Maciel

ABORDANDO CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA RELATIVIDADE
GERAL NO TERCEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

MANAUS - AM

2024

Arleson Protázio Maciel

ABORDANDO CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA RELATIVIDADE
GERAL NO TERCEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da UFAM/IFAM como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: FÍSICA NO ENSINO MÉDIO.

Orientador: Dr José Anglada Rivera

MANAUS - AM
2024

Arleson Protázio Maciel

ABORDANDO CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA RELATIVIDADE
GERAL NO TERCEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO

Dissertação apresentada ao Polo 04 do
Programa de Mestrado Nacional Profissional
em Ensino de Física da UFAM/IFAM como
requisito parcial à obtenção do título de Mestre
em Ensino de Física. Área de concentração:
FÍSICA NO ENSINO MÉDIO

Aprovada em 29 de outubro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



JOSE ANGLADA RIVERA

Data: 28/03/2025 19:28:24-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. José Anglada Rivera - Orientador
Instituto Federal do Amazonas - IFAM

Documento assinado digitalmente



MARCIO GOMES DA SILVA

Data: 28/03/2025 14:43:07-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Márcio Gomes Da Silva – Examinador 1
Instituto Federal do Amazona - IFAM

Documento assinado digitalmente



ERNESTO GOVEA ALCAIDE

Data: 28/03/2025 14:32:36-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Ernesto Govea Alcaide – Examinador 2
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

FICHA CATALOGRÁFICA



Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 4

Ata da 72ª Defesa de Dissertação

Aos vinte nove dias do mês de outubro, do ano de dois mil e vinte e quatro, às 08h00, por webconferência, ocorreu a Defesa da Dissertação do mestrando **Arleson Protázio Maciel**, intitulada: **“ABORDANDO CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL NO TERCEIRO ANO DO ENSINO MÉDIO”**, do Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, polo 4 das Instituições de Ensino Superior: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) e Universidade Federal do Amazonas (UFAM). A Banca Examinadora foi composta pelo Prof. Dr. José Anglada Rivera (IFAM), Prof. Dr. Ernesto Govea Alcaide (UFMA) e Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva (IFAM). O Professor Doutor José Anglada Rivera, Presidente, deu início aos trabalhos, convidando os membros a comporem a Banca Examinadora. O Presidente fez a leitura dos procedimentos para defesa de dissertação, e convocou o mestrando para fazer a exposição de seu trabalho que, em seguida, foi arguido pelos membros da Banca Examinadora. Após a arguição, a Banca Examinadora reuniu-se privativamente e decidiu pela aprovação do trabalho. Ao final, os presentes foram chamados para tomarem conhecimento do resultado da avaliação, o Presidente da banca comunicou ao interessado que feitas às devidas correções na dissertação, conforme sugestão da banca Examinadora, o discente é obrigado a entregar, na secretaria do polo 4, até sessenta (60) dias após a data da defesa, uma via (01) via impressa e encadernada no formato capa dura, e uma via (01) digital em formato PDF, para os trâmites necessários à concessão do diploma, conforme Resolução N.º.47 – CONSUP/IFAM de 13 de julho de 2015. Nada mais havendo a tratar, foi lavrado a presente Ata que, após lida e aprovada, será assinada pelos presentes.

Documento assinado digitalmente



JOSE ANGLADA RIVERA
Data: 29/10/2024 11:13:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Anglada Rivera
Presidente - IFAM

Documento assinado digitalmente



ERNESTO GOVEA ALCAIDE
Data: 29/10/2024 14:57:52-0300
verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ernesto Govea Alcaide
Membro Externo - UFMA

Documento assinado digitalmente



MARCIO GOMES DA SILVA
Data: 29/10/2024 20:45:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Márcio Gomes da Silva
Membro Interno - IFAM

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu falecido pai, Manoel Maciel que sempre apoiou meus estudos e que nunca mediu esforços para que eu pudesse chegar onde cheguei.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazona (FAPEAM) por todo apoio financeiro durante todo o mestrado.

Agradeço ao meu Orientador José Anglada Rivera por todas as sábias orientações por ele feita.

Agradeço a todos os familiares, em especial, minhas mães Luzia Protázio e Maria Nézia Protázio por terem me apoiado nessa jornada, agradeço a minha irmã Betina e seu Esposo, por todo apoio também.

Agradeço a todos os colegas de turma, em especial ao amigo Reinaldo, Erdelem e André pela ajuda acadêmica durante toda a jornada.

RESUMO

Este material tem como intuito, abordar conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral para alunos do ensino médio, e mostrar a importância dessa teoria criada pelo físico Albert Einstein, onde tem grandes relevâncias no nosso cotidiano e importantes aplicações tecnológicas. É notório ressaltar que essa teoria é pouca citada em livros didáticos, e sabemos da importância da mesma para a história da Física Moderna. Este trabalho tem como proposta mostrar conceitos da teoria da Relatividade Geral e suas aplicações usando uma ferramenta didática que possibilita explorar o Visual, Auditivo, Escrita/Leitura e Sinestésico (VARK) do aluno, onde possibilita o mesmo entender sua preferência de aprendizagem, e assim facilitando a absorção de conhecimento. O método para coleta de dados foi a utilização de questionários objetivos e subjetivos, e a análise desses dados foi de maneira quantitativa e qualitativa. Os principais resultados indicam que fazendo a utilização de metodologias inovadoras, como VARK, é possível abordar esses conceitos da Relatividade Geral na educação básica, esses resultados sugerem que, para transpor didaticamente conceitos dessa teoria se faz necessário o uso de ferramentas pedagógicas que se ajuste aos conhecimentos já obtidos pelos alunos. Esta pesquisa foi uma contribuição para o ensino de física na abordagem de conceitos complexos de Física Moderna, fornecendo novas perspectivas para melhor trabalhar esses conceitos de Relatividade no ensino médio. A Aprendizagem Significativa de David Ausubel teve um papel crucial na aplicação dessa metodologia e temática abordada.

Palavra-chave: relatividade geral; ensino médio; aprendizagem significativa.

ABSTRACT

This material aims to address fundamental concepts of the Theory of General Relativity for high school students, and to show the importance of this theory created by physicist Albert Einstein, where it has great relevance in our daily lives and important technological applications. It is worth noting that this theory is rarely cited in textbooks, and we know its importance for the history of Modern Physics. This work aims to show concepts of the Theory of General Relativity and its applications using a didactic tool that makes it possible to explore the Visual, Auditory, Writing/Reading and Synesthetic (VARK) of the student, where it allows the same to understand their learning preference, and thus facilitating the absorption of knowledge. The data collection method was the use of objective and subjective questionnaires, and the analysis of these data was quantitative and qualitative. The main results indicate that by using innovative methodologies, such as VARK, it is possible to approach these concepts of General Relativity in basic education. These results suggest that, in order to didactically transpose concepts of this theory, it is necessary to use pedagogical tools that adapt to the knowledge already obtained by students. This research was a contribution to the teaching of physics in the approach of complex concepts of Modern Physics, providing new perspectives to better work these concepts of Relativity in high school. David Ausubel's Meaningful Learning played a crucial role in the application of this methodology and the theme addressed. Keyword: general relativity; high school; meaningful learning.

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fator de Lorentz	40
Figura 2. Transformação do vetor posição \mathbf{r} por uma rotação φ em torno do eixo z do sistema de coordenadas.	43
Figura 3. Um evento no espaço-tempo é definido pelas quatro coordenadas (x, y, z, t) e representado por duas coordenadas apenas: uma espacial x e a temporal t.	44
Figura 4. Intervalo S_{12} entre os 1 e 2.	45
Figura 5. Quando observamos o passado do universo, a folha do passado do cone de luz deve se encurvar no passado remoto, por causa de alta densidade de matéria e de radiação, para fechar em um ponto que é a singularidade que gerou o universo.....	46
Figura 6. Para um observador num elevador em queda livre, tudo se passa como se a gravidade fosse "desligada".....	53
Figura 7. (a) Raio luminoso atravessando um elevador uniformemente acelerado. Os desenhos mostram posições sucessivas do elevador após intervalos de tempo iguais t_1 , t_2 , t_3 e t_4 . (b).	55
Figura 8. Deflexão (grandemente exagerada) da luz proveniente de uma estrela devido à atração gravitacional do Sol.	56
Figura 9. A figura mostra uma comparação entre a previsão teórica (linha tracejada) e os dados experimentais para 7 das 13 estrelas investigadas pelas expedições de Eddington.	56
Figura 10. Deflexão gravitacional da luz.....	57
Figura 11. As imagens de galáxias distantes são transformadas em arcos pelo grande aglomerado de galáxias Abell 2218, cujo enorme campo gravitacional, agindo como uma lente, amplia, reforça e distorce as imagens.	58
Figura 12. A experiência imaginária (a) mostra que o tempo flui mais lentamente no relógio B do que no que no relógio A; (b) representa o efeito da gravidade na frequência da emitida Pelo relógio A (desvio para o violeta)	59
Figura 13. O sistema S está em repouso no campo gravitacional de um planeta. (b) A espaçonave S' , longe de qualquer massa, recebe uma aceleração $a = -g$	61
Figura 14. Um raio de luz é encurvado pela curvatura do espaço-tempo.	63
Figura 15. Tomamos como equador da esfera um círculo máximo arbitrário; dois meridianos próximos que podem ser considerados localmente paralelos, globalmente se encurvam para se encontrar nos polos e o quinto postulando de Euclides é violado.	64
Figura 16. Precessão do periélio de orbita planetária.....	68

Figura 17. Os cientistas acreditam que sistemas binários constituídos por estrelas de nêutrons ou buracos negros prestes a se fundir podem emitir ondas gravitacionais suficientemente intensas para serem detectadas na Terra.....	69
Figura 18: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno. ...	82
Figura 19: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno	83
Figura 20: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno. ...	83
Figura 21: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno. ...	84
Figura 22: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno. ...	85
Figura 23: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno	86
Figura 24: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno. ...	86
Figura 25: Questão 1 do teste avaliativo	92
Figura 26: Questão 2 do teste avaliativo	92
Figura 27: Questão 3 do teste avaliativo	92
Figura 28: Questão 4 do teste avaliativo	93
Figura 29: Questão 5 do teste avaliativo	93
Figura 30: Questão 6 do teste avaliativo	95
Figura 31: Questão 7 do teste avaliativo	95
Figura 32: Questão 8 do teste avaliativo	96
Figura 33: Questão 9 do teste avaliativo	96
Figura 34: Resposta da questão 9 do teste avaliativo feita por um aluno.....	97
Figura 35: Questão 10 do teste avaliativo	97
Figura 36: Resposta da questão 10 do teste avaliativo feita por um aluno.....	97
Quadro 1. informações das obras de ensino da TRR e TRG no ensino médio	24
Quadro 2. Estrutura da sequência didática	75
Gráfico 1: Resultado do questionário diagnóstico.....	82
Gráfico 2: Resultado do questionário diagnóstico.....	84
Gráfico 3: Perfil do aluno do CETI, Fonte Boa- Am.	86
Gráfico 4: Perfil do aluno do CETI, Fonte Boa- Am.	88
Gráfico 5: Resultado do questionário VARK.....	90
Gráfico 6: Resultado do teste avaliativo após a aplicação da sequência didática.	91
Gráfico 7: Resultado do teste avaliativo após a aplicação da sequência didática	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alfabetização Científica
BNCC	Base Nacional Comum Curricular
CETI	Centro Educacional de Tempo Integral
EM	Ensino Médio
FMC	Física Moderna e Contemporânea
Fe	Ferro
FC	Física Clássica
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
KeV	Kilo Eletro Volts
LDB	Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional
PE	Princípio de Equivalência
RG	Relatividade Geral
RR	Relatividade Restrita
TL	Transformação de Lorentz
TRG	Teoria da Relatividade Geral
TRR	Teoria da Relatividade Restrita
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	15
CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO DO ESTUDO DA PESQUISA	18
1.1 – OBJETIVO GERAL.....	18
1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3 – JUSTIFICATIVA	18
1.4 – PROBLEMÁTICA	19
1.5 – QUESTÕES NORTEADORAS	20
1.6 – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL.....	21
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1– ANÁLISE DAS OBRAS DE OUTROS AUTORES	25
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	36
3.1- A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA.....	36
3.2– A TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL	42
3.2.1– VETORES	42
3.2.2– EVENTOS E INTERVALOS NO FORMALISMO DO ESPAÇO-TEMPO	43
3.2.3– O MODELO DO BIG BANG E O CONE DE LUZ.....	45
3.2.4– QUADRIVETORES.....	47
3.2.5– QUADRIVETOR VELOCIDADE	48
3.2.6– QUADRIVETOR MOMENTO.....	49
3.2.7– QUADRIVETOR FORÇA	50
3.2.8– PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA	51
3.2.9– A CURVATURA DA LUZ NA PRESENÇA DE UM CAMPO GRAVITACIONAL	54
3.2.10– A DILATAÇÃO GRAVITACIONAL DO TEMPO.....	58
3.2.11– DESVIO GRAVITACIONAL PARA O VERMELHO.....	60
3.2.12– A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO.....	63
3.2.13– AVANÇO DO PERIÉLIO DE MERCÚRIO	67
3.2.14– OS BURACOS NEGROS E O TEMPO	68
CAPÍTULO 4– METODOLOGIA.....	70
4.1 – PÚBLICO ALVO E O LOCAL DA PESQUISA	70
4.2– CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	70
4.3 – CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO.....	71
4.4 – METODOLOGIA DA PESQUISA.....	71
4.5 – MÉTODO A SER UTILIZADO	72
4.6 – INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	73

4.7 – INSTRUMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS.....	73
4.8 – METODOLOGIA VARK	74
4.9 – ESTRUTURA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	75
CAPÍTULO 8 – APLICAÇÃO EM SALA DE AULA.....	77
8.1 – PRIMEIRO DIA	77
8.2 – SEGUNDO DIA	77
8.3– TERCEIRO DIA	77
8.4 – QUARTO DIA	78
8.5 – QUINTO DIA.....	80
CAPÍTULO 9 – RESULTADOS E ANÁLISES.....	81
9.1– ANÁLISES DOS QUESTIONÁRIOS	81
CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
REFERÊNCIAS	99

INTRODUÇÃO

Trabalhar conteúdos relacionados à Física Moderna no ensino médio é um desafio que vem aumentando ao longo dos anos, tendo em vista que nos deparamos com várias adversidades estabelecidas pelo nosso sistema educacional. Sabemos que trabalhar esses conteúdos no ensino médio é importante, pois se faz necessário compreender a física do cotidiano e a Física Contemporânea é um campo que inclui tópicos avançados como Relatividade, Mecânica Quântica e Física de Partículas.

Em contra partida, ao introduzir a física moderna e contemporânea no ensino médio pode ser um desafio empolgante, porque permite que os alunos explorem conceitos e ideias na vanguarda da ciência.

Para fazer uma abordagem dos conceitos relacionados a Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, requer ferramentas pedagógicas que facilite a influência mútua do conhecimento abordado com o ensino-aprendizagem do aluno, pois sabemos que não é fácil transpor conceitos de grandes complexidades para alunos com conhecimentos básicos.

A Teoria da Relatividade Geral formulada por Albert Einstein no início do século XX, revolucionou fundamentalmente a forma como entendemos o universo. Dividida em aspectos limitados e gerais, esta teoria apresenta conceitos inovadores sobre tempo, espaço e gravidade. A teoria da relatividade de Einstein, é uma ideia desafiadora estabelecida durante séculos na física clássica, revela a interdependência do espaço, do tempo, da matéria e da energia, redefinindo a nossa visão da realidade física. Esta teoria continua a inspirar cientistas e entusiastas, mostrando que o mundo que nos rodeia não é tão simples como imaginamos, mas é uma rede complexa e interligada de eventos e dimensões.

Ao fazer escolha do tema, me senti desafiado. Já que, para mostrar a Teoria da Relatividade Geral no terceiro ano do ensino médio, era necessário usar o pouco dos conhecimentos prévios obtidos pelos alunos ao longo da jornada no ensino básico. Mostrar a Teoria da Relatividade no ensino médio é de extrema importância, pois essa teoria revolucionou nossa compreensão do universo e da natureza do espaço e do tempo.

A Teoria da Relatividade Geral é uma das teorias mais revolucionárias e fascinantes da física moderna. Embora seja considerada um dos pilares da nossa compreensão atual do universo, seu estudo pode parecer desafiador, especialmente no contexto do ensino médio. No entanto, é possível apresentar os conceitos fundamentais dessa teoria de uma forma acessível e envolvente, permitindo que os estudantes explorem e compreendam as ideias que transformaram nossa visão do mundo contemporâneo.

Como citado na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), poucas pessoas aplicam os conhecimentos e procedimentos científicos na resolução de seus problemas cotidianos (como estimar o consumo de energia de aparelhos elétricos a partir de suas especificações técnicas, ler e interpretar rótulos de alimentos etc.). Tal constatação corrobora a necessidade de a Educação Básica – em especial, a área de Ciências da Natureza – comprometer-se com o letramento científico da população. (BRASIL, 2018)

As Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), de 20 de dezembro de 1996, propõem, por exemplo, como diretrizes para o Ensino Médio: o destaque à educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, o domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna. Particularmente, quanto à área de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. (OSTERMANN, 2002)

Dessa forma, o intuito deste trabalho é mostrar a importância dos conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral para alunos do ensino médio. A introdução da relatividade geral no ensino médio ajuda os alunos a expandir sua compreensão do universo e da física além dos conceitos clássicos, incentiva os alunos a questionar, explorar e pensar criticamente sobre como o mundo funciona em escala macro. A Relatividade Geral desafia a intuição humana através de conceitos como a curvatura do espaço-tempo e a natureza da gravidade, promove o pensamento abstrato e a capacidade de raciocinar sobre ideias complexas. Com essa teoria tão revolucionária, os alunos são incentivados a questionar e analisar conceitos estabelecidos, promovendo habilidades de pensamento crítico e investigativo.

A Teoria da Relatividade Geral está intimamente relacionada com muitos desenvolvimentos tecnológicos modernos, como o GPS (Sistema de Posicionamento Global), e é essencial para a sua precisão. A compreensão desta teoria permite que os alunos vejam sua relevância no mundo atual e futuro, e a apresentação de conceitos desafiadores e interessantes contidos na TRG pode ajudar os alunos a se interessarem mais pela ciência, e compreender a física, matemática e suas tecnologias por trás dessa teoria fascinante.

Cada aluno tem diferentes habilidades e interesses de aprendizagem. Ao incorporar teorias complexas como a Relatividade Geral, os educadores podem acomodar uma variedade de estilos de aprendizagem e proporcionar oportunidades para todos os alunos se envolverem e aprenderem da forma que lhes for mais significativa.

Para mostrar conceitos importantes da TRG no ensino médio, se faz necessário estabelecer um modelo de aprendizagem para introduzir esses conhecimentos, pois a particularidade de cada aluno em apreender deve se levar em conta, ou seja, cada aluno tem uma forma de melhor assimilar os conteúdos abordados pelo docente. Diante disso o que se

propõe é utilizar uma metodologia de abordagem de aprendizado, baseados em estilos diferentes de aprendizagem. Um modelo desenvolvido pelo Professor neozelandês Neil Fleming, identifica quatro principais modalidades de aprendizado: Visual, Auditivo, Leitura/Escrita e Cinestésico (VARK é uma abreviatura dessas quatro modalidades). A metodologia VARK reconhece que cada indivíduo tem preferências específicas de aprendizagem, embora possamos utilizar todos os estilos em maior ou menor grau. O objetivo é identificar essas preferências para otimizar o processo de aprendizado, tornando-o mais eficaz e envolvente para cada aluno.

Ao reconhecer os diferentes estilos de aprendizado, os educadores podem diversificar suas abordagens de ensino, oferecendo materiais visuais, aulas interativas, textos escritos e atividades práticas para atender às necessidades variadas dos alunos. Isso pode resultar em uma experiência de aprendizado mais inclusiva e eficaz para todos.

Dentro dos contextos da física o modelo VARK proporcionaria uma visão melhor no que se refere a forma mais adequada para de transpor conteúdos referentes tanto a física clássica, quanto a Física Moderna e Contemporânea. Ao mostrar a TGR para discentes do ensino médio, devemos ressaltar a importância dos conhecimentos já obtidos pelos mesmos, haja visto que esses conhecimentos ganham notoriedade na abordagem dos conceitos fundamentais TRG.

A Teoria da Relatividade Geral de Einstein pode ser um excelente ponto de partida para explorar a aprendizagem significativa. Essa teoria desafia e transforma conceitos fundamentais de espaço, tempo e gravidade, oferecendo oportunidades para uma aprendizagem profunda e significativa.

CAPÍTULO 1 – FUNDAMENTAÇÃO DO ESTUDO DA PESQUISA

A contextualização a seguir estabelece o propósito da fundamentação do estudo e destaca a importância de situar a pesquisa dentro do contexto teórico e prático existente, e explica como essa base teórica será utilizada para orientar a pesquisa.

1.1 – OBJETIVO GERAL

Investigar uma metodologia de inserção dos conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral no Ensino Médio através de uma Sequência Didática, mostrando conceitos e consequências observáveis para instigar a curiosidade dos alunos sobre a natureza do espaço-tempo e da gravidade.

1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar uma proposta de ensino através de uma sequência didática para que os alunos possam compreender melhor os conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral.
- Averiguar e desenvolver um material de apoio ao professor baseado na aplicação da metodologia de ensino VARK em relação a Teoria da Relatividade Geral.
- Identificar e adaptar estratégias de ensino baseadas no modelo VARK para atender às diferentes preferências de aprendizagem dos alunos, promovendo assim uma compreensão mais abrangente e eficaz dos conceitos fundamentais da Relatividade Geral.
- Destacar os pontos positivos e negativos fazendo o uso da metodologia VARK

1.3 – JUSTIFICATIVA

Ao longo dos anos o Ensino de Física vem ganhando novos aspectos para que possa atender as necessidades do mundo moderno e de suas tecnologias atuais, vários trabalhos foram feitos no Brasil demonstrando as possibilidades de inserir os conceitos que envolve a Física Moderna, e não é diferente com a Relatividade Geral. Diante desse cenário, mostrar uma ferramenta pedagógica para que os alunos tenham uma afinidade com a essência da TRG, e que se torne eficaz na aprendizagem dos mesmos.

A Relatividade Geral é uma teoria que aborda o modelo mais moderno para explicar os fenômenos que aconteceram e que acontece no universo, assim temos uma necessidade de mostrar para que os alunos possam compreender melhor as leis que regem nosso universo. Embora a TRG apresente conceitos complexos, no entanto é possível abordar de forma introdutória de maneira que os alunos do ensino médio possam explorar da melhor forma, visando a aprendizagem. Alguns pontos teóricos importantes que se pode ressaltar, como os princípios fundamentais, por exemplo, a Relatividade Geral sugere que

a gravidade não é uma força conforme descrita na física clássica de Newton, mas sim uma curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia. Einstein explicou esta ideia com as suas famosas equações de campo que relacionam a geometria do espaço-tempo com a distribuição de massa e energia. Em relação a Curvatura do espaço-tempo, um conceito central é a ideia de que objetos massivos, como planetas, estrelas e até mesmo a luz, seguem trajetórias curvas no espaço-tempo ao redor de objetos com massa elevada, como é o caso dos planetas orbitando o Sol. Isso implica que a gravidade não é apenas uma força de atração, mas uma distorção no tecido do espaço-tempo causada pela presença de massa.

Alguns efeitos e fenômenos relativísticos, dentre os efeitos mais conhecidos estão a dilatação do tempo e a contração do espaço, conforme previsto pela teoria. Por exemplo, a dilatação do tempo implica que o tempo passa mais devagar em regiões com maior gravidade.

Além disso, a Relatividade Geral prevê fenômenos como as ondas gravitacionais, e as perturbações no espaço-tempo que foram observadas pela primeira vez em 2015. A ciência e a tecnologia estão juntas, pois uma é consequência da outra. A Teoria da Relatividade Geral teve implicações fundamentais em nossa compreensão do universo e influenciou avanços tecnológicos, como o GPS, que precisa levar em conta os efeitos relativísticos para funcionar com precisão.

Ao abordar a Teoria da Relatividade Geral no ensino médio, é importante simplificar conceitos complexos para torná-los acessíveis aos alunos. Diagramas, exemplos do cotidiano, exploração dos conceitos através de imagens, simulações virtuais e analogias podem ser recursos valiosos para facilitar a compreensão desses conceitos abstratos. O objetivo é oferecer uma visão introdutória que estimule a curiosidade dos alunos e os incentive a explorar mais sobre esse fascinante campo da física.

1.4 – PROBLEMÁTICA

Nota-se que muitos professores do ensino médio, especificamente professores de física, se omitem a ministrar aula de Física Moderna, como tópicos relacionados a Teoria da Relatividade, sendo fundamental na compreensão dos fenômenos da natureza e do universo. Além do mais, a relatividade tem aplicações importantes no dia a dia que requer ferramentas didáticas atualizadas para ser demonstradas e que possa penetrar no cognitivo dos alunos.

A Relatividade Geral introduz conceitos que desafiam a intuição, como a curvatura do espaço-tempo devido à presença de massa e energia. A compreensão desse fenômeno requer uma compreensão prévia sólida de conceitos fundamentais da física clássica, como movimento, força e energia. Essa base é muitas vezes inatingível no ensino médio devido às restrições de tempo e despreparo de muitos profissionais da área.

Além disso, a introdução da Relatividade Geral poderia desviar recursos e tempo de outros tópicos importantes do currículo, como mecânica clássica, eletricidade e magnetismo, óptica e termodinâmica, que são cruciais para uma compreensão abrangente da física.

Outro desafio está na falta de materiais didáticos e professores com formação específica para ensinar um tema tão avançado. A disponibilidade de recursos educacionais adequados para simplificar os princípios da Relatividade Geral, tornando-os acessíveis e interessantes para os alunos do ensino médio, é limitada.

No entanto, há mérito em introduzir, de forma conceitual, alguns aspectos da teoria da Relatividade, destacando suas consequências notáveis e seu impacto na compreensão do universo. Isso poderia despertar o interesse dos alunos por questões mais profundas da física e da natureza do espaço-tempo, mesmo que sem abordar todos os detalhes matemáticos e teóricos. Assim a problemática envolvendo a inserção da TRG no ensino médio seria de certa forma resolvida, tendo em vista que, embora ensinar a Relatividade Geral no ensino médio seja um desafio complexo, a introdução cuidadosa e simplificada de seus princípios fundamentais pode contribuir para a formação de uma compreensão mais ampla do universo e do poder da ciência em desvendar seus mistérios mais profundos.

1.5 – QUESTÕES NORTEADORAS

Esta dissertação busca introduzir conceitos sobre a Relatividade Geral no ensino médio, visando compreender aspectos específicos que contribuam para a ampliação do conhecimento neste campo. A relevância deste estudo reside na necessidade de preencher lacunas, esclarecer pontos obscuros ou mesmo propor novos ângulos de abordagem sobre como trabalhar conteúdos relacionados a teoria da Relatividade Geral no ensino básico.

Partindo da premissa de que a pesquisa científica é um processo dinâmico e contínuo, esta dissertação se propõe a trazer contribuições significativas para a compreensão de TRG, fornecendo respostas a questões relevantes e, ao mesmo tempo, desdobrando-se em novos questionamentos que possam nortear futuros estudos.

As questões norteadoras desta pesquisa são fundamentais para direcionar o trabalho e alcançar os objetivos propostos. Elas são formuladas de maneira a orientar a investigação de forma precisa e estratégica, buscando explorar as nuances e complexidades inerentes a Relatividade Geral proposta Einstein.

Ao considerar essas questões como guias centrais deste estudo, busca-se não apenas responder a indagações específicas, mas também estimular um diálogo acadêmico mais amplo, promovendo debates e reflexões que possam enriquecer a compreensão da TRG e suas implicações no contexto de como aplicar a Relatividade Geral no do ensino médio.

A seguir, são apresentadas as questões norteadoras que direcionam esta pesquisa, as quais delineiam os caminhos a serem percorridos para a consecução dos objetivos propostos.

O que é a Relatividade Geral? Quais são os conceitos fundamentais da Relatividade Geral? Quais são as evidências observacionais da Relatividade Geral? Como a Relatividade Geral difere da Física Clássica? Quais abordagens didáticas podem simplificar os conceitos-chave? O que é dilatação do tempo? Como a gravidade afeta o tempo?

1.6 – APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID AUSUBEL

Neste trabalho farei o uso da teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, para melhor explorar os conhecimentos prévios dos alunos, onde eles possam despertar curiosidade e acerca da Relatividade Geral. O conhecimento obtido pelos os mesmos ao longo de suas trajetórias acadêmica na educação básica será uma ferramenta de aprendizagem importante na aplicação da sequência didática.

A aprendizagem significativa, de David Ausubel, é muito importante na psicologia educacional, pois destaca a importância da construção ativa do conhecimento pelos alunos. Ausubel argumenta que a aprendizagem é mais eficaz quando os novos conceitos são integrados de maneira significativa com o conhecimento prévio do aluno, formando uma rede de informações coerente e interconectada.

Para Ausubel, aprendizagem significativa é um processo por meio do qual uma nova informação relaciona-se com um aspecto especificamente relevante da estrutura de conhecimento do indivíduo, ou seja, este processo envolve a interação da nova informação com uma estrutura de conhecimento específica, a qual Ausubel define como *conceito subsunçor*, ou simplesmente *subsunçor*, existente na estrutura cognitiva do indivíduo. (MOREIRA, 1942. P 153.)

Nesta teoria, Ausubel introduz o conceito central de "aprendizagem significativa", que ocorre quando os alunos conseguem relacionar o novo conteúdo com conceitos relevantes que já possuem em sua estrutura cognitiva. Isso contrasta com a aprendizagem mecânica, na qual os alunos simplesmente memorizam informações sem compreender seu significado ou aplicação.

(...) A aprendizagem significativa ocorre quando a nova informação ancora-se em *conceitos ou proposições relevantes*, preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Ausubel vê o armazenamento de informações no cérebro humano como sendo organizado, formando uma hierarquia conceitual, na qual elementos mais específicos de conhecimento são ligados (e assimilados) a conceitos gerais, mais inclusivos. *Estrutura cognitiva* significa, portanto, uma estrutura hierárquica de conceitos que são representações de experiências sensoriais do indivíduo. (MOREIRA, 1942. P 153.)

A aprendizagem significativa de Ausubel oferece uma estrutura sólida para o ensino e a aprendizagem da física, enfatizando a importância de conectar novos conceitos com o conhecimento prévio dos alunos, utilizando analogias, atividades práticas e discussões para

promover uma compreensão mais profunda e duradoura. Vejamos o que MOREIRA (1942) nos diz a respeito da importância dos conhecimentos prévios na física.

Em Física, por exemplo, se os conceitos de força e campo já existem na estrutura cognitiva do aluno, eles servirão de subsunçores para novas informações referentes a certos tipos de força e campo como, por exemplo, a força e o campo eletromagnéticos. Entretanto, este processo de “ancoragem” da nova informação resulta em crescimento e modificação do conceito subsunçor. Isso significa que os subsunçores existentes na estrutura cognitiva podem ser abrangentes e bem-desenvolvidas, ou limitados e pouco desenvolvidos, dependendo da frequência com que ocorre aprendizagem significativa em conjunção com um dado subsunçor. (MOREIRA, 1942, p. 153.)

Um aspecto crucial da aprendizagem significativa é a organização do material em uma hierarquia de ideias, na qual os conceitos mais gerais e abstratos estão no topo, e os conceitos mais específicos e concretos estão abaixo. Essa organização facilita a compreensão e a retenção do conteúdo, pois os novos conceitos são ancorados em uma base sólida de conhecimento prévio.

De acordo com David Ausubel, vejamos as condições para ocorrer a aprendizagem significativa.

Segundo Ausubel (1978, p.41) “a essência do processo aprendizagem significativa é que ideias simbolicamente expressas sejam relacionadas de maneira substantiva (não-literal) e não arbitrária ao que o aprendiz já sabe, ou seja, a algum aspecto de sua estrutura cognitiva especificamente relevante para a aprendizagem dessas ideias. Este aspecto especificamente relevante pode ser, por exemplo, uma imagem, um símbolo, um conceito, uma proposição, já significativo.” Portanto, uma das condições para a ocorrência da aprendizagem significativa é que o material a ser aprendido seja relacionável (ou incorporável) a estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não arbitrária e não literal. (MOREIRA, 1942. p 155 e 156.)

Assim, os novos conceitos devem ser relevantes e significativos para o aluno, conectando-se com suas experiências, interesses e necessidades pessoais. A aprendizagem significativa baseia-se no conhecimento prévio do aluno, como vimos, os novos conhecimentos são mais facilmente assimilados quando relacionados de forma significativa com conceitos já existentes na estrutura cognitiva do aluno. Além disso, o novo material de aprendizagem deve ser organizado de maneira clara e hierárquica, onde os novos conceitos devem ser integrados em uma estrutura cognitiva existente, formando uma rede de informações interconectadas e coerentes. Os alunos devem estar motivados e engajados no processo de aprendizagem para que ela seja significativa. Isso pode ser alcançado por meio da apresentação de conteúdos interessantes, desafiadores e relevantes.

A teoria de Ausubel, como foi dito na introdução, focaliza a aprendizagem cognitiva ou, mais especificamente, a aprendizagem significativa. De maneira ainda mais específica poder-se-ia dizer *aprendizagem verbal significativa receptiva*. *Verbal*, porque Ausubel considera a linguagem como importante facilitador de aprendizagem significativa. (MOREIRA, 1942. p 163.)

Ao abordar a Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein com alunos do ensino médio, a aplicação dos princípios da aprendizagem significativa de David Ausubel torna-se

essencial para promover uma compreensão profunda e duradoura deste conceito complexo. A aprendizagem significativa exige que os alunos não apenas absorvam informações, mas também as integrem de maneira coerente com seu conhecimento prévio, promovendo uma compreensão genuína e uma conexão pessoal com o assunto.

Ao explorar a Teoria da Relatividade Geral em sala de aula, os educadores podem destacar sua relevância para o mundo real e para a compreensão do universo. Isso pode ser feito através de analogias simples, exemplos práticos e discussões que relacionam os conceitos de relatividade com a experiência diária dos alunos. Por exemplo, discutir como a gravidade influencia o tempo e o espaço pode ser ilustrado com exemplos cotidianos, como o funcionamento do GPS ou o fenômeno dos buracos negros.

Dessa forma, a abordagem da aprendizagem significativa de David Ausubel destaca a importância de conectar novos conhecimentos com o conhecimento prévio dos alunos, tornando a aprendizagem mais relevante, pessoal e duradoura. Ao promover uma compreensão profunda e contextualizada, essa abordagem não apenas aumenta a retenção de informações, mas também estimula o pensamento crítico, a resolução de problemas e a aplicação prática do conhecimento em diversas situações. Ao implementar os princípios da aprendizagem significativa em sala de aula, os educadores podem capacitar os alunos a se tornarem aprendizes mais autônomos, engajados e preparados para enfrentar os desafios do mundo moderno. Em última análise, a aprendizagem significativa não se trata apenas de adquirir informações, mas sim de construir um entendimento profundo e significativo do mundo ao nosso redor.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DE LITERATURA

O trabalho estruturou-se a partir da revisão bibliográfica sobre o tema: Abordando Conceitos Fundamentais da Teoria da Relatividade Geral no Terceiro Ano do Ensino Médio, tendo como palavra-chave de busca satisfação no trabalho.

A busca nas fontes supracitadas realizou-se com os termos: Uma proposta Teoria da Relatividade no Ensino Médio, Relatividade Geral no Ensino Médio. As publicações foram pré-selecionadas pelos títulos, os quais deveriam constar como critério o termo citado acima, acompanhando dos resumos disponíveis. Foram incluídas publicações somente em português que atendessem aos critérios que se trata o tema e os termos pesquisados. Em seguida foram excluídos artigos repetidos em diferentes bases de dados. Realizou-se uma pesquisa complementar no portal de periódicos da UFRGS LUME Repositório Digital e nas referências dos artigos selecionados com intuito de ampliar o campo de pesquisa. Ao final foram pré-selecionadas 13 obras entre artigos, dissertações, monografias e periódicos, resultantes das pesquisas nas bases e da pesquisa complementar para compor esta revisão. A partir da seleção dos trabalhos nesta pesquisa foi formado um grupo de obras que abordasse a temática desta pesquisa, Abordando Conceitos Fundamentais Sobre a Teoria da Relatividade Geral no Terceiro Ano do Ensino Médio. Dos 13 trabalhos que compõem a pesquisa foram selecionados 7 para leitura integral de suas obras, por conta da sua relevância.

Quadro 1. informações das obras de ensino da TRR e TRG no ensino médio

Tipo de obra	Autor (es) / Ano de publicação	Título da obra	Público Alvo	Tipo de produto didático
Artigo	Sampaio, W. S., Oliveira, A. N. de, & Siqueira, M. C. A. (2019).	As teorias da relatividade no ensino básico: uma revisão de literatura para traçar o perfil dos trabalhos publicados no Brasil entre 2000 e 2018	Docentes e leitores	Unidade didática sobre TRR e TRG
Artigo	Karam, R. A. S., Cruz, S. M. S. C. de S., & Coimbra, D. (2007).	Relatividades no ensino médio: o debate em sala de aula	1º ano do ensino médio	Sequência didática
Dissertação	Diego Rodrigues de Souza (2019)	Uma construção didática do conceito de espaço-tempo da teoria da relatividade restrita visando alfabetização	3º ano do ensino médio	Sequência didática

		científica no ensino médio		
Artigo	Ferreira, M., do Couto, R. V. L., da Silva Filho, O. L., Paulucci, L., & Monteiro, F. F. (2021).	Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral	3º ano do ensino médio	Sequência didática
Artigo	Ostermann, F., & Moreira, M. A. (2016).	Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”	Docentes e leitores	Unidade didática sobre FMC
Artigo	Almeida, J. R. de, & Soltau, S. B. (2022).	Filme Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio	3º ano do ensino médio	Plano de aula
Artigo	Wolff, J.F.S. & Mors P.M. (2006).	Relatividade no ensino médio uma experiência com motivação na história	3º ano do ensino médio	Sequência didática

Fonte: Autoria própria 2024.

2.1– ANÁLISE DAS OBRAS DE OUTROS AUTORES

No panorama da ciência, várias obras de renomados autores têm desempenhado um papel crucial na transformação de paradigmas e no avanço do conhecimento humano. No contexto do ensino de física, as contribuições de renomados autores têm desempenhado um papel fundamental na construção do conhecimento científico dos estudantes. Desde as teorias clássicas de Newton até as descobertas mais recentes sobre a natureza quântica do universo, obras de diversos autores têm moldado o modo como a física é ensinada e compreendida. O constante aprimoramento do ensino de física é vital para a formação de uma base sólida de conhecimento científico nos estudantes. No âmbito desta busca incessante por métodos e estratégias que promovam uma compreensão mais profunda e efetiva dentro do contexto de como ensinar física moderna e contemporânea para alunos do ensino médio. Farei a análise de algumas obras importantes que foram publicadas explorando o contexto da temática dessa dissertação.

Essas obras selecionadas para análise, ao meu ver, demonstram uma importância dentro do tema escolhido para essa pesquisa, tendo em vista que devemos ter um panorama dos trabalhos já publicado acerca da inserção da Teoria da Relatividade, seja ela a Especial ou a Geral.

Análise das obras será feita dentro dos seguintes aspectos: A contextualização e relevância, além impacto e conclusão.

A obra, “AS TEORIAS DA RELATIVIDADE NO ENSINO BÁSICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA PARA TRAÇAR O PERFIL DOS TRABALHOS PUBLICADOS NO BRASIL ENTRE 2000 E 2018” dos Autores, Wilton Souza Sampaio, Antônio Nunes de Oliveira, Marcos Cirineu Aguiar Siqueira é uma contribuição significativa para o campo de estudo relacionado as teorias da relatividade no ensino médio. Os autores abordam uma revisão de literatura dos trabalhos publicados no Brasil entre os anos 2000 e 2018 com profundidade, apresentando uma análise abrangente e perspicaz sobre inserção da teoria da relatividade no ensino médio.

A obra contextualiza de maneira eficaz um panorama dos trabalhos relevantes acerca da inserção da teoria da relatividade restrita e geral no ensino médio, permitindo ao leitor compreender a importância e a relevância do tema abordado. O autor demonstra uma compreensão aprofundada das variações e complexidades do campo de estudo, contribuindo significativamente para abrir um leque de informações sobre como o assunto é tratado no Brasil, o grau de atenção que é dado, além de mostrar as justificativas para inserir tópicos de relatividade no ensino básico, esta obra ainda descreve como é dada a atenção a Relatividade nos livros didáticos destinados ao ensino básico e as propostas de ensinar a Teoria da Relatividade.

Considerando as TR como avanços importantes para a humanidade, este trabalho traz uma revisão bibliográfica das principais pesquisas publicadas no Brasil durante as duas últimas décadas, no que se refere à divulgação ou ao ensino de aspectos a elas relacionados. A intenção é contribuir destacando as principais propostas que podem ser aplicadas e/ou implementadas nas salas de aula durante a Educação Básica e, a partir dos trabalhos já existentes, sugerir estratégias que possam nortear novas propostas nesse sentido. (SAMPAIO, OLIVEIRA, SIQUEIRA, 2018, p 47)

Este trabalho realizado pelo autor é de grande relevância no campo que envolve o ensino de física, pois nos dá uma visão de como a física moderna é tratada. No entanto vale ressaltar, que essa pesquisa buscou analisar obras no período de 2000 a 2018. De 2018 para os dias atuais, houve mudanças, inclusive com a implantação do novo ensino médio em 2022. O Novo Ensino Médio, implementado no Brasil, trouxe diversas mudanças na estrutura curricular, oferecendo maior flexibilidade e a possibilidade de os alunos escolherem itinerários formativos específicos. No entanto, os autores ressaltam a importância de a FMC estar presente na educação básica, como é destacado.

Visto que as TRR e TRG fornecem um modelo mais atualizado do universo, é muito importante dar continuidade ao desenvolvimento de trabalhos sobre o ensino desses conteúdos, de modo que a FMC esteja cada vez mais presente na Educação Básica. Mais que isso, é importante garantir que todas as publicações apresentadas possam tornar os professores conscientes da importância de ensinar TRR e TRG, fornecendo-lhes informações e indicando-lhes os materiais de apoio disponíveis no mercado. (SAMPAIO, OLIVEIRA, SIQUEIRA, 2018, p 53.)

Em suma, a obra dos Autores Wilton Souza Sampaio, Antônio Nunes de Oliveira, Marcos Cirineu Aguiar Siqueira representa uma valiosa contribuição para a compreensão do desafio de ensinar FMC no ensino médio, oferecendo informações valiosas e provocando reflexões críticas importantes sobre a inserção TRR e TRG, assim como outros tópicos de física moderna e contemporânea na educação básica. Seu impacto no campo de estudo permanece notável, embora convide à continuidade do debate e à exploração de novas direções para pesquisas futuras relacionado a temática.

Trabalhos futuros poderão propor alternativas para abordagem de tópicos específicos das TR, concomitantemente a determinados assuntos da FC. Uma alternativa, por exemplo, seria abordar o uso do cinto de segurança do ponto de vista de um observador interno ao veículo e justificá-lo usando como argumento o princípio de Equivalência da Relatividade Geral. (SAMPAIO, OLIVEIRA, SIQUEIRA, 2018, p 53.)

Assim, a obra analisada mostra como destaque o crescimento de trabalhos publicados relacionados a TRR e TRG, onde destacam também as limitações da Física Clássica para descrever o universo e as tecnologias contemporâneas presentes em nossas vidas, além do mais, os autores fazem um destaque a falta de preparo dos professores para trabalhar esses conteúdos, e dentro das obras analisadas pelos autores, foram encontrados materiais que pudessem ajudar os mesmo superar essas adversidades na docência.

A obra, “RELATIVIDADES NO ENSINO MÉDIO: O DEBATE EM SALA DE AULA” dos Autores, Ricardo Avelar Sotomaior Karam, Sonia Maria S.C. de Souza Cruz e Débora Coimbra. O trabalho que tem como um objetivo abordar conceitos da teoria da Relatividade Restrita no primeiro ano do ensino médio através de uma sequência didática, onde as discursões presentes nessa obra, está voltada, para os princípios da Relatividade, a importância de Galileu Galilei, Isaac Newton, assim como outras grandes mentes até chegar na Relatividade Einsteiniana. De acordo com, KARAM, CRUZ, COIMBRA, (2007).

Este trabalho talvez represente a mais célebre reflexão sobre o que é um movimento no espaço e sobre a possibilidade de demonstrar sua existência a partir de uma experiência sensível. A preocupação com a caracterização do estado de movimento e de suas causas esteve presente desde os pré-socráticos. Zenão de Eléia pretendeu demonstrar que o movimento é uma impossibilidade lógica, em seu paradoxo dos bastões. (KARAM, CRUZ, COIMBRA, 2007, p 106.)

Uma reflexão importante sobre a obra é a metodologia de como é conduzido o debate, trabalhando os conhecimentos já adquiridos pelos alunos sobre o movimento, e o contexto histórico até chegar em seu objetivo. Os autores descrevem esse debate divididos em seis

episódios que buscam demonstrar didaticamente as contrapartidas da física proposta por Newton para física de Einstein. Isso demonstra a preocupação dos autores com aprendizagem dos alunos. Essa obra traz uma grande contribuição para que possamos analisarmos a forma de como ensinamos nossos alunos, pois sabemos que uma metodologia diferenciada proporciona conhecimento para os alunos. Além do mais os autores descrevem as impossibilidades de detectar experimentalmente o movimento uniforme absoluto, abrindo um leque de informações nas cabeças dos alunos que serviram de conhecimentos prévios para uma possível abordagem da relatividade posteriormente. No entanto, de acordo com os autores, é necessário ter cuidado ao inserir os conceitos relacionados a movimento e suas causas.

Uma análise criteriosa da evolução histórica dos estudos sobre o movimento e suas causas, aponta para a necessidade de uma abordagem mais adequada do assunto nas aulas de física.(...) é fato, e qualquer levantamento dos currículos, ou visitas às aulas de física no ensino médio comprova que a cinemática é o tema com que a maioria dos professores iniciam seus cursos, e nela permanecem, às vezes, por mais de um ano, não ultrapassando, frequentemente, os exercícios pensados com a finalidade de fazerem os alunos praticarem as equações do movimento uniforme e uniformemente variado. (KARAM, CRUZ, COIMBRA, 2007, p 112.)

Dessa forma, a obra dos Autores Wilton Souza Sampaio, Antônio Nunes de Oliveira, Marcos Cirineu Aguiar Siqueira, tem uma representação significativa no que diz respeito a abordagem de novas metodologias eficazes para ministrar tópicos de física moderna e contemporânea, haja visto que mostrar os conceitos da física com uma nova perspectiva de ensino provoca no aluno a curiosidade e desperta uma visão mais crítica a respeito do mundo.

Muitos pesquisadores têm se dedicado a analisar as possibilidades de se inserir temas de Física Moderna e Contemporânea no currículo do ensino médio, há um bom tempo. Dentre estes, Resnik e Terrazzan têm defendido que a mesma não deve ser feita apenas no final do terceiro ano, após o eletromagnetismo, mas sim organicamente incorporada à apresentação e ao desenvolvimento das teorias clássicas. Dessa forma, uma discussão mais ampla sobre o princípio da relatividade de Galileu, enfatizando a impossibilidade de se detectar experimentalmente o movimento uniforme absoluto, pode contribuir para uma ênfase nos aspectos conceituais da física e servir também como uma porta de entrada para e abordagem de tópicos da relatividade. (KARAM, CRUZ, COIMBRA, 2007, p 113.)

Portanto, para inserir tópicos de FMC, devemos levar alguns fatores em conta, por se tratar de conceitos complexos e que exige um conhecimento prévio por partes dos estudantes, entretanto é válido exaltar toda a contextualização dessa obra e sua contribuição dentro do campo do ensino de física.

A obra, “UMA CONSTRUÇÃO DIDÁTICA DO CONCEITO DE ESPAÇO-TEMPO DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA VISANDO ALFABETIZAÇÃO CIENTÍFICA NO ENSINO MÉDIO” do Autor, Diego Rodrigues de Souza, mostrou dentro de seu objetivo ao fazer uma transposição didática para alunos do terceiro ano do ensino médio a respeito da Teoria da Relatividade Restrita, buscando transparecer o conceito de espaço-tempo e utilizando a ferramenta pedagógica WebQuest, que traduzindo ao pé da letra significa “busca

na net”. O autor busca inovar os processos metodológicos de ensinamento para que o aluno se sinta atraído pelo conhecimento, diante da pesquisa feita pelo autor, ao empregar essa metodologia na temática escolhida, obteve um êxito diante dos resultados obtidos, trazendo assim uma grande contribuição dentro do cenário educacional, como é descrito por ele.

Fundamentados nessa crença, criamos um material didático escrito com inspiração na Teoria da Transposição Didática (TTD) de Chevallard (1991) e em princípios elencados por Astolfi e Develay (1995) e uma atividade de *WebQuest*, que é uma tarefa de consulta orientada em que pelo menos parte do conteúdo buscado está na *internet*. Ambos compõem nosso produto educacional e servirão como suportes para a implementação de uma sequência de ensino inspirada no chamado ensino híbrido (BACICH et al., 2015), com o propósito de ensinar a moderna concepção de espaço-tempo a partir do processo de superação da física newtoniana pela Teoria da Relatividade Restrita (TRR) em uma expectativa de alfabetizar cientificamente. (SOUZA, 2019 p 17.)

Sabemos que trabalhar tópicos de Física Moderna no ensino básico é complexo, por inúmeros fatores, no entanto o autor descreve em seu trabalho que é possível trabalhar a Relatividade no ensino médio, no entanto se faz necessário o uso de uma ferramenta de aprendizagem significativa que possa preencher os vazios deixados por uma didática usada costumeiramente por muitos professores. De acordo com o autor, ele descreve assim diante dos objetivos alcançados.

Dessa maneira, acreditamos que os objetivos estabelecidos nessa dissertação foram completamente alcançados. Em consequência disso, houve o início de uma formação para que os indivíduos passassem a serem críticos diante de suas realidades, ainda que os objetivos da AC devessem ser tratados em sua amplitude desde o início do EM ou até mesmo no ensino fundamental. (SOUZA, 2019 p 72.)

Ao finalizar esta análise da obra, o autor, Diego Rodrigues de Souza, torna-se notável que estamos progredindo diante dos desafios que é ensinar tópicos FMC no ensino básico, tendo em vista que seja uma necessidade para que os alunos possam reconhecer os vastos conhecimentos por traz das teorias científicas que revolucionaram os campos da física. Além do mais essa obra traz uma grande contribuição dentro da sua temática abordada.

A obra, “ENSINO DE ASTRONOMIA: UMA ABORDAGEM DIDÁTICA A PARTIR DA TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL” dos Autores, Marcello Ferreira, Roberto Vinícius Lessa do Couto, Olavo Leopoldino da Silva Filho, Laura Paulucci, Fábio Ferreira Monteiro, aborda uma perspectiva de aprendizagem envolvendo o ensino de astronomia com a relatividade geral, embora desafiador, mas muito importante expor esses conceitos de Relatividade Geral usando a astronomia, uma ciência que despertar interesse e curiosidade dos alunos, como descreve os autores em sua obra.

A astronomia, uma das ciências mais antigas da humanidade, faz parte da curiosidade do senso comum e está entre os temas que mais despertam o interesse dos jovens na faixa de 15 anos de idade, o que corresponde ao público que tipicamente inicia o ensino médio no Brasil [1, 2]. Por ser um tema popular, e reconhecidamente fundante do pensamento científico moderno, diversos países a inserem em seus currículos de ciências. (FERREIRA, COUTO, FILHO, PAULUCCI, MONTEIRO, 2021 p 1)

O trabalho consiste, em abordar tópicos de gravitação universal e sistema solar, Relatividade Geral, buracos negros e lentes gravitacionais para alunos do terceiro ano do ensino médio, baseando na aprendizagem significativa de David Ausubel, ou seja, buscando explorar os conhecimentos prévios dos alunos adquiridos nos anos anteriores do ensino médio. O resultado do trabalho executado foi promissor, pois os alunos sentiram-se entusiasmado e interessados pelo tema que foi proposto pelos pesquisadores, onde os mesmos puderam conhecer um pouco sobre os fenômenos que envolve a TRG seu campo de atuação. A metodologia utilizada nessa obra é diversificada, buscando explorar o potencial referente a aprendizagem. Nas aulas propostas foram utilizados vários meios para que os alunos pudessem assimilar melhor a temática, como é colocado no trabalho.

As aulas apresentaram atividades diversificadas e a utilização de tecnologias educacionais (vídeos, demonstrações, simulações, etc.), despertando o entusiasmo e o interesse dos estudantes. A formação de comunidades de investigação permitiu que os estudantes se organizassem e se ajudassem durante realização das diversas estratégias didáticas (discussão dos textos de apoio, análise dos vídeos, imagens, simulações etc.). (FERREIRA, COUTO, FILHO, PAULUCCI, MONTEIRO, 2021 p 12)

Esse trabalho é de pouco tempo atrás (23/09/2021) nos dá um panorama das possibilidades de inserir tópicos avançados de FMC, como os temas atuais envolvendo a exploração espacial, buracos negros, gravidade e outros. Quando citamos esses conceitos, logo voltamos para Relatividade de Einstein, que tem uma fundamental importância nas explicações dos fenômenos envolvendo o universo. Dessa forma, é notório o quão importante é este trabalho para que possamos criar uma boa expectativa em relação a mudança curriculares no ensino médio, mesmo diante das dificuldades proposta pelo sistema educacional e a falta de infraestrutura em muitas escolas desse Brasil. Nas considerações finais, os autores ressaltam da seguinte maneira.

Em síntese, a articulação teórico-metodológica fundamentada em Lipman e Ausubel, para desenvolvimento de produto educacional acerca de tópicos de astronomia para o ensino médio, revelou potencial para estimular as habilidades de ordem superior dos estudantes e, ao mesmo tempo, promover aprendizagem significativa. Também sugeriu uma possibilidade para minimizar a precariedade do ensino de astronomia em condições típicas da educação pública, fornecendo aos estudantes uma alternativa de aprendizagem não limitada a um currículo desgastado e baseado em propostas metodológicas difusas. (FERREIRA, COUTO, FILHO, PAULUCCI, MONTEIRO, 2021 p 13)

Dessa forma, em resumo, este trabalho abre muitas possibilidades para que possamos inserir tópicos de FMC, mas especificamente de Relatividade na educação básica, por se tratar de conteúdos importantes, embora sejam complexos. No entanto, a pesquisa mostrou que é possível trabalhar esses conceitos usando metodologias diferenciadas com intuito de promover o ensino-aprendizagem dos alunos, além do mais essa obra tem uma grande relevância no cenário objetivado pelos autores.

A obra, “UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A ÁREA DE PESQUISA “FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO” dos Autores, Fernanda Ostermann e Marco Antonio Moreira, que se destaca por ter um vasto número de informações a respeito da Física Moderna e Contemporânea inserida na educação básica, os autores descrevem essa abordagem através de uma revisão de literatura, baseados em artigos, livros didáticos, dissertações, teses, entre outros. De acordo com OSTERMANN, MOREIRA (2016).

A presente revisão envolveu consulta a artigos em revistas, livros didáticos, dissertações, teses, projetos e navegações pela INTERNET, que abordam a questão da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no ensino médio. A pesquisa concentrou-se em publicações direcionadas ao ensino da Física e foi um importante subsídio para o desenvolvimento de uma pesquisa sobre o tema (Ostermann, 1999, 2000; Ostermann e Cavalcanti, 1999; Ostermann e Moreira, 1998, 1999; Ostermann et al, 1998 a e b). (OSTERMANN, MOREIRA 2016, p 23).

Este trabalho tem uma notoriedade e relevância muito grande, pois os autores demonstram preocupação com o ensino de física, principalmente com relação a FMC no ensino médio. Embora essa obra tenha uma edição de março de 2000, no entanto este trabalho foi publicado em 21/11/2016. Entretanto os desafios continuam os mesmos citados pelos autores, como, inserir tópicos de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, ter professores preparados para trabalhar esses tópicos com bastante cuidados para o que aluno possa se sentir atraído pelo ato de conhecer aquilo que é relativamente novo. Mas é notório que devemos ter cuidados ao inserir esses conceitos de FMC, tendo em vista que muitos alunos não se sintam interessados e poucos sabem da existência dessas teorias científicas. Note como os autores descrevem esses fatores abordados.

Para os autores, esta visão simplista com que a Física Moderna é ensinada nas escolas provoca sérias concepções alternativas. Através de um questionário respondido por 536 alunos, entre 16 e 18 anos, eles verificaram que a grande maioria ignorava a existência de uma crise no desenvolvimento da Física Clássica, desconhecia a diferença entre Física Moderna e Clássica e apresentava uma série de confusões conceituais sobre questões acerca da dualidade onda-partícula, equação de Einstein ($E = mc^2$), partícula elementar. (OSTERMANN, MOREIRA 2000, p 27).

A obra de Fernanda Ostermann e Marco Antonio Moreira, apresenta uma contribuição notável ao campo do ensino de física, abordando de maneira aguda e transparente os desafios e questões presentes na mudança curricular do ensino médio, dentro do contexto de inserir a FMC. Ao longo desta análise, pudemos destacar a meticulosidade com que os autores fundamentaram suas proposições, metodologias e objetivos, respaldando-as em evidências sólidas e procedimentos rigorosos para que o leitor pudesse obter o máximo de informações a respeito do tema abordados pelos.

Como conclusão deste artigo de revisão da literatura, seria interessante ressaltar que a maior concentração de publicações aparece na seção 5.1 (“apresentação de um tema de FMC”) em contraposição com as seções 4 (“concepções alternativas sobre FMC”) e 6 (“propostas testadas em sala de aula”). É possível que isto demonstre uma necessidade de amadurecimento da linha de pesquisa “FMC no ensino médio”. Parece que

há muitas justificativas em favor da atualização curricular e até uma bibliografia que apresenta (não tão aridamente como a literatura especializada) temas modernos. Entretanto, colocar todas estas reflexões na prática da sala de aula é ainda um desafio. (OSTERMANN, MOREIRA 2000, p 43).

Em conclusão, trabalhar esses conceitos de FMC no ensino médio é extremamente importante, pois ao longo dos anos nossas tecnologias estão se modernizando, e usar a física clássica para explicar esses fenômenos envolvendo essas tecnologias é difícil, e de certa forma impossível, no entanto para aplicar conceitos de FMC no ensino médio requer uma investigação didática de como inserir a contextualização por traz das teorias a serem abordadas.

A obra, “FILME INTERESTELAR E SALA DE AULA INVERTIDA: UMA PROPOSTA PARA ENSINAR RELATIVIDADE GERAL E BURACOS NEGROS NO ENSINO MÉDIO” dos Autores, Jamila Rodrigues de Almeida e Samuel Bueno Soltau, se destaca por abordar tópicos da Relatividade Restrita e Relatividade Geral através do entretenimento cinematográfico de filmes, é relevante fazer uma análise dessa obra porque ela utiliza o filme INTERESTELAR como uma ferramenta pedagógica para melhor edificar as teorias da RR e RG. O filme tem como produtor executivo o físico teórico norte-americano Kip Thorne, que acompanhou a produção do filme, assegurando que os efeitos especiais chegassem mais próximos das teorias científicas. Hoje vivemos na era das informações que são vinculadas e propagadas via internet, muitas informações que são fatos, embora haja muitas desinformações também. Alguns anos atrás foi divulgado a primeira foto real de um buraco negro, além da detecção das ondas gravitacionais, entre outras descobertas que despertam a curiosidade dos alunos, mas esses conceitos não são explorados no ensino médio da maneira que era pra ser por inúmeros fatores, entretanto cabe o professor se sobressair diante dessas mudanças dentro da ciência, como descreve o autor dessa obra.

Neste caso, cabe ao professor estar atento e aproveitar o interesse dos alunos para abordar os conceitos da Física Moderna e Contemporânea, como a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) e Geral (TRG) e a temática em torno dos Buracos Negros (BN) à medida que as oportunidades surgem. Assim como Salomão, Araújo e Mackendanz (2020), defende-se aqui, que a introdução de tópicos relacionados à Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio pode despertar/influenciar o interesse dos estudantes por conteúdos específicos da Física ou no ingresso em um curso de Física no Ensino Superior. (ALMEIDA, SOLTAU, 2022. p 2)

Essa obra se resume em uma proposta metodológica diferenciada para mostrar aos alunos conceitos de TRG, pois os autores em princípio selecionam os materiais a ser assistido, como no caso o filme em destaque, em seguida promover um debate, que servirá para tirar dúvidas, propor ideias, expor opiniões, e por fim, as realizações da atividade pós didática aplicada. Os autores abordam ainda os conceitos de aula invertida, embora seja relevante aplicar uma aula invertida com os alunos, mas, no entanto, o trabalho se trata de relatividade, uma

teoria complexa que requer muito cuidado ao ser transmitida para alunos do ensino médio. Mas, os autores ressaltam.

A metodologia da Sala de Aula Invertida foi proposta por Bergmann e Sams (2018) inicialmente com a finalidade de compartilhar com os alunos as aulas gravadas por seus professores para que eles assistissem antes do encontro na sala de aula e, usassem o restante do tempo para sanar dúvidas a respeito de conceitos que não foram compreendidos. A disseminação desta metodologia no meio acadêmico, culminou na expansão e diversidade dos materiais que poderiam ser disponibilizados como, textos de apoio, livros, filmes, vídeos do *Youtube*, *softwares*, experimentos etc. e, apesar de ser relativamente recente, tem ganhado espaço como método de ensino de diversas áreas do conhecimento pois, além de intuitiva pode ser aplicada no processo de ensino e de aprendizagem de qualquer conteúdo e em diferentes níveis de ensino (Moran, 2014). (ALMEIDA, SOLTAU, 2022. p 3)

Dessa forma, a obra mencionada acima, que busca inovar através de um plano de aula aplicada de forma invertida, para demonstrar a RR e RG requer uma atenção, pois sabemos da complexidade dos tópicos que relacionam a relatividade, mas devemos destacar que a obra tem uma grande importância ao buscar inserir as teorias da Relatividade Restrita e Geral usando um filme, para que os alunos pudessem interagir e compreender as teorias científicas por trás dos efeitos cinematográficos. Em suas considerações finais os autores abordam o objetivo da pesquisa e objetivo alcançado diante da proposta metodológica aplicada ao abordar conceitos de TRR e TRG no ensino médio.

Este trabalho teve por principal objetivo apresentar uma proposta que permitam inserir tópicos de Física Moderna no Ensino Médio com o objetivo de desenvolver com os alunos um estudo contextualizado que favoreça a compreensão dos conceitos relacionados à TRR, TRG e a temática em torno dos Buracos Negros. Para tanto, elaborou-se um plano de aula a partir da proposta de Bergmann e Sams (2018) para uma Sala de Aula Invertida que utiliza o filme *Interestelar*, entre outros recursos, tais como vídeos e textos, como ferramenta de ensino para abordar a temática proposta em turmas do terceiro ano do Ensino Médio. (...) Neste aspecto, a metodologia da Sala de Aula Invertida se mostrou adequada e compatível com o objetivo desta proposta e, em especial, o filme *Interestelar* atende às expectativas de introdução aos conceitos da Relatividade, mais que outras obras cinematográficas de ficção científica tendo em vista o cuidado dos produtores, diretores e consultores com a fidelidade à Ciência em seu enredo graças à supervisão e assessoria direta do físico e Prêmio Nobel Kip Thorne. (ALMEIDA, SOLTAU, 2022. p 7 e 8)

Diante do exposto, a obra analisada traz uma visão diferenciada para que possamos inserir esses tópicos importantes de Relatividade Restrita ou Relatividade Geral na educação básica, haja visto que os alunos absorveram muito bem os conceitos aplicados mediante a metodologia utilizada, a obra nos dar uma grande contribuição para alfabetizar cientificamente nossos alunos do ensino médio.

A obra, “RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO: UMA EXPERIÊNCIA COM MOTIVAÇÃO NA HISTÓRIA” dos Autores, Jeferson Fernando de Souza Wolff e Paulo Machado Mors, buscam mostrar a importância da teoria da Relatividade Restrita através do seu histórico conceitual para alunos do ensino médio, além de proporcionar uma motivação, eles transparecem essa transição da Física Clássica para a Física Moderna aos alunos. É necessário mostrar a

relevância do contexto histórico por trás de uma teoria que revolucionou a comunidade científica. De acordo com os autores, WOLFF, MORS (2005).

(...) é fundamental, hoje, que também sejam trabalhados, na escola, os conhecimentos gerados pelos físicos a partir do início do século vinte, denominados geralmente de Física Moderna e Contemporânea. O cotidiano gera novos desafios que, cada vez mais, requerem uma boa preparação do cidadão, incluindo-se aí uma noção das áreas científicas. Citando Pietrocola [5], *Hoje, ser Alfabetizado Científica e Tecnologicamente (ACT) é uma necessidade do cidadão moderno*. Consideramos que os conteúdos de Física Moderna e Contemporânea devem ser introduzidos já no ensino médio e, como ponto de partida, a Teoria da Relatividade Especial (Restrita) parece-nos uma boa opção, já que, historicamente, esta foi a precursora do que hoje chamamos de Física Moderna, mesmo já sendo, por alguns, considerada como parte da Física Clássica. (WOLFF, MORS 2005, p 49)

Os autores descrevem o relato da experiência de mostrar um material didático que abordassem conceitos da Teoria da Relatividade Especial com ênfase na história da mesma, mostrando as contribuições de outros cientistas até chegar no seu grande mentor, Albert Einstein.

Nessa obra, os autores utilizaram questionários antes e após da aplicação do material, com o objetivo de obter um panorama dos conhecimentos já adquiridos pelos alunos e o que foi assimilado por eles. Com esses questionários trará um diagnóstico importante na abordagem dos tópicos do referido tema. Os resultados descritos pelos autores, demonstram positividade, pois os alunos receberam os textos da pesquisa de forma que se sentiram à vontade para questionar e explorar os conceitos propostos. É possível sim aplicar os conceitos da TRR aos alunos do ensino médio, mas devemos levar em conta todo o conhecimento já adquirido por ele, inserir essa teoria abrirá um leque de informações na mente dos alunos. Conforme Rodrigues.

A inserção da TRR se funda basicamente em três aspectos: a mudança de padrão de raciocínio e interpretação da realidade aliada à abstração e sofisticação do pensamento, graças à concepção de tempo como uma quarta dimensão; a possibilidade dessa teoria servir de porta de entrada para outros tópicos da FMC e, finalmente, pela necessidade de abordagem de um tema tão presente na sociedade através da divulgação científica. (RODRIGUES, 2001).

Assim, a obra analisada busca mostrar com grande clareza os contextos históricos da TRR para alunos de escolar regular do ensino médio, enfatizando que se faz necessário que os professores tenham mais confiança em ministrar aula de FMC, ou até mesmo busquem se preparar para melhor transpor esses conhecimentos que são de grande importância para a sociedade. Além do mais os professores tem um importante papel na aplicação desse material, onde ele precisa saber os conhecimentos prévios dos alunos e auxiliar de forma que o processo de ensino-aprendizagem possa ocorrer naturalmente. O resultado dessa obra é visto de maneira positiva como descreve os autores.

O principal resultado deste projeto foi a verificação da possibilidade de se trabalhar no ensino médio a teoria da Relatividade Especial. O texto dos alunos, por nós desenvolvido, atendeu às necessidades dos estudantes. Claro que para a aplicação deste material é necessário que o professor conheça os subsunçores dos alunos e é

imprescindível que o professor interaja com eles de uma forma não-unilateral. (WOLFF, MORS 2005, p 56).

Portanto, a obra dos WOLFF, MORS (2005) tem um grande impacto no campo do ensino de física, e procura explorar novas perspectivas para inserir conceitos de FMC e, mais especificamente a Teoria da Relatividade Restrita no ensino médio. Assim, vemos novos horizontes para esse cenário da alfabetização científica no Brasil.

No ensino médio é importante mostrar os conceitos científicos das teorias relacionadas aos fenômenos da natureza, como é colocado pela BNCC (2018).

Na área de Ciências da Natureza, os conhecimentos conceituais são sistematizados em leis, teorias e modelos. A elaboração, a interpretação e a aplicação de modelos explicativos para fenômenos naturais e sistemas tecnológicos são aspectos fundamentais do fazer científico, bem como a identificação de regularidades, invariantes e transformações. Portanto, no Ensino Médio, o desenvolvimento do pensamento científico envolve aprendizagens específicas, com vistas a sua aplicação em contextos diversos. (BNCC, 2018, p 548.)

Uma competência importante citada pela BNCC (2018), mostra que os alunos devem reconhecer, avaliar e até mesmo debater se for o caso sobre a importância das teorias e comprovações científicas vinculadas a criação do universo.

Ao reconhecerem que os processos de transformação e evolução permeiam a natureza e ocorrem das moléculas às estrelas em diferentes escalas de tempo, os estudantes têm a oportunidade de elaborar reflexões que situem a humanidade e o planeta Terra na história do Universo, bem como inteirar-se da evolução histórica dos conceitos e das diferentes interpretações e controvérsias envolvidas nessa construção. (BNCC, 2018, p 556.)

Sabemos que a ciência tem seus limites, pois há muitas coisas a serem descobertas, e exploradas pela mesma. Mas a evolução da humanidade ao longo dos séculos está diretamente ligada à ciência, pois uma é diretamente proporcional a outra, se a ciência avança, consequentemente a humanidade evolui, para a BNCC (2018).

Se por um lado é fundamental avaliar os limites da ciência, por outro é igualmente importante conhecer seu imenso potencial. Ao realizar previsões (relativas ao movimento da Terra no espaço, à herança genética ao longo das gerações, ao lançamento ou movimento de um satélite, à queda de um corpo no nosso planeta ou mesmo à avaliação das mudanças climáticas a médio e longo prazos, entre outras), a ideia de se conhecer um pouco do futuro próximo ou distante pode fornecer alguns elementos para pensar e repensar sobre o alcance dos conhecimentos científicos. Sempre que possível, os estudantes podem construir representações ou protótipos, com ou sem o uso de dispositivos e aplicativos digitais (como *softwares* de simulação e de realidade virtual, entre outros), que possibilitem fazer projeções e avaliar impactos futuros considerando contextos atuais. (BNCC, 2018, p 556.)

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A teoria da relatividade, desenvolvida por Albert Einstein no início do século XX, revolucionou nossa compreensão do espaço, tempo e gravidade. Dividida em duas partes distintas, a Relatividade Restrita e a Relatividade Geral, essa teoria proporcionou uma visão mais profunda e precisa do universo, desafiando concepções previamente estabelecidas.

A Relatividade Restrita, formulada em 1905, introduziu conceitos fundamentais, como a dilatação do tempo e a contração do comprimento, sugerindo que as leis da física são as mesmas para todos os observadores inerciais. A famosa equação $E=mc^2$, que descreve a equivalência entre massa e energia, é um dos pilares desta teoria, destacando a interconversão entre ambas.

Já a Relatividade Geral, apresentada por Einstein em 1915, trouxe uma compreensão inovadora da gravidade. Em vez de interpretar a gravidade como uma força, a teoria propõe que a presença de massa e energia deforma o espaço-tempo ao seu redor, influenciando o movimento de objetos. Esta abordagem revolucionária trouxe novas previsões, como a curvatura da luz ao passar por campos gravitacionais intensos.

Ambas as teorias têm sido confirmadas por uma variedade de experimentos e observações, moldando a base da Física Moderna. A Relatividade de Einstein transcendeu o domínio acadêmico, impactando áreas como astronomia, GPS, e até mesmo nossa compreensão do cosmos em escalas cósmicas. Assim, a teoria da relatividade continua a inspirar e desafiar nossa visão do universo, promovendo uma compreensão mais profunda e precisa dos fenômenos que ocorrem no cosmo.

3.1- A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

A Teoria da Relatividade é um marco na física moderna, pois revolucionou a maneira ou a forma que vemos o universo e o espaço-tempo. Albert Einstein como seu principal mentor mostrou que essa teoria tem uma gama de aplicações, seja para comunidade científica ou até mesmo utilizada no nosso cotidiano.

Para CARUSO; OGURI (2016) é praticamente impossível dissociar a história da física da história do conceito de espaço. Essa afirmação é particularmente verdadeira ao se olhar para gênese da Teoria da Relatividade.

Historicamente, destacam-se as contribuições de Aristóteles, Newton e Einstein, que conseguiram definir de forma clara, coerente e operacional o que é espaço. De certo modo, pode-se dizer que todos os outros trabalhos sobre esse conceito basilar da física são comentários às obras desses três. No entanto, o que se gostaria de enfatizar é que, guardada as devidas diferenças em cada período histórico, a questão do movimento sempre esteve presente ou no centro das principais críticas a uma dada concepção espacial ou na base da reestruturação do próprio conceito de espaço. (CARUSO; OGURI, 2016, p 181)

Deste modo, antes da Teoria da Relatividade ganhar destaque perante comunidade científica, ela percorreu uma linha do tempo que inicia com Aristóteles indo até Albert Einstein, uma das mentes revolucionárias da física naquela época, e até mesmo na fase contemporânea (dias atuais) da física. No final do século XIX, os cientistas da época acreditavam que não havia mais nada a ser descoberto, ou seja, tudo até ali encontrado, já não tinha mais nada para ser explorado. Assim destacado por LIMA (2009).

Até o final do século XIX pensava-se que todas as leis da física já tinham sido descobertas. As leis de Newton pareciam descrever todos os detalhes do movimento de um corpo, e as equações de Maxwell pareciam descrição completa para os fenômenos eletromagnéticos. Entretanto, logo no início do século XX, vários trabalhos desenvolvidos, por Max K.E.L. Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Louis V.P. Raymond de Broglie e outros, levaram a elaboração de duas teorias. Uma teoria para explicar comportamento de objetos que se movem com grandes velocidades, denominada de Teoria da Relatividade, e uma teoria da aplicada a partículas microscópicas, denominada de Teoria Quântica. (LIMA,2009, p. 7).

Um dos pressupostos que acarretou nas mudanças em alguns conceitos importantes da física, foram as chamadas “As duas nuvens de Lord Kelvin” assim descrita por CARUSO; OGURI (2016).

No clima de virada do século XIX para XX, em uma conferência proferida em 27 de abril de 1900, Lord Kelvin, partidário da visão mecanicista, afirmou que no céu azul da Física Clássica só existiam duas pequenas nuvens: o problema da não-detecção do vento *éter* e o problema da partição de energia.

Esse é um exemplo notável, na qual a presunção se mistura à perspicácia. Talvez estimulado pelo espírito de que o fim do século marca o fim de muita coisa, Lord Kelvin, por um lado, apontou que o conjunto de teorias que se convencionou chamar de Física Clássica, dava conta de praticamente todos os fenômenos observados e, por outro lado, foi capaz de identificar exatamente os dois problemas mais importantes de sua época, dos quais tiveram origem duas grandes revoluções científicas.

A dissipação dessas duas nuvens foi o ponto de partida de uma mudança radical de conceitos na Física, que resultou na construção e criação das teorias *quânticas e relativísticas*. Conceitos como *espaço tempo, tempo, simultaneidade, energia, massa, trajetória, partícula, interação e vácuo* foram revistos à luz dessas novas teorias. Utilizando uma terminologia atribuída ao filósofo francês Gaston Bachelard, houve, nesse momento, um corte epistemológico na Ciência, ou seja, os novos resultados não podiam mais ser explicados pelas velhas teorias e os antigos paradigmas kuhnianos tiveram que ser revistos. (CARUSO; OGURI, 2016 p 183).

A referência que Lord Kelvin teve sobre esse éter foi decorrente de um experimento que ficou famoso e conhecido como “Experimento de Michelson e Morley” realizado por Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley, ambos norte-americanos. Na qual o experimento não foi bem sucedido pela não comprovação da existência do éter. Assim descreve RESNICK (1968) sobre uma das tentativas para modificar a eletrodinâmica.

Uma interpretação possível do resultado de Michelson e Morley (aquele que contradiz o princípio da Relatividade clássica) é que a velocidade da luz tem o mesmo valor em todos os sistemas inerciais. Se isto fosse assim, então a velocidade da luz, certamente não poderia depender da velocidade da fonte luminosa relativa ao seu observador. Portanto, uma modificação do Eletromagnetismo que se sugere por si só, se desejamos evitar o princípio da invariância da velocidade da luz como a interpretação correta dos resultados de Michelson e Morley, é admitir que a velocidade de uma onda de luz é ligada ao movimento da fonte, ao invés de a um éter. As várias teorias que estão

baseadas nesta suposição, são chamadas teorias de emissão. Comum a todas elas são a hipótese de que a velocidade da luz é c em relação a fonte original, e que a velocidade é independente do estado do movimento do meio que transmite a luz. Isto automaticamente, explicaria o resultado nulo da experiência de Michelson e Morley. (RESNICK, 1968, p. 37).

Fazendo um arremate a respeito do experimento de Experimento de Michelson e Morley, RESNICK (1968) faz uma descrição da seguinte forma.

A experiência de Michelson e Morley usando uma fonte extraterrestre foi executada por R. Tomaschek, que usou a luz da estrela, e D.C. Miller, que usou a luz do sol. Se a velocidade da fonte (devido aos movimentos de rotação e translação relativos ao interferômetro) afetasse a velocidade da luz, nós observaríamos complicadas variações da franja. Tais efeitos não foram observados em nenhuma das experiências. (RESNICK 1968, p. 38).

Para a tristeza de Michelson e Morley e boa parte dos cientistas da época, o experimento não foi um sucesso, pois os resultados obtidos foram negativos dentro do contexto proposto por eles. Entretanto, apesar do experimento não ter ocorrido como esperado, ele serviu como base para o aperfeiçoamento da Teoria da Relatividade. Note o que é descrito por TIPLER; LLEWELLYN (2017).

Em um contexto mais amplo, com base neste e em outros experimentos, devemos concluir que as equações de Maxwell estão corretas e que a velocidade das ondas eletromagnéticas é a mesma em todos os referenciais inerciais, independentemente do movimento da fonte em relação ao observador. Essa invariância da velocidade da luz para os referenciais inerciais significa que deve haver algum princípio de relatividade que se aplique tanto à mecânica quanto ao eletromagnetismo. Tal princípio não pode ser o da relatividade newtoniana, que leva a uma variação da velocidade da luz com a velocidade relativa entre a fonte e o observador. Isso significa que a transformação de Galileu não está correta e deve ser substituída por uma nova transformação de coordenadas que assegure a invariância das leis do eletromagnetismo. As leis fundamentais da mecânica, que eram compatíveis com a transformação de Galileu, devem ser modificadas para que permaneçam invariantes ao serem submetidas à nova transformação. A dedução teórica dessa nova transformação foi uma das pedras fundamentais da teoria da relatividade especial de Einstein. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 30).

Apesar das transformações de Galileu e a mecânica de Newton apresentarem falhas para o princípio da Relatividade, elas têm suas aplicações usadas até hoje, como é destacado por GAZZINELLI (2009).

Esse sistema permaneceu válido, com imenso sucesso, até o início do século XX e, com alguma restrição, [...] é utilizado até hoje. A quase totalidade de mecânica planetária e a mecânica de foguetes, satélites artificiais e corpos macroscópicos na terra podem ser realizados com esse sistema de leis. (GAZZINELLI, 2009, p. 7).

Uma transformação que teve bastante relevância e serviu como base para Teoria da Relatividade proposta por Albert Einstein, é chamada de Transformação de Lorentz, desenvolvida por Hendrik Antoon Lorentz. MELINA (2013) fazendo um destaque sobre essa importante transformação.

Os postulados de Einstein eram incompatíveis com as transformações galileanas, incorrendo na existência de uma transformação que se adequasse ao eletromagnetismo. Foi em 1904 que a H. A. Lorentz descobriu uma transformação que deixava inalterada a forma das equações de Maxwell, desde que se alterassem também as componentes dos campos. Lorentz, no entanto, não descobriu as consequências transcendentais da relatividade, visto ainda acreditar na existência do

éter. As *Transformações de Lorentz consistiam nas* equações corretas para um referencial inercial linha que se desloca com módulo da velocidade v no eixo x em relação a um outro referencial inercial sem linha[...]. (MELINA, 2013, p. 37 a 38).

Com esse achado matemático de Lorentz, as equações se encaixaram, onde as mesmas não violaram princípios da relatividade e eletromagnetismo. Lorentz muitas das vezes não é citado da forma que era pra ser citado em biografias, tendo em vista que teve um papel importante para a formulação dessa teoria que carrega o nome do Einstein. Apesar de Albert Einstein citar as contribuições de Lorentz e Poincaré.

Vejamos os arranjos matemáticos e conceituais acerca dessas transformações, de acordo com CARUSO; OGURI (2016) admite que o princípio da relatividade fosse válido também, para o Eletromagnetismo, Lorentz deduz as equações que relacionam as coordenadas, espaço-tempo de um ponto do espaço, segundo os dois sistemas de coordenadas cartesianas S e S' [...] em referenciais inerciais distintos, em vez das transformações de Galileu; as chamadas transformações de Lorentz:

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \gamma(V) (x - Vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma(V) (t - Vx/c^2) \end{array} \right. \iff \left\{ \begin{array}{l} x = \gamma(V) (x' + Vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma(V) (t' + Vx'/c^2) \end{array} \right. \quad (1)$$

onde $\gamma(V) = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \geq 1$ é denominado fator de Lorentz.

As transformações de Lorentz subentendem que:

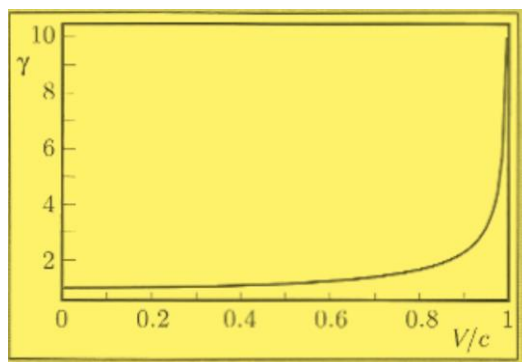
- Se T e T' são as medidas das durações de um mesmo evento, segundo os sistemas S e S' , mas ocorrido em um mesmo ponto segundo um observador em S' ,

$$T = \gamma(V)T' \text{ (dilatação temporal)} \quad (2)$$

- Se l e l' são as medidas dos comprimentos de um mesmo objeto segundo, os sistemas S e S' , mas em repouso segundo um observador em S' . A figura 1 representa o fator de Lorentz.

$$l = \frac{l'}{\gamma(V)} \text{ (contração do comprimento)} \quad (3)$$

Figura 1. Fator de Lorentz



Fonte: (CARUSO; OGURI, 2016, p 190)

Assim, segundo as transformações de Lorentz, as medidas dos intervalos de tempo e de comprimento dependem do referencial, ou seja, do observador, ao contrário do admitido nas transformações de Galileu.

Por outro lado, analisando o comprimento do fator de Lorentz com a mesma velocidade (figura 1.0), para que esses efeitos sejam observados é necessário que a magnitude da velocidade (V) de um referencial em relação ao outro seja igual a uma fração apreciável da velocidade da luz, caso contrário, o fator de Lorentz tende à unidade.

$$V/c \rightarrow 0 \longleftrightarrow c \rightarrow \infty \implies \gamma(V) - 1 \text{ (limite clássico)}$$

Nesse limite clássico, todos os resultados de uma teoria relativística condicionada pelas transformações de Lorentz se igualam aos das teorias clássicas, para as quais são válidas as transformações de Galileu. (CARUSO; OGURI, 2016, p.190)

Dessa forma, a Teoria da Relatividade ganhou grande repercussão na comunidade científica. Vejamos o que diz TIPLER; LLEWELLYN (2017) a respeito da Teoria da Relatividade de Einstein.

Em 1905, com 26 anos, Albert Einstein publicou vários artigos, entre os quais um sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Neste ele propôs um princípio de relatividade mais abrangente, que se aplicava tanto às leis da mecânica quanto às leis da eletrodinâmica. Uma das consequências desse princípio é que não existe nenhum experimento capaz de detectar o movimento absoluto. Sendo esse o caso, nada nos impede de supor que a Terra e o interferômetro de Michelson estão em repouso, caso em que nenhum deslocamento das franjas é esperado quando o interferômetro gira em torno de 90° , já que todas as direções são equivalentes. O resultado nulo do experimento de Michelson-Morley se torna, portanto, uma consequência natural do princípio da relatividade de Einstein. É preciso ressaltar que Einstein não formulou essa teoria com o intuito de explicar o experimento de Michelson-Morley, mas foi levado a ela por considerações a respeito da teoria da eletricidade e do magnetismo e das propriedades incomuns das ondas eletromagnéticas no espaço livre. No primeiro artigo, que contém a teoria completa da relatividade restrita, Einstein se refere, apenas de passagem, às tentativas experimentais de detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Mais tarde, afirmou não lembrar se estava a par dos detalhes do experimento de Michelson-Morley quando propôs a teoria. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 30)

Apesar dos artigos acerca da Teoria da Relatividade serem publicados em 1905, Einstein já vinha amadurecendo a ideia ao longo dos anos anteriores, com muito trabalho e sua genialidade.

De certo modo, a essência da Teoria da Relatividade não é tanto a relativização dos conceitos de espaço e tempo, mas, sim a reafirmação de que as leis da natureza devem ser independentes de referenciais. É essa a base do espaço-tempo. (CARUSO; OGURI, 2016, p.191).

Depois de ter revisado, de ter feitos inúmeros cálculos, Einstein expõe dois postulados que são o apoio de sua teoria.

A teoria da relatividade restrita se baseia em dois postulados que Einstein menciona explicitamente no artigo de 1905:

Postulado 1. As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

Postulado 2. A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor c , qualquer que seja o movimento da fonte. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 30)

Onde $c = 299792458$ m/s que não depende do estado do movimento de quem está emitindo para quem está observando.

O Postulado 1 é uma extensão do princípio da relatividade newtoniana para incluir todos os fenômenos físicos, não só os mecânicos, mas também os eletromagnéticos. Uma consequência direta dele é que não existe nenhum referencial inercial privilegiado e, portanto, o movimento absoluto é impossível de se detectar. O Postulado 2 descreve uma propriedade comum a todas as ondas. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 30)

Vejamos o que diz TIPLER; LLEWELLYN (2017) a respeito da simultaneidade e a relatividade. Veremos que a simultaneidade se refere a um conceito relativo.

Os postulados de Einstein levam a algumas previsões a respeito dos resultados de medidas feitas por observadores situados em diferentes referenciais inerciais que, a princípio, parecem estranhas ou mesmo absurdas, mas foram comprovadas experimentalmente. Na verdade, quase todos os supostos paradoxos podem ser explicados se reconhecermos que os postulados da relatividade restrita são compatíveis com a *relatividade da simultaneidade*, segundo a qual Dois eventos que são simultâneos em um referencial não são simultâneos em outro referencial inercial que esteja se movendo em relação ao primeiro. Um corolário da afirmação anterior é o seguinte: Dois relógios que estão sincronizados em um referencial não estão sincronizados em outro referencial inercial que esteja se movendo em relação ao primeiro. O que queremos dizer com eventos simultâneos? Suponha que dois observadores, ambos situados no referencial S , um no ponto A e outro no ponto B , tenham combinado fazer explodir bombas no instante t_0 (lembre-se de que os relógios de S estão sincronizados). O relógio que se encontra no ponto C , equidistante de A e de B , registra a chegada da luz proveniente das duas explosões no mesmo instante. Outros relógios de S registrarão primeiro a chegada da luz emitida pela bomba que explodiu em A ou em B , dependendo da localização, mas, depois de corrigidos para levar em conta o tempo de percurso da luz, os dados registrados por todos os relógios indicarão que as duas explosões foram simultâneas. *Vamos, portanto, definir dois eventos como simultâneos em um referencial inercial se os sinais luminosos associados a eles forem vistos simultaneamente por um observador situado em um ponto equidistante dos dois eventos, de acordo com a indicação de um relógio situado na posição desse observador, que recebe o nome de relógio local.* (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 33 a 34)

Dessa forma a construção da Teoria da Relatividade Restrita marcou um ponto de inflexão na física, desafiando conceitos clássicos e introduzindo uma nova compreensão do espaço

e do tempo. Desenvolvida por Albert Einstein em 1905, a teoria se fundamenta na constância da velocidade da luz e na relatividade dos referenciais inerciais, propondo que as leis da física são as mesmas para todos os observadores. Ao integrar o espaço e o tempo em uma única entidade, o espaço-tempo, a Relatividade Restrita revolucionou a forma como percebemos o universo, influenciando profundamente a física teórica e experimental.

3.2– A TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

Imagine-se viajando pelo espaço-tempo de uma forma que desafia completamente nossa intuição sobre o universo. Essa teoria, concebida por Albert Einstein, é como um passeio emocionante pelos conceitos mais selvagens e fascinantes da física.

Aqui, esquecemos as ideias tradicionais de gravidade como uma força misteriosa que atrai objetos. Em vez disso, Einstein nos convida a pensar na gravidade como a dança do espaço e do tempo, onde a presença de massa e energia curva o tecido do universo. É como se a realidade fosse um trampolim cósmico, e os corpos celestes são artistas que moldam sua forma. A Relatividade Geral não apenas desafia nossas noções de gravidade, mas também nos leva a explorar mundos de distorção temporal e viagens cósmicas. Imagine um relógio em movimento que realmente marca o tempo de forma diferente do que outro em repouso! Parece loucura, mas é a magia da dilatação do tempo, um conceito que a relatividade geral nos apresenta.

Então, prepare-se para embarcar nessa jornada onde as estrelas não são apenas pontos brilhantes no céu, mas arquitetas que esculpem o próprio tecido do espaço. A Relatividade Geral é uma celebração da imaginação e uma revolução na forma como entendemos a física do universo. Vamos abordar alguns conceitos relevantes na Relatividade Geral, como Princípio da Equivalência, a Curvatura da Luz na Presença de um Campo Gravitacional, a Dilatação Gravitacional do Tempo, o Desvio Gravitacional para o Vermelho, a Curvatura do Espaço-Tempo, Avanço do Periélio de Mercúrio, e os Buracos Negros e o Tempo.

3.2.1– VETORES

Os vetores são fundamentais na física porque muitas quantidades físicas são vetoriais, ou seja, possuem magnitude e direção. Os vetores são ferramentas matemáticas indispensáveis na física, permitindo uma descrição completa e precisa de fenômenos naturais e facilitando a resolução de problemas complexos. Para GAZZINELLI (2009).

É bem conhecida a simplificação que se obtém no tratamento matemático das leis da física com a introdução da representação vetorial. Essa simplificação resulta em parte da concisão: três equações, correspondentes às projeções nos três eixos de coordenadas, são substituídas por apenas uma equação vetorial. A principal vantagem, no entanto, é que a formulação de uma lei física em termos de vetores é independente da escolha do sistema de coordenadas. (GAZZINELLI 2009, p 81).

Para o formalismo vetorial tomaremos como base referencial o está proposto por GAZZINELLI (2009), onde ela descreve o deslocamento $\Delta \mathbf{r} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ que liga dois

pontos no espaço euclidiano como protótipo. Sob uma operação de translação do sistema de eixos de coordenadas, as componentes de $\Delta \mathbf{r}$ permanecem as mesmas e, sob uma operação de rotação, elas se transformam como as próprias coordenadas, dessa forma o formalismo matemático nas próprias coordenadas é descrita:

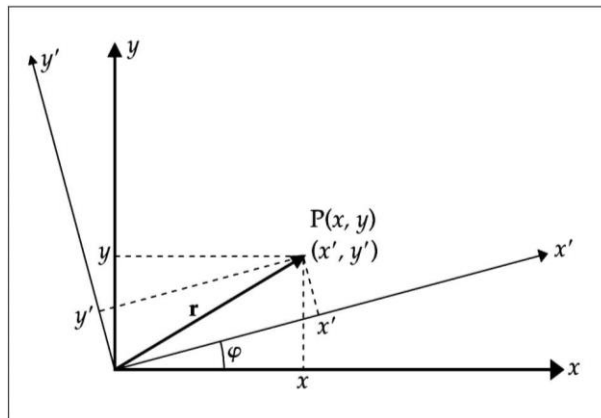
$$\begin{aligned}\Delta x' &= \alpha_{11}\Delta x + \alpha_{12}\Delta y + \alpha_{13}\Delta z, \\ \Delta y' &= \alpha_{21}\Delta x + \alpha_{22}\Delta y + \alpha_{23}\Delta z, \\ \Delta z' &= \alpha_{31}\Delta x + \alpha_{32}\Delta y + \alpha_{33}\Delta z,\end{aligned}\tag{4}$$

Onde os α representam as funções dos ângulos da rotação, para uma de ângulo φ em torno do eixo $0z$ a transformação é dada da seguinte forma GAZZINELLI (2009):

$$\begin{aligned}\Delta x' &= \Delta x \cos\varphi + \Delta y \sin\varphi, \\ \Delta y' &= \Delta y \cos\varphi - \Delta x \sin\varphi, \\ \Delta z' &= \Delta z\end{aligned}\tag{5}$$

A figura 2 representa a transformação do vetor posição nesse caso.

Figura 2. Transformação do vetor posição \mathbf{r} por uma rotação φ em torno do eixo z do sistema de coordenadas.



Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 82).

Agora, de acordo com GAZZINELLI (2009), podemos definir assim o vetor no espaço euclidiano de três dimensões.

Qualquer grandeza cujas componentes v_1, v_2, v_3 sofrem as mesmas transformações que as componentes $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ do deslocamento, sob as operações de translação e rotação do sistema de coordenadas, é um vetor. É óbvia a representação de um deslocamento por um segmento de reta, com sentido definido, que une seus pontos inicial e final, e é essa a razão por que podemos representar o vetor por uma flecha. (GAZZINELLI 2009, p 82)

3.2.2– EVENTOS E INTERVALOS NO FORMALISMO DO ESPAÇO-TEMPO

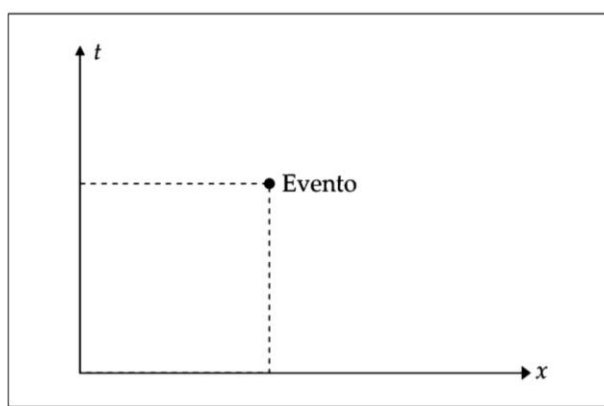
De acordo com GAZZINELLI (2009), A transformação geral de Lorentz é o conjunto de operações formado pela translação, a rotação e a TL definida pelas Equações da sessão 3.3 dessa referência que trata da contração do comprimento formalizado por Lorentz, onde as

equações da física clássica forem escritas em forma vetorial, elas serão independentes do sistema de coordenadas escolhido.

Pretendemos procurar um formalismo no qual as equações da TRE sejam formalmente invariantes sob a transformação geral de Evento Lorentz, da mesma forma que as equações da física clássica eram independentes do sistema de coordenadas quando escritas em forma vetorial. É claro que nesse formalismo procurado, as equações da TRE poderão ser escritas sem referência a um sistema de coordenadas específico
Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 82).

Minkowski introduziu, pouco depois da publicação da teoria da relatividade, a ideia de espaço-tempo, fundindo em uma só entidade o espaço e o tempo. GAZZINELLI (2009).

Figura 3. Um evento no espaço-tempo é definido pelas quatro coordenadas (x, y, z, t) e representado por duas coordenadas apenas: uma espacial x e a temporal t .

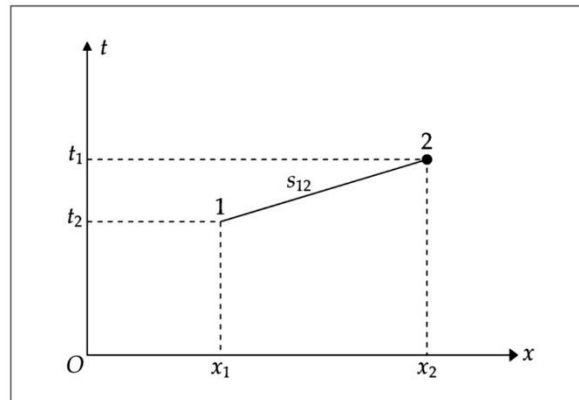


Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 82)

Vejamos as palavras descritas por Minkowski a respeito da união do Espaço e do Tempo é um importante evento.

Já em 1908, num importante congresso científico realizado em Colônia, na Alemanha, dizia ele: “As concepções de espaço e do tempo que desejo apresentar aos senhores brotaram do solo da física experimental e nisso reside sua força. De agora em diante, o espaço, por si mesmo, e o tempo, por si mesmo, estão destinados a desaparecer como meras sombras e somente uma espécie de união dos dois sobreviverá como realidade independente”. Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 82).

Definimos como evento um fenômeno físico localizado no espaço e no tempo. Por simplicidade, vamos nos referir ao evento pelas três coordenadas espaciais do ponto onde ocorre e pelo instante de tempo em que ocorre: (x, y, z, t) . O mesmo evento é descrito em outro referencial pelas coordenadas (x', y', z', t') , GAZZINELLI (2009). A figura 4 representa a visualização de um evento utilizando as coordenadas espaciais $(x, y$ e $z)$ e uma temporal (t) .

Figura 4. Intervalo S_{12} entre os 1 e 2.

Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 83).

O intervalo S_{12} entre dois eventos no referencial R é definido pela relação:

$$S_{12}^2 = c^2 (t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta l^2 \quad (6)$$

Onde $c\Delta t$ é a separação temporal, e Δl a separação espacial de ambos os eventos (Figura 4). Na forma diferencial, podemos obter essa relação através de:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = c^2 dt^2 - dl^2 \quad (7)$$

Para essa analogia o espaço não é mais estritamente euclidiano, pelo fato haver termos negativos na expressão de ds^2 . O intervalo entre a emissão de um pulso de luz na origem (0,0,0,0) do referencial R e sua recepção no ponto (x, y, z, t) é dado por, GAZZINELLI (2009).

$$s^2 = c^2 (t_2 - 0)^2 - (x_2 - 0)^2 - (y_2 - 0)^2 - (z_2 - 0)^2 = c^2 t^2 - (x^2 + y^2 + z^2)$$

Mas a equação da frente de onda esférica do pulso de luz que parte da origem é:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2 \text{ e } c^2 t^2 - (x^2 + y^2 + z^2) = 0 \quad (8)$$

Então $s^2 = 0$ e, portanto, s é uma grandeza escalar, independente, portanto, do referencial inercial – s é um *absoluto*.

Dizemos que uma grandeza é um *absoluto quando é um invariante de Lorentz*; uma grandeza escalar é sempre um invariante de Lorentz. Uma proposição mais geral, que pode ser demonstrada facilmente tem pelo leitor, é que o intervalo S_{12} entre dois eventos quaisquer é um absoluto, isto é, tem o mesmo valor calculado por qualquer observador inercial. Isso nos permite dizer que o *espaço-tempo é absoluto*, apesar de serem relativos o espaço e o tempo. (GAZZINELLI 2009, p 83).

3.2.3– O MODELO DO BIG BANG E O CONE DE LUZ

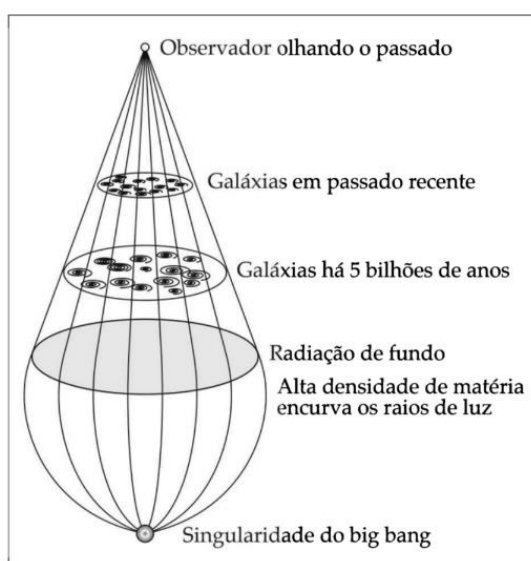
A teoria do Big Bang é até então o modelo científico mais aceito pela comunidade científica para explicar a origem do universo.

De acordo com o *modelo padrão do big bang*, o universo originou-se, há cerca de 12 a 15 bilhões de anos, de um estado extraordinariamente denso e quente e, desde então, de acordo com a teoria da relatividade geral (TRG), expande-se e resfria. Existem

evidências fortes a favor desse modelo: a recessão das galáxias e a radiação de fundo, remanescente do estado inicial. A conjectura de uma explosão inicial – para a qual não há evidências firmes – não é necessária ao modelo do big bang, que procura descrever apenas como o universo evolui e não sua origem. (GAZZINELLI 2009, p 86).

Para GAZZINELLI (2009) se, de nossa posição atual, construímos o cone de luz, uma determinada seção dele, no passado, mostrará a radiação de fundo remanescente do estado inicial. Onde a analogia do cone de luz está representada na figura 5.

Figura 5. Quando observamos o passado do universo, a folha do passado do cone de luz deve se encurvar no passado remoto, por causa de alta densidade de matéria e de radiação, para fechar em um ponto que é a singularidade que gerou o universo.



Fonte: (GAZZINELLI 2009, p 87).

O cone de luz, por sua vez, é um conceito da teoria da relatividade que descreve a propagação da luz (e, portanto, da causalidade) no espaço-tempo. Ele ilustra os limites do que pode ser observado ou influenciado por um evento em particular. A partir de um evento específico, o cone de luz futuro mostra a região do espaço-tempo que pode ser afetada por ele, enquanto o cone de luz passado mostra a região que pode ter influenciado o evento.

Quando observamos regiões cada vez mais remotas do universo, a seção reta observada do cone, que representa o universo num certo instante de tempo, deverá diminuir e tender para zero – tender para uma singularidade. O que faz que isso ocorra é a alta densidade de matéria e radiação, que encurva os raios de luz que formam a superfície do cone (...) e os faz convergir na singularidade, como mostra a Figura 5. O estado inicial marca o início do espaço e do tempo e não há sentido em falar em espaço e tempo antes dele. Nessa singularidade, que seria o protouniverso, a TRG não tem validade. Há, porém, esperança de que seja criada uma teoria quântica da gravitação, que unificará a mecânica quântica e a TRG e evitará as singularidades previstas por esta última. (GAZZINELLI 2009, p 87).

A singularidade no contexto do Big Bang representa um desafio para a física, pois indica uma condição onde a gravidade é tão intensa que o espaço-tempo é infinitamente curvado, e as equações da Relatividade Geral de Einstein não são mais válidas. Isso sugere a necessidade de uma teoria mais fundamental que possa unificar a gravidade com a mecânica quântica.

3.2.4– QUADRIVETORES

Os quadrvetores são uma ferramenta matemática essencial no formalismo do espaço-tempo na Teoria da Relatividade Especial e Geral. Eles são vetores em um espaço quadridimensional, composto por três dimensões espaciais e uma dimensão temporal. Essa estrutura permite descrever eventos e propriedades físicas de uma maneira que é consistente com os princípios da relatividade.

Para GAZZINELLI (2009), ao introduzir agora o conceito de quadrvetor, que permitirá criar o formalismo para o espaço-tempo. Inicialmente faremos a substituição da variável ct pela variável imaginária $\tau = ict$, onde $i = \sqrt{-1}$. Não procure dar um significado físico ao fato de ser a variável correspondente ao tempo um número imaginário – trata-se apenas de formalismo matemático. O vetor posição, que liga o evento $(0,0,0,0)$ ao evento (x, y, z, τ) , será representado por suas quatro componentes, como será demonstrado.

$$r_\alpha (\alpha = 1,2,3,4)$$

O quadrado do módulo do quadrvetor é:

$$\sum_1^4 r_\alpha^2 = x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2 \quad (9)$$

Determinando um *índice mudo*, para evitar o uso com frequência do somatório, dessa forma temos.

$$\sum_1^4 r_\alpha^2 = r_\alpha r_\alpha \quad (10)$$

Uma expressão com subíndice elevada ao quadrado deve ser interpretada como contendo um subíndice repetido e subentende, portanto, o símbolo somatório, GAZZINELLI (2009).

$$x_\alpha^2 = x_\alpha x_\alpha = \sum_\alpha x_\alpha^2$$

Que pode ser escrita da seguinte forma

$$r_\alpha^2 = r_\alpha r_\alpha = x^2 + y^2 + z^2 + \tau^2 = (x^2 + y^2 + z^2) - c^2 t^2 \quad (11)$$

A transformação de Lorentz (TL) é uma transformação linear das coordenadas (x, y, z, t) de um evento, de um referencial inercial para outro (equações provenientes da descoberta

feita por Lorentz) que pode ser escrita dentro do formalismo matemático usando matriz, GAZZINELLI (2009).

$$\begin{pmatrix} r'_1 \\ r'_2 \\ r'_3 \\ r'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & i\beta\gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ i\beta\gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix} \text{ ou } (r'_\alpha) = \mathbf{A}(r_\alpha) \quad (12)$$

Onde $\beta = \mu/c$, \mathbf{A} é uma matriz 4 X 4 e (r'_α) e (r_α) são matrizes coluna.

Usando as regras de multiplicação matricial teremos

$$r'_1 = \gamma r_1 + i\beta\gamma r_4 \text{ ou } x' = \gamma x + i\beta\gamma(ict) = \frac{x - \mu t}{\sqrt{1 - \frac{\mu^2}{c^2}}}$$

Que está de acordo com as equações de Lorentz dentro de suas descobertas.

3.2.5– QUADRIVETOR VELOCIDADE

Vamos definir o quadrivector velocidade a partir dos estudos da mecânica relativística, onde, para manter o princípio da conservação do momento, era necessário substituir o tempo t do referencial do observador pelo tempo próprio t_0 da partícula, usaremos da dedução matemática de com GAZZINELLI (2009):

$$(\mu_\alpha) = \frac{dr_\alpha}{dt_0} = \frac{dr_\alpha}{dt} \frac{dt}{dt_0} = \gamma \frac{dr_\alpha}{dt} = \gamma \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}, \frac{d\tau}{dt} \right) = \gamma(\mathbf{v}, ic), \quad (13)$$

onde usamos a equação

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{d}{dt}(ict) = ic$$

Mostrando que $\mu_\alpha \mu_\alpha$ é um invariante de Lorentz:

$$\mu_\alpha \mu_\alpha = (\gamma^2 v_x^2 + \gamma^2 v_y^2 + \gamma^2 v_z^2) - \gamma^2 c^2 = \gamma^2 (v^2 - c^2) = \frac{v^2 - c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = -c^2. \quad (14)$$

Essa invariância sugere que os μ_α ($\alpha = 1..4$) e na equação 2.12. \mathbf{v} é a velocidade no espaço (x, y, z) , a rapidez no espaço-tempo é dada pelo módulo do quadrivector μ_α .

$$\sqrt{|\mu_\alpha \mu_\alpha|} = \sqrt{|-c^2|} = c$$

Obtemos assim o notável resultado que todos os objetos do universo movem-se no espaço-tempo *sempre* com a rapidez da luz. Temos a relação matemática do tempo próprio de um relógio com o tempo do relógio do observador, estabelecida pela equação $dt = \gamma dt_0$, utilizando a álgebra, obtemos GAZZINELLI (2009):

$$c^2 \left(\frac{dt_0}{dt} \right)^2 + v^2 = c^2. \quad (15)$$

Essa equação mostra que, se a rapidez v de um objeto no espaço (x, y, z) aumenta, a rapidez da passagem do tempo em seu relógio, em relação ao relógio do observador – dada por (dt_0/dt) – deve diminuir; à medida que a rapidez v do objeto se aproxima da rapidez da luz, seu relógio torna-se cada vez mais lento, até parar. Em outras palavras, *o tempo não passa* para um objeto que se desloca no espaço ordinário com a rapidez da luz. Um fóton que tenha surgido nos instantes iniciais da expansão do universo, há cerca de doze bilhões de anos, não envelheceu nem um segundo. (GAZZINELLI 2009, p 90).

O quadrivetor velocidade é crucial no formalismo do espaço-tempo, pois encapsula de maneira elegante e consistente a relação entre espaço e tempo, garantindo a conservação das leis da física em todos os referenciais, e permitindo uma descrição unificada dos fenômenos relativísticos.

3.2.6– QUADRIVETOR MOMENTO

De acordo com GAZZINELLI (2009) Como as componentes μ_α foram definidas utilizando o tempo próprio, podemos agora definir as componentes do quadrivetor momento como o produto da massa de repouso m por μ_α :

$$(p_\alpha) = m (\mu_\alpha) = (\gamma m v_x, \gamma m v_y, \gamma m v_z, i c \gamma m). \quad (16)$$

Dessa forma, sendo m um escalar invariante e (μ_α) um quadrivetor, (p_α) será um quadrivetor. Sabemos que o quadrado do módulo de um quadrivetor deve ser um invariante de Lorentz, assim:

$$p_\alpha p_\alpha = m^2 \mu_\alpha \mu_\alpha = -m^2 c^2, \quad (17)$$

Fazendo uns arranjos matemáticos:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Ou

$$p^2 - \frac{E^2}{c^2} = -m^2 c^2 \quad e \quad p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 - \frac{E^2}{c^2} = -m^2 c^2 = p_\alpha p_\alpha.$$

Então,

$$(p_\alpha) = \left(p_1, p_2, p_3, i \frac{E}{c} \right) = \left(\mathbf{p}, i \frac{E}{c} \right). \quad (18)$$

Onde (p_α) é denominado *quadrivetor momento-energia*.

Na passagem de um referencial inercial para outro, as componentes do quadrivetor momento-energia se transformam de acordo com a Equação 2.10:

$$p'_x = \frac{p_x \frac{E}{c^2} \mu}{\sqrt{1 - \frac{\mu^2}{c^2}}}, \quad p'_y = p_y \quad p'_z = p_z, \quad \frac{E - \mu p_x}{\sqrt{1 - \frac{\mu^2}{c^2}}}. \quad (19)$$

Note que as componentes da energia e do momento se misturam. Nem o momento, nem a energia são separadamente grandezas invariantes na TRE, mas, como vimos acima, o quadrado do módulo do quadrivetor momento-energia, $p_\alpha p_\alpha$, sim. Pela análise do choque de

esferas ideais em dois referenciais inerciais chegamos à definição do vetor momento como, GAZZINELLI (2009).

$$\mathbf{p} = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \mathbf{v} = \gamma m \mathbf{v}, \quad (20)$$

onde m era a massa de repouso da partícula e \mathbf{v} sua velocidade; γm tem a mesma dimensão de m , porque γ é um escalar. Se compararmos a expressão de momento, escrita acima, com a expressão clássica $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, veremos que surge um novo conceito, a “massa” $M = \gamma m$, que depende da velocidade da partícula. É claro que esse novo conceito, que denominamos *massa relativística*, não implica propriedade nova da matéria e surgiu apenas da tentativa de fazer a expressão de momento relativístico ter o mesmo formato que a de momento clássico ($\mathbf{p} = m \mathbf{v}$). (GAZZINELLI 2009, p 91).

O quadrivetor momento desempenha um papel fundamental na teoria da relatividade geral, pois ele unifica a descrição da energia e do momento em um só conceito, preservando a invariância relativística e permitindo uma compreensão profunda das interações entre matéria, energia e a curvatura do espaço-tempo.

3.2.7– QUADRIVETOR FORÇA

O quadrivetor força – denominado *força de Minkowski* –, apropriado para o tratamento relativístico de processos dinâmicos, é obtido pela derivação do quadrivetor momento em relação ao tempo próprio da partícula, GAZZINELLI (2009).

$$F_\alpha = \frac{dp_\alpha}{dt_\alpha} = \frac{d(m_0 dx_\alpha / dt_0)}{dt_0}. \quad (21)$$

Note que os dois membros envolvem quadrivetores e o escalar massa repouso, que são invariantes sob a TL. Para baixas velocidades as componentes espaciais desse quadrivetor se reduzem às componentes da mecânica clássica, considerando de forma relativística a da segunda lei de Newton, lembrado que $dt_0 = dt \sqrt{1 - v^2/c^2}$:

$$F_x = \frac{dp_x}{dt_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d}{dt} \frac{mv_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ou

$$\frac{d}{dt} \frac{mv_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = F_x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (22)$$

O primeiro membro dessa equação é a derivada do momento em relação ao tempo e podemos, então, identificar o segundo membro com a força comum f_x :

$$f_x = F_x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (23)$$

Para $v \ll c$ a equação 2.20 se transforma na segunda lei de Newton:

$$\frac{dp_x}{dt} = f_x, \quad (24)$$

Uma lei importante para mecânica clássica, dentro de suas aplicações.

Relações análogas podem ser escritas para as outras componentes. É preciso cuidado ao utilizar esse conceito, porque a força comum, de componentes $f_i (i = x, y, z)$, não é um invariante de Lorentz e as equações escritas com ela não satisfazem, portanto, formalmente, os postulados da TRE. (GAZZINELLI 2009, p 95).

O quadrivetor força é essencial no formalismo do espaço-tempo, pois conecta a dinâmica relativística com a geometria do universo, garantindo que as leis da física permaneçam invariantes em todos os referenciais, sejam eles inerciais ou acelerados. O quadrivetor força é essencial no formalismo do espaço-tempo, pois conecta a dinâmica relativística com a geometria do universo, garantindo que as leis da física permaneçam invariantes em todos os referenciais, sejam eles inerciais ou acelerados.

3.2.8– PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA

O princípio da equivalência, uma pedra angular da Teoria da Relatividade proposta por Albert Einstein no início do século XX, revelou-se uma peça fundamental na compreensão profunda da gravidade e das interações espaço-temporais. Essa teoria revolucionária, que se desdobra em duas formas - a restrita e a geral - busca redefinir nossas concepções de espaço, tempo e gravidade, desafiando as premissas estabelecidas pela física clássica.

O princípio da equivalência, no contexto da Teoria da Relatividade Geral, sugere que não há diferença fundamental entre a força gravitacional e as acelerações que um objeto pode experimentar em um campo gravitacional. Em outras palavras, um observador dentro de uma caixa fechada não seria capaz de distinguir se a sensação de peso que experimenta é causada pela gravidade ou por uma aceleração constante. Essa equiparação entre força gravitacional e aceleração inercial constitui uma visão notável que desafia a intuição clássica.

Assim, ao explorar o princípio da equivalência na Teoria da Relatividade, mergulhamos em um domínio onde o espaço e o tempo se entrelaçam, a gravidade se manifesta de maneira intrigante, e as leis fundamentais da física são redefinidas em um cenário cósmico que transcende as fronteiras do senso comum. Esta introdução ao princípio da equivalência representa apenas o início de uma jornada fascinante em direção aos fundamentos da realidade física, conforme delineados pela genialidade visionária de Einstein.

Para explorar esse princípio importante, devemos levar em conta a formalização feita por Galileu Galilei.

Galileu diz em seu *Discurso sobre as duas novas ciências*: “a variação na rapidez entre esferas de ouro, cobre, mármore e outros materiais pesados, numa queda de cem cúbitos (aproximadamente 50 m) no ar, é tão pequena que a esfera de ouro não adiantaria em relação à de cobre nem quatro dedos. Tendo observado isso, concluí que, num meio totalmente sem resistência, todos corpos caem com a mesma rapidez”.

Na linguagem científica de hoje, diríamos que todos os corpos caem com a mesma aceleração. Podemos entender um pouco os resultados empíricos de Galileu e formular o seguinte princípio: *O movimento de qualquer partícula de prova em queda livre é independente de sua constituição e estrutura.* (GAZZINELLI, 2009, p. 120).

Vamos usar os conceitos e a matemática para definir o princípio da equivalência baseados nas observações de Galileu, de acordo com GAZZINELLI, 2009, p. 120 e 121.

Muitas vezes passa despercebido que são entidades físicas diferentes a massa m_i que aparece na segunda lei da dinâmica de Newton, $\mathbf{F} = m_i \mathbf{a}$, e a massa m_g presente na lei de gravitação universal,

$$\mathbf{F} = G \frac{m_g m_{g'}}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (25)$$

Chamamos a primeira de *massa inercial*, porque mede a inércia do corpo ao movimento, quando submetido à ação de uma força e a segunda denominamos obviamente de *massa gravitacional*.

A experiência mais simples para mostrar a igualdade das massas inercial e gravitacional é baseada na queda livre dos corpos. Suponhamos dois corpos de massas inerciais m_i (1) e m_i (2) e massas gravitacionais m_g (1) e m_g (2) em queda livre a partir da mesma altura. Sobre o corpo 1 atua a força da gravidade

$$F(1) = G \frac{m_g(1) M}{r^2},$$

Sendo M e r , respectivamente, a massa gravitacional e raio da Terra (estamos supondo que o corpo cai de pequena altura; podemos assim substituir a distância dos centros de gravidade dos dois corpos pelo raio da Terra). Mas, pela 2ª lei de Newton, $F = m_i$ (1) α (1); então:

$$m_i(1) \alpha (1) = G \frac{m_g(1) M}{r^2}$$

Analogamente, podemos escrever para a esquerda partícula

$$m_i(2) \alpha (2) = G \frac{m_g(2) M}{r^2}$$

Dividindo as duas equações anteriores membro a membro, obtemos:

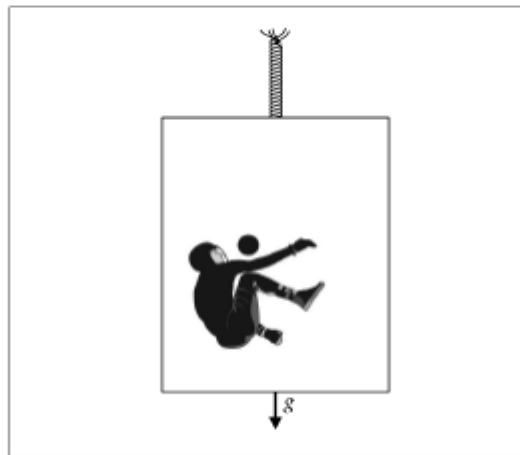
$$\frac{m_i(1) \alpha (1)}{m_i(2) \alpha (2)} = \frac{m_g(1)}{m_g(2)} \quad (26)$$

De acordo com GAZZINELLI (2009), temos uma igualdade na razão entre as massas inerciais e gravitacionais baseado na experiência qualitativa de Galileu sobre a queda livre dos corpos onde α (1) = α (2). Assim denominado *princípio de equivalência* (PE). Embora essa denominação do *princípio de equivalência* de Galileu seja um princípio limitado a mecânica,

teve sua importância para que mais tarde Einstein aprimorasse esse princípio para toda física, qualificando com uma PE *forte*, em comparação com a PE *fraca* de Galileu.

Fazendo uma comparação das acelerações da Lua e da Terra em direção ao Sol, foi feito um teste para PE. Onde foi utilizado medidas extremamente precisas da distância Lua-Terra, com uma precisão bem próxima de 2 cm. Foram colocados espelhos na superfície da Lua, e obtiveram essas medidas por meio da reflexão de feixes de laser enviado da terra. Uma forma de demonstrar o *princípio de equivalência*. Além dessa experiência, várias outras foram feitas para demonstrar tal fenômeno, assim como o *pêndulo*, *balanças* e outros.

Figura 6. Para um observador num elevador em queda livre, tudo se passa como se a gravidade fosse "desligada"



Fonte: GAZZINELLI (2009. P 122).

Einstein propôs um experimento mental conhecido como “o elevador de Einstein” para ilustrar os princípios da relatividade geral. Ele imaginou um elevador em queda livre, onde todas as pessoas e objetos dentro dele estariam em queda livre juntamente com o elevador, as pessoas e objetos flutuariam, aparentemente livre da gravidade. Isso ocorre porque a aceleração da queda livre do elevador cancelaria a gravidade que normalmente os puxaria para baixo. Esse experimento demonstra como a gravidade e a aceleração são indistinguíveis para os ocupantes do elevador, o que é um conceito-chave na teoria da relatividade de Einstein.

Os satélites artificiais que orbitam nosso planeta estão inseridos na descrição desse fenômeno de queda livre descrita por Albert Einstein.

Os satélites artificiais estão nessa situação. Seu movimento é a combinação de um movimento uniforme em relação às estrelas com um movimento de queda livre para a Terra; constituem, portanto, laboratórios nos quais a gravidade foi “desligada” e podem ser considerados referenciais inerciais em relação às estrelas. (GAZZINELLI, 2009. P 123.)

Einstein estendeu esse princípio da relatividade de Galileu com o propósito de incluir a aplicabilidade em toda a física, não restringindo apenas a mecânica de Newton. Dessa forma postulou seu *princípio da equivalência* (PE).

Um laboratório local, não-girante, em queda livre, é equivalente, para a realização de qualquer experiência física, a um referencial inercial numa região do espaço sem gravidade. (GAZZINELLI, 2009. P 123)

O princípio da equivalência é crucial para a compreensão da teoria da relatividade geral de Einstein, que descreve como a gravidade surge da curvatura do espaço-tempo. Sabemos que essa teoria revolucionou nossa compreensão da gravidade e do cosmos, e suas previsões têm sido confirmadas por inúmeras observações experimentais. Em uma última análise, o princípio da equivalência nos mostra que gravidade não é apenas uma força, mas uma manifestação da geometria do universo, abrindo caminho para uma compreensão mais profunda da natureza do espaço, do tempo e da própria gravidade.

3.2.9– A CURVATURA DA LUZ NA PRESENÇA DE UM CAMPO GRAVITACIONAL

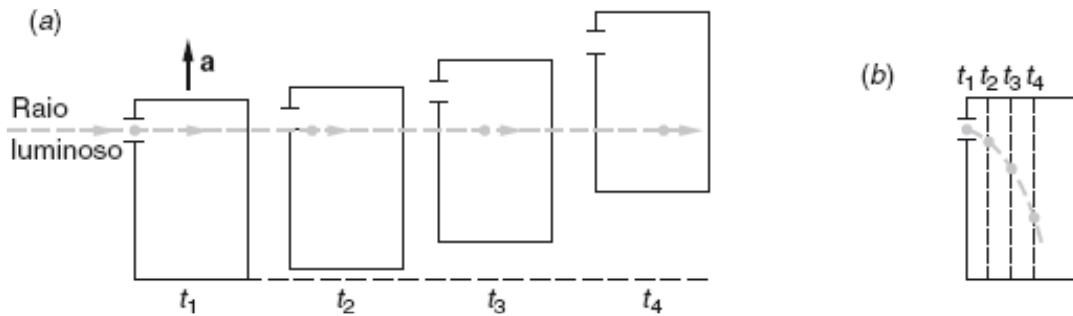
A curvatura da luz na presença de um campo gravitacional é um fenômeno extraordinário que ilustra a profunda interação entre a matéria e a geometria do espaço-tempo, conforme previsto pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Essa ideia desafia nossa intuição clássica sobre a trajetória da luz, que normalmente associamos a uma linha reta em um vácuo.

No entanto, quando a luz passa através de uma região onde a gravidade é intensa, como perto de uma estrela massiva ou um buraco negro, ela é submetida a uma curvatura no espaço-tempo. Sabemos hoje, que esta curvatura é uma consequência direta da presença da massa, que distorce o tecido do espaço-tempo ao seu redor. Como resultado, a trajetória da luz é desviada em direção à massa que está causando a curvatura. Esse desvio é observado como o fenômeno da deflexão gravitacional da luz. Um exemplo famoso disso é a observação de estrelas aparentemente localizadas em posições diferentes do que realmente estão devido à curvatura da luz provocada pelo sol, conforme previsto e confirmado pela primeira vez por uma equipe liderada por Arthur Eddington durante um eclipse solar em 1919.

Para TIPLER; LLEWELLYN (2017) este efeito causado pela relatividade originam as lentes gravitacionais cósmicas que agrupam a luz de galáxias muito distantes, com isso aumentando de forma significativa a sensibilidade dos telescópios, seja eles terrestres ou que estão em órbita.

Para compreender por que a deflexão da luz é uma consequência natural do princípio de equivalência, considere a Figura 7, que mostra um raio luminoso atravessando um elevador acelerado. Os desenhos mostram posições sucessivas do elevador após intervalos de tempo iguais. Como a velocidade do elevador está aumentando, a distância que o elevador percorre a cada intervalo aumenta com o tempo. A trajetória do raio luminoso, do ponto de vista de um observador situado no interior do elevador, é, portanto, uma parábola. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 118.)

Figura 7. (a) Raio luminoso atravessando um elevador uniformemente acelerado. Os desenhos mostram posições sucessivas do elevador após intervalos de tempo iguais t_1 , t_2 , t_3 e t_4 . (b).



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 118.)

Para determinarmos o ângulo de deflexão, escrevemos o intervalo no espaço-tempo (Equação $ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$) em coordenadas polares de acordo com a demonstração feita por TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 118.):

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (27)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (28)$$

Como a deflexão da luz acontece em um plano, a Equação 3.2.23 se torna

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dr^2 + r^2 d\theta^2) \quad (29)$$

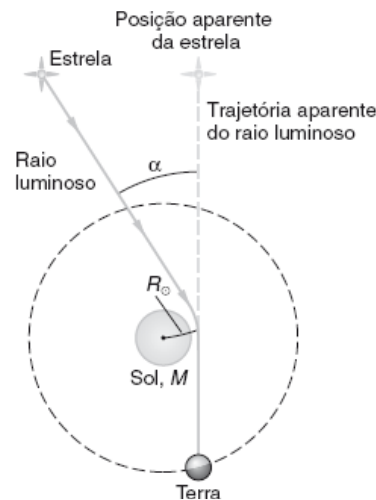
Einstein mostrou que a Equação 3.2.25 é modificada na presença de uma massa M (estática, sem rotação), tornando-se

$$ds^2 = \gamma(r)^2 c^2 dt^2 - dr^2 / \gamma(r)^2 - r^2 d\theta^2 \quad (30)$$

em que $\gamma(r) = (1 - 2GM/c^2 r)^{1/2}$, G é a constante gravitacional universal e r é a distância entre o raio luminoso e o centro da massa M . O fator $\gamma(r)$ é análogo ao γ da relatividade restrita e pode ser considerado uma correção associada à *dilatação gravitacional dos tempos* (o primeiro termo do lado direito da Equação 2-49) e à *contração gravitacional das distâncias* (o segundo termo).

Esta situação está representada na Figura 2-20, que mostra a luz de uma estrela distante passando nas proximidades do Sol. A deflexão gravitacional da luz (de massa $\gamma m = E/c^2$) pode ser interpretada como um fenômeno de difração. A velocidade da luz é reduzida para $\gamma(r)c$ nas proximidades da massa M , já que $\gamma(r) < 1$ (veja a Equação 2-49); isso faz com que as frentes de onda (e, portanto, a trajetória da luz) se desviem em direção a M . Trata-se de um fenômeno análogo à deflexão da luz das estrelas em direção à superfície da Terra em consequência da variação da densidade (e, portanto, do índice de refração) da atmosfera. Integrando a Equação 2-49 ao longo da trajetória do raio luminoso (lembre-se de que $ds = 0$ no caso da luz), é possível mostrar que o ângulo de deflexão é dado por¹⁷ (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 118.)

Figura 8. Deflexão (grandemente exagerada) da luz proveniente de uma estrela devido à atração gravitacional do Sol.

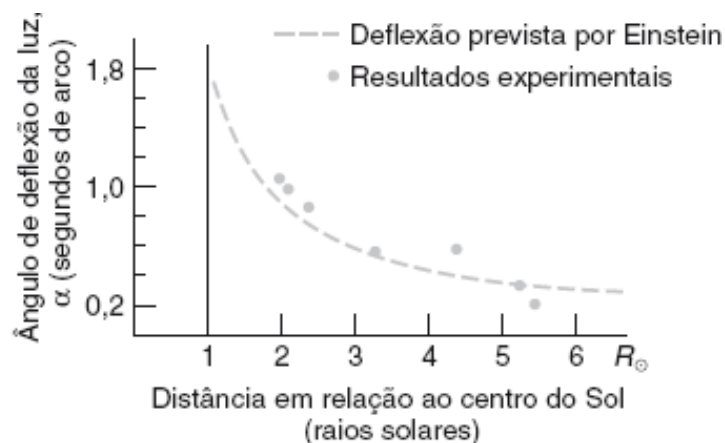


Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 119).

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 R} \quad (31)$$

De acordo com TIPLER; LLEWELLYN (2017), em que R é a distância de máxima aproximação entre o raio luminoso e o centro de M . Para um raio tangente à superfície do Sol, $R = R_{\odot} = 6,96 \times 10^8$ m (o raio do Sol) e $M = 1,99 \times 10^{30}$ kg (a massa do Sol). Substituindo esses valores, obtemos $\alpha = 1,75$ segundo de arco.

Figura 9. A figura mostra uma comparação entre a previsão teórica (linha tracejada) e os dados experimentais para 7 das 13 estrelas investigadas pelas expedições de Eddington.



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 119).

Em circunstâncias normais, o brilho do Sol impede que os astrônomos observem as estrelas próximas; assim, as previsões de Einstein só podiam ser testadas durante um eclipse total. O valor de α foi calculado pelo cientista em 1915; em 1919, Eddington¹⁹ organizou expedições a dois locais que ficavam sobre a linha de totalidade de um eclipse solar. As duas expedições conseguiram medir o valor de Δ para várias estrelas e comprovar a previsão teórica de que o ângulo de deflexão varia inversamente com R . Os valores experimentais de Δ para raios tangentes à superfície do Sol foram os seguintes:

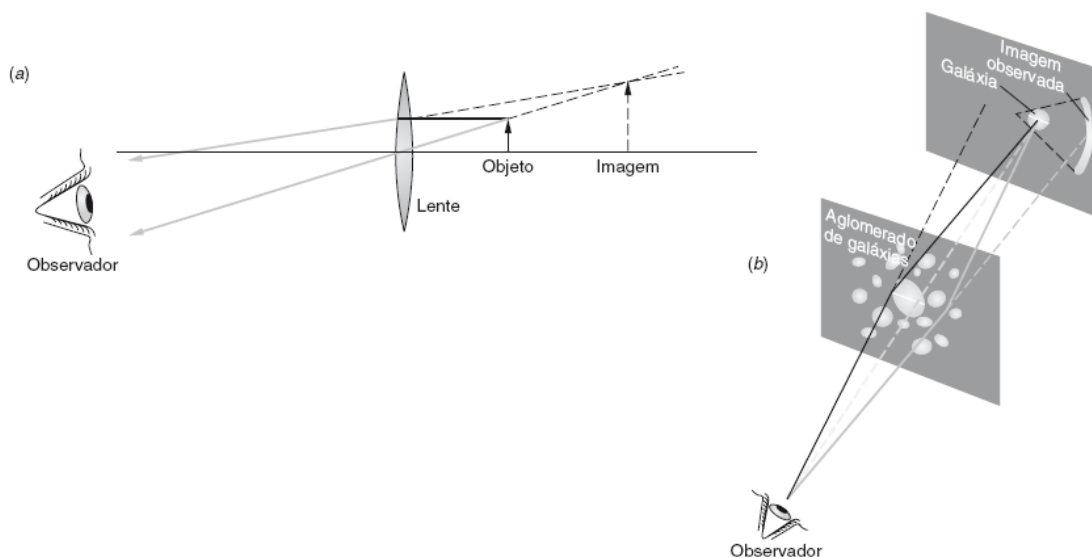
Em Sobral (América do Sul): $\alpha = 1,98 \pm 0,12$ segundo de arco

Na Ilha do Príncipe (África): $\alpha = 1,61 \pm 0,30$ segundo de arco (TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 119 a 120.)

Ressaltamos que, a previsão de Einstein era que a luz das estrelas ao passar próximo ao sol seria curvada devido à gravidade massiva do sol, o que alteraria ligeiramente suas posições aparentes no céu, e seu modelo previa um desvio angular específico das estrelas em relação às suas posições durante a noite, quando o Sol não estava presente na linha de visão. As medidas obtidas a partir das observações feitas durante os eclipses em Sobral e Ilha do Príncipe confirmaram exatamente o que Einstein havia previsto. As estrelas estavam de fato deslocadas, em conformidade com a curvatura da luz causada pela presença do sol.

Embora a estadia de Einstein no Brasil tenha sido relativamente curta, no entanto, o Brasil teve um papel importante na comprovação de sua teoria. As observações feitas em Sobral, Ceará, pela equipe liderada por Sir Arthur Eddington 1919, foi um marco para a ciência, pois a partir daí, as previsões propostas por Einstein passavam a ser confirmadas, colocando o Brasil na história da ciência.

Figura 10. Deflexão gravitacional da luz



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 120.)

Desde então, inúmeros experimentos adicionais, como a deflexão gravitacional de luz de quasares distantes ao passar por galáxias massivas, têm confirmado repetidamente as previsões de Einstein sobre a curvatura da luz.

A deflexão gravitacional da luz está sendo usada pelos astrônomos modernos, através do fenômeno das *lentes gravitacionais*, para estudar as galáxias e outras grandes concentrações de matéria. Ao passar por uma galáxia ou aglomerado de galáxias, a luz proveniente de estrelas e galáxias mais distantes é refratada, da mesma forma como a luz proveniente de um objeto é refratada por uma lente comum. Como no caso das lentes comuns, o resultado é a formação de uma imagem, que pode ser uma réplica aumentada e/ou distorcida do objeto original. TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 120.)

Uma das principais consequências é a confirmação da Teoria da Relatividade Geral, que mudou nossa compreensão da gravidade e do universo. Além disso, essas previsões abriram caminho para a compreensão de fenômenos cósmicos extraordinários, como os buracos negros e as lentes gravitacionais. Os buracos negros são regiões do espaço onde a gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar de seu poder de atração. A curvatura da luz ao redor de um buraco negro é um dos aspectos mais fascinantes desse fenômeno. Além do mais, as lentes gravitacionais são outro exemplo das consequências das previsões de Einstein.

Figura 11. As imagens de galáxias distantes são transformadas em arcos pelo grande aglomerado de galáxias Abell 2218, cujo enorme campo gravitacional, agindo como uma lente, amplia, reforça e distorce as imagens.



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 121.)

3.2.10– A DILATAÇÃO GRAVITACIONAL DO TEMPO

A dilatação gravitacional do tempo é um conceito fascinante que surge da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein. Segundo essa teoria, o tempo não é uniforme em todo o universo, mas pode ser afetado pela presença de campos gravitacionais intensos. A ideia por trás da dilatação gravitacional do tempo é que a gravidade curva o espaço-tempo ao redor de corpos massivos, como estrelas ou buracos negros. Isso significa que o tempo passa mais devagar em regiões onde a gravidade é mais forte, conforme observado por um observador distante. Um exemplo claro desse fenômeno é o experimento dos relógios gêmeos, onde um relógio é mantido na Terra e outro é levado para o espaço profundo. Devido à diferença nos campos gravitacionais, o relógio na Terra irá marcar o tempo de forma ligeiramente mais lenta em comparação com o relógio no espaço. Essa dilatação do tempo tem implicações profundas na física e na astrofísica, afetando a forma como percebemos o tempo e como compreendemos

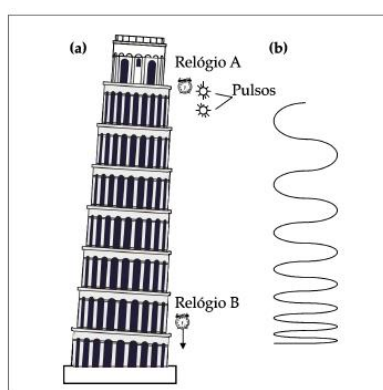
os eventos cósmicos. Além disso, a dilatação gravitacional do tempo é crucial para entender fenômenos como a formação e evolução do universo, bem como a estrutura e comportamento dos buracos negros.

A dilatação gravitacional do tempo é uma consequência do PE que pode ser explicada pela experiência imaginária seguinte, proposta por Einstein (Figura 7.8a). Imagine um relógio atômico *A*, que emite pulsos de luz com frequência muito alta, colocado no topo de uma torre, e um relógio idêntico *B*, colocado no segundo piso. Cada um deles, é claro, marca como flui o tempo em sua posição. Quando o relógio *A* emite um pulso, deixa-se que caia livremente. Ao emitir o pulso seguinte, ele terá percorrido uma distância quase imperceptível, de modo que o intervalo entre os dois pulsos mostrará ainda como corre o tempo no topo da torre. Quando o primeiro pulso chega ao relógio *B*, deixa-se que este caia livremente e, quando o segundo pulso atingir, ele terá percorrido também uma distância imperceptível, de modo que ainda indicará o correr do tempo no segundo piso. Como os dois relógios estão em queda livre podem ser considerados em referenciais inerciais, por causa do PE, e a TER pode ser aplicada. (GAZZINELLI, 2009. P 126.)

O experimento imaginário proposto por Einstein para ilustrar a dilatação gravitacional do tempo é uma ferramenta poderosa para compreender esse conceito complexo de forma intuitiva. Ao imaginar dois relógios com diferentes campos gravitacionais, mostrará que a gravidade intensa influenciará na passagem do tempo mais lenta. Einstein brilhantemente nos convida a refletir sobre como a gravidade pode distorcer a passagem do tempo.

Este experimento nos mostra que o relógio no campo gravitacional mais intenso irá marcar o tempo de forma mais lenta em comparação com o relógio em um campo mais fraco. Essa discrepância no ritmo do tempo é uma consequência direta da curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa, como sabemos nos dias contemporâneos.

Figura 12. A experiência imaginária (a) mostra que o tempo flui mais lentamente no relógio B do que no que no relógio A; (b) representa o efeito da gravidade na frequência da emitida Pelo relógio A (desvio para o violeta)



Fonte: GAZZINELLI, 2009. P 126.

Como *A* iniciou a queda antes de *B*, sua velocidade é sempre maior do que a de *B* e ele se aproxima deste. Portanto, no referencial de *B* a luz proveniente de *A* será observada com um desvio Doppler para o violeta, isto é, com frequência mais alta (Figura 7.8b). Isso significa que no referencial do relógio *B* o tique-taque do relógio *A* será mais rápido do que o do relógio *B*. Como os relógios *A* e *B* medem o correr do tempo no topo e no segundo piso, respectivamente, o tempo flui mais lentamente no

segundo piso do que no topo da torre; ou, em outras palavras, *a gravidade dilata o tempo*. (GAZZINELLI, 2009. P 126.)

Ao explorar este experimento mental, somos levados a questionar nossa intuição sobre a natureza do tempo e a perceber como ele pode ser influenciado por fatores externos, como a gravidade. Essa reflexão nos ajuda a apreciar a profundidade e a complexidade do universo, ao mesmo tempo em que nos convida a mergulhar mais fundo na compreensão dos mistérios do cosmos.

A dilatação gravitacional do tempo, discutida na experiência imaginária acima, foi confirmada em várias experiências em que foram comparados relógios atômicos colocados a diferentes altitudes em relação ao nível do mar. Uma das mais precisas foi realizada em 1976 pelo Observatório Astrofísico Smithsonianiano (EUA): um oscilador maser foi enviado num foguete a uma altitude de 10.000 km e foram feitas comparações da frequência dos pulsos com a frequência dos pulsos de um oscilador idêntico colocado no laboratório terrestre. Pela TRG, na altitude máxima, o relógio do foguete deveria ter uma rapidez de 4,5 partes em 1010 maior do que a do relógio terrestre. As comparações foram repetidas várias vezes durante as duas horas de queda livre da cápsula do foguete. Nessa experiência, a concordância da medida da dilatação gravitacional do tempo com a previsão teórica foi de 0,01%. (GAZZINELLI, 2009. P 126 e 127.)

Assim, o experimento imaginário de Einstein sobre a dilatação gravitacional do tempo não só nos ajuda a visualizar esse fenômeno abstrato, mas também nos estimula a contemplar as implicações mais amplas da Teoria da Relatividade Geral em nossa compreensão do tempo, do espaço e da natureza fundamental do universo.

3.2.11– DESVIO GRAVITACIONAL PARA O VERMELHO

As previsões de Albert Einstein expandiram novos horizontes não só no campo da física, mas também nos estudos relacionado ao cosmos, astronomia e outros. Vamos abordar a segunda previsão de Einstein na relatividade geral.

O desvio gravitacional para o vermelho é um fenômeno fascinante, resultante das influências da gravidade sobre a luz emitida por objetos distantes no universo. Este efeito, previsto pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, tem implicações profundas na compreensão da estrutura e da evolução do cosmos. Quando a luz viaja através do espaço, ela pode ser desviada em sua trajetória por objetos massivos, como galáxias, aglomerados de galáxias ou buracos negros. Esse desvio ocorre devido à curvatura do espaço-tempo em torno desses objetos, conforme postulado pela Teoria da Relatividade.

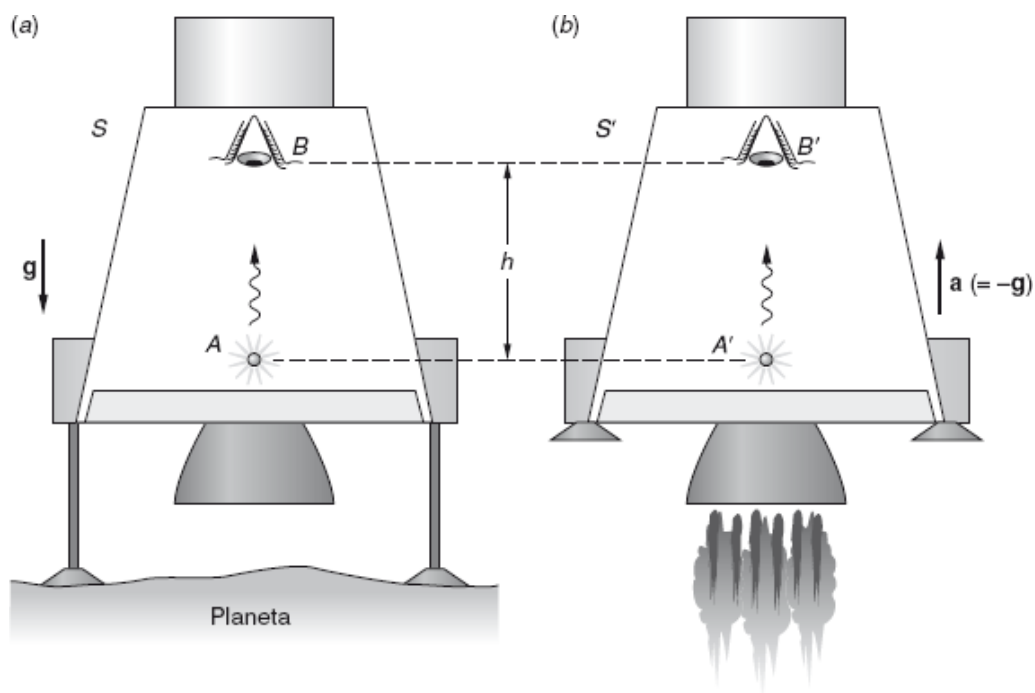
Um dos resultados notáveis desse desvio é a mudança na cor da luz, que é conhecida como desvio gravitacional para o vermelho. Este fenômeno ocorre quando a luz é desviada para regiões onde o campo gravitacional é mais fraco, resultando em um aumento na frequência das ondas de luz, o que se traduz em um desvio para o extremo vermelho do espectro eletromagnético. O desvio gravitacional para o vermelho é uma ferramenta poderosa para os astrônomos

estudarem a distribuição de matéria no universo, mapear a estrutura das galáxias e aglomerados de galáxias, e investigar a expansão do universo. Além disso, ele fornece insights valiosos sobre a natureza da gravidade e as propriedades do espaço-tempo em escalas cósmicas.

Uma segunda previsão da relatividade geral diz respeito à velocidade dos relógios e à frequência da luz em um campo gravitacional. Como exemplo concreto para ilustrar o desvio gravitacional para o vermelho associado ao princípio de equivalência, considere duas fontes luminosas iguais, A e A' , e dois detectores iguais, B e B' , situados em espaçonaves iguais, S e S' (Figura 2-23). A espaçonave S da Figura 2-23a está em repouso no campo gravitacional de um planeta; a aceleração local da gravidade é \mathbf{g} . Não existe nenhuma massa nas proximidades da espaçonave S' da Figura 2-23b. No instante $t = 0$, S' recebe uma aceleração constante $\mathbf{a} = -\mathbf{g}$; ao mesmo tempo, um átomo da fonte A' emite um pulso luminoso de frequência f_0 . Durante o intervalo de tempo $t (= h/c)$ que a luz leva para percorrer a distância entre A' e B' , B' atinge uma velocidade $v = at = gh/c$; em consequência, a frequência f medida pelo detector B' sofre um *desvio para o vermelho* que, para $v \ll c$, é dado por $(f_0 - f)/f_0 \approx \beta$. (TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 121).

Vejamos a figura que ilustra experimentalmente esse fenômeno que ficou conhecido como a segunda previsão da relatividade geral de Albert Einstein.

Figura 13. O sistema S está em repouso no campo gravitacional de um planeta. (b) A espaçonave S' , longe de qualquer massa, recebe uma aceleração $a = -g$.



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, (p. 122).

De acordo com TIPLER; LLEWELLYN (2017) demonstraremos a matemática referente ao desvio da luz provocada pela gravidade.

$$\frac{(f_0 - f)}{f_0} = \frac{\Delta f}{f} \approx \beta = \frac{v}{c} = gh/c^2 \quad (32)$$

Observe que o lado direito da Equação 2-51 é igual ao potencial gravitacional (ou seja, a energia potencial gravitacional por unidade de massa) $\Delta\phi = gh$ entre A e B ,

dividido por c^2 . De acordo com o princípio de equivalência, a frequência medida pelo detector B também deve ser igual a f , embora S esteja em repouso e, portanto, o desvio não possa ser atribuído ao efeito Doppler! Como o átomo que produziu o pulso luminoso em A pode ser considerado um relógio, e como nenhum “ciclo” de oscilação é perdido no percurso da luz de A até B , o observador em B deve concluir que o relógio em A está atrasado em relação a um relógio igual (ou um átomo igual) situado em B . Como a fonte A se encontra em um potencial gravitacional menor, o observador chega à conclusão de que *quanto menor o potencial gravitacional, menor a velocidade de um relógio*. Este desvio da velocidade dos relógios no sentido de frequências mais baixas (e maiores comprimentos de onda), causado por campos gravitacionais, é conhecido como *desvio gravitacional para o vermelho*. (TIPLER; LLEWELLYN, 2017, p. 121).

Para um caso geral de uma massa M esférica e sem rotação, em ponto situado no infinito, a variação de potencial gravitacional entre um ponto situado a uma distância R do centro é dada por

$$\Delta\phi = \int_R^\infty \frac{GM}{r^2} dr = GM \left(-\frac{1}{r} \right) \Big|_R^\infty = \frac{GM}{R} \quad (33)$$

e o desvio de frequência é dado por

$$\Delta f/f_0 = (f_0 - f)/f_0 = \frac{GM}{c^2 R}$$

Assim temos o desvio gravitacional para o vermelho

$$\frac{f}{f_0} = 1 - \frac{GM}{c^2 R} \quad (34)$$

Para TIPLER; LLEWELLYN (2017) Se o raio luminoso está se propagando no sentido oposto, isto é, de um potencial gravitacional maior para um potencial gravitacional menor, os limites de integração da Equação 2-52 devem ser invertidos e a Equação 2-53, se tornando assim, o desvio gravitacional para o azul.

$$\frac{f}{f_0} = 1 + \frac{GM}{c^2 R} \quad (35)$$

Os efeitos da gravitação sobre a frequência da luz das estrelas são muito difíceis de detectar porque um raio luminoso está sujeito a várias mudanças durante o percurso. Assim, por exemplo, a luz pode sofrer um desvio gravitacional para o vermelho ao deixar a estrela e um desvio gravitacional para o azul ao se aproximar da Terra. Além disso, o desvio de frequência pode ter causas não gravitacionais, como o efeito Doppler. O desvio para o azul causado pelo campo gravitacional da Terra é tão pequeno que não pode ser medido com os equipamentos atuais; por outro lado, o desvio para o vermelho produzido pelo efeito Doppler associado à expansão geral do universo é normalmente muito maior que os efeitos gravitacionais e, juntamente com o alargamento térmico das linhas espectrais causado pelas atmosferas estelares, leva a grandes imprecisões nas medidas. (TIPLER; LLEWELLYN (2017, p. 122)

Segundo TIPLER; LLEWELLYN (2017), a Equação 2-54 foi testada com certo sucesso por R. V. Pound e colaboradores em 1960 e 4 anos depois com maior precisão, eles mediram o desvio de frequência dos raios gamas de 14,4 KeV emitidos por átomos de Fe enquanto caíam

de uma distância h de apenas 22,5 m, isso no campo gravitacional relativamente pequeno da terra. A diferença entre os resultados que obtiveram usando o efeito Mössbauer, uma técnica extremamente precisa para medir desvios de frequência descoberta em 1958, e o resultado previsto pela teoria da relatividade geral, $\Delta f/f_0 = gh/c^2 = 2,45 \times 10^{-15}$, foi menor que 1%. Além desse importante experimento, outros experimentos foram feitos para confirmar essas previsões relativísticas, inclusive em vários testes usaram relógios atômicos a bordo de aeronaves.

Em suma, o desvio gravitacional para o vermelho é um fenômeno cósmico fascinante, resultado da influência da gravidade sobre a luz emitida por objetos distantes. Esta mudança na cor da luz, causada pela curvatura do espaço-tempo em torno de massas massivas, oferece uma janela única para entender a distribuição de matéria no universo e investigar a natureza da gravidade. Ao revelar os segredos ocultos do cosmos, o desvio gravitacional para o vermelho continua a inspirar e desafiar os astrônomos, lançando luz sobre os mistérios mais profundos do universo.

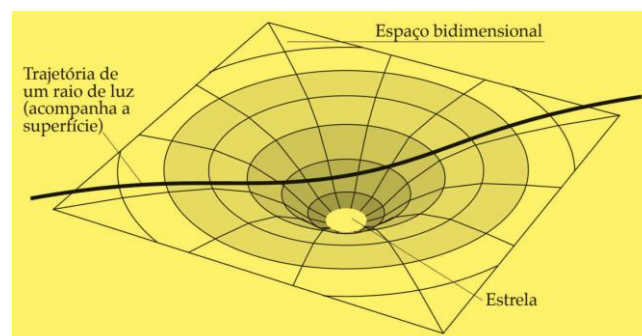
3.2.12– A CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO

Imagine o universo como uma imensa tela esticada, onde os corpos celestes são como pesos que fazem essa tela se curvar. Essa é a imagem que a Teoria da Relatividade Geral de Einstein nos traz sobre a curvatura do espaço-tempo. Segundo essa teoria, a gravidade não é apenas uma força que atrai objetos entre si, mas também uma curvatura no tecido do espaço-tempo. Assim, os corpos celestes, como estrelas e planetas, causam uma espécie de "dobra" nesse tecido, modificando a geometria do espaço-tempo ao seu redor.

De acordo com GAZZINELLI, (2009), as bases conceituais que constituem a teoria da relatividade geral, de Einstein são a *curvatura do espaço-tempo* e *princípio da equivalência*.

As ideias sobre curvatura do espaço foram desenvolvidas durante o século XIX por vários matemáticos, a partir da rejeição do quinto postulado de Euclides (por um ponto fora de uma reta passa sempre uma única reta paralela à reta dada). Gauss, Lobachevski e Bolyai verificaram que a rejeição do quinto postulado levava a outras geometrias – não-euclidianas – tão coerentes como a de Euclides. (GAZZINELLI, 2009. P 130.)

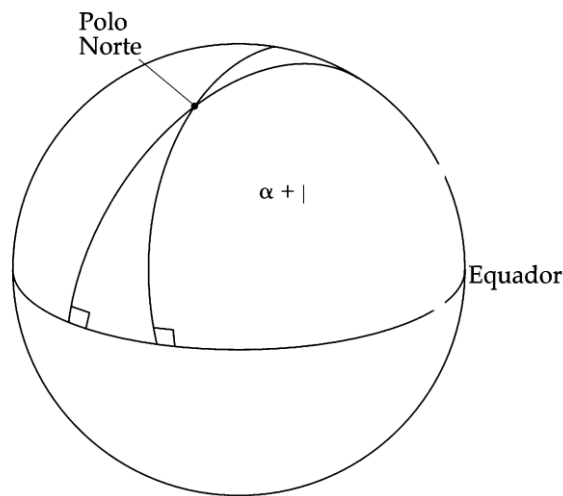
Figura 14. Um raio de luz é encurvado pela curvatura do espaço-tempo.



Quando a luz passa perto de um corpo com grande massa, como uma estrela ou um buraco negro, sua trajetória é desviada devido à curvatura do espaço-tempo causada pela massa desse objeto. Esse desvio é conhecido como "deflexão gravitacional da luz".

Vamos considerar para análise, uma superfície esférica que também é considerado um espaço bidimensional, que está afundada em um espaço comum de três dimensões.

Figura 15. Tomamos como equador da esfera um círculo máximo arbitrário; dois meridianos próximos que podem ser considerados localmente paralelos, globalmente se encurvam para se encontrar nos polos e o quinto postulado de Euclides é violado.



Fonte: GAZZINELLI, 2009. P 131.

A linha sobre a qual se mede a distância mais curta entre dois pontos numa superfície é denominada geodésica; por exemplo, no plano, as geodésicas são retas e, na superfície esférica, são os círculos máximos. Tome um círculo máximo (geodésica) arbitrário como equador da superfície esférica. Dois meridianos (que também são geodésicas, porque são círculos máximos) próximos podem ser considerados localmente como paralelos – a situação é semelhante à de duas retas perpendiculares a outra reta no plano. Porém, globalmente, os meridianos se encurvam para se encontrar nos polos (Figura 7.13) e não podemos dizer que são paralelos. O quinto postulado de Euclides é, então, violado na superfície esférica e a geometria nessa superfície não poderá ser euclidiana. (GAZZINELLI, 2009. P 131.)

Dentro da Relatividade Geral de Einstein, a geometria euclidiana desempenha um papel interessante e contrastante. Enquanto a geometria euclidiana tradicional descreve o espaço como plano e as linhas retas como trajetórias de menor distância entre dois pontos, a Relatividade Geral propõe uma visão diferente. De acordo com a TRG o espaço-tempo não é plano, mas sim curvo. A presença de massa e energia curva o espaço-tempo ao seu redor, alterando a geometria local. Portanto, em escalas astronômicas, a geometria euclidiana não se aplica diretamente.

Gauss descobriu isso de uma maneira concreta, ao fazer um levantamento topo gráfico numa região próxima de Göttingen, na Alemanha, por encomenda do principado local. Ele verificou que, no maior triângulo de seu levantamento, a soma dos ângulos

internos era ligeiramente diferente de 180° , o que mostrava que, na superfície esférica da Terra, não era possível aplicar uma geometria euclidiana. Seres bidimensionais limitados a viver numa superfície esférica poderiam comprovar a curvatura de seu espaço, ao verificar que a soma dos ângulos de um triângulo é sempre superior a 180° , ou que a razão da circunferência de um círculo para o raio é menor do que 2π . Esses seres seriam compelidos a construir uma geometria, válida em seu espaço curvo bidimensional, que seria obrigatoriamente não-euclidiana. (GAZZINELLI, 2009. P 131.)

A contribuição de Gauss para os fundamentos da geometria influenciou indiretamente o desenvolvimento da geometria diferencial, que é essencial para a formulação matemática da Teoria da Relatividade Geral. Gauss investigou os postulados fundamentais da geometria euclidiana, incluindo o famoso quinto postulado de Euclides, que trata da existência de paralelas. Embora suas contribuições não tenham sido diretamente aplicadas à relatividade geral, Gauss demonstrou que as geometrias não euclidianas são possíveis, abrindo caminho para uma compreensão mais ampla da geometria e sua relação com a física. A compreensão de Gauss sobre a geometria, particularmente sua noção de curvatura, foi fundamental para o desenvolvimento posterior da geometria diferencial por matemáticos como Riemann. Essa geometria diferencial, que lida com espaços curvos, é essencial para a formulação matemática da Teoria da Relatividade Geral, já que descreve como a gravidade é interpretada como a curvatura do espaço-tempo.

a mais notável previsão de Riemann foi a de que o espaço não devia ser apenas uma espécie de suporte para os fenômenos físicos, parado, rígido, homogêneo, independente da matéria e da energia, como se pensava então, mas, ao contrário, que a geometria do espaço devia de alguma forma participar dos fenômenos físicos e que a curvatura do espaço devia ser determinada por forças externas. Para ele, as propriedades do espaço não poderiam ser deduzidas de considerações matemáticas, mas da experiência física. (...) O espaço-tempo de Minkowski foi, por isso, essencial para o novo avanço. É interessante notar que Einstein, de início, rejeitou a ideia de espaço-tempo Minkowski como um floreio matemático que complicava sem necessidade sua TRG; no entanto, como ele reconheceu depois, a concepção de Minkowski foi essencial para a formulação da TRG. (GAZZINELLI, 2009. P 131 e 132.)

Albert Einstein revolucionou nossa compreensão do universo ao desenvolver a Teoria da Relatividade Geral, que descreve a gravidade como a curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia. De acordo com a teoria, objetos massivos, como planetas e estrelas, curvam o espaço ao seu redor, criando o que chamamos de campo gravitacional. Einstein propôs a imagem de espaço-tempo como uma espécie de tecido elástico, onde corpos massivos criam depressões na superfície. Essas depressões fazem com que os objetos se movam ao longo de trajetórias curvas, como se estivessem seguindo as curvas de um rio em vez de linhas retas.

Vejamos como descreve GAZZINELLI (2009), a respeito da relatividade geral de Albert Einstein e sua importante essência para o desenvolvimento dessa teoria.

Einstein desenvolveu a teoria geral à medida que progredia na carreira universitária. Fez a primeira tentativa para incorporar a gravitação à TRG no artigo já mencionado, escrito para o Jahrbuch, ainda como técnico do escritório de patentes de Berna. Diante das dificuldades para formalizar a teoria, deixou de lado o problema e dedicou alguns anos a questões relacionadas com física atômica, só voltando ao problema da gravitação em 1911, quando já era professor em Praga. Foi então que descobriu que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço-tempo – essa é a essência da TRG. O objetivo de Einstein durante os anos seguintes passou a ser encontrar as equações que relacionariam quantitativamente a matéria com a métrica do espaço-tempo, ou seja, determinar como a matéria encurva o espaço-tempo. Retornando a Zurique, naquele mesmo ano, como professor do Instituto Politécnico (ETH), teve a colaboração de seu antigo colega de universidade Marcel Grossmann, então professor de matemática; e foi este quem sugeriu como ferramenta adequada para tratar o problema o cálculo diferencial absoluto (chamado hoje análise tensorial ou geometria diferencial), inventado e desenvolvido na segunda metade do século XIX sucessivamente por Riemann, Gregorio Ricci e seu discípulo Tulio Levi-Civita. Era uma matemática muito complicada, levando Einstein a comentar, numa carta ao físico teórico A. Sommerfeld, que o problema com o qual lidava, então, fazia a TER parecer brinquedo de criança. (GAZZINELLI, 2009. P 132.)

A curvatura do espaço-tempo tem implicações profundas na forma como entendemos o universo. Ela explica desde a órbita dos planetas ao redor do Sol até fenômenos como a deflexão da luz por corpos massivos e a existência de buracos negros, onde a curvatura é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar.

Einstein e Grossmann chegaram a uma primeira forma da lei de curvatura em 1914. Ela era restrita a alguns referenciais – não obedecia, portanto, ao princípio da relatividade (PR) – e não satisfazia, por isso, à expectativa de Einstein, mas foi publicada assim mesmo. A forma final da TRG seria desenvolvida no ano seguinte, quando Einstein já era professor em Berlim. Nessa teoria, a força de gravitação (como a de Newton) não existe, sendo substituída pela geometria – na ausência de forças externas, as trajetórias de partículas são geodésicas do espaço-tempo. As equações de campo de Einstein, como são chamadas as equações básicas da teoria, são invariantes sob transformações entre quaisquer referenciais. Elas permitem calcular quantitativamente como o espaço-tempo é encurvado na vizinhança da matéria pela densidade de massa (expressa como densidade de energia) e pela pressão de matéria. Exceto em alguns casos (por exemplo, no interior de estrelas de nêutrons) a pressão de matéria é desprezível em comparação com a densidade de massa e é essa que determina a curvatura do espaço. (GAZZINELLI, 2009. P 132.)

A ideia da curvatura do espaço-tempo proposta por Einstein é uma das contribuições mais revolucionárias para a física moderna, redefinindo nossa compreensão da gravidade e da estrutura do universo. Devemos ressaltar que é indiscutível a genialidade de Albert Einstein, no entanto essa teoria foi trabalhada em paralelo com outras mentes brilhantes.

(...) a partir de suas equações de campo, Einstein calculou o deslocamento do periélio de Mercúrio – que vinha utilizando desde 1907 como contraprova de suas ideias – obtendo ótima concordância com a observação astronômica. A teoria permitiu ainda calcular a deflexão da luz de estrelas pelo campo gravitacional do Sol com alta precisão e prever a existência de singularidades no espaço-tempo, que foram relacionadas, um quarto de século depois, aos buracos negros. A detecção de ondas gravitacionais, previstas pela teoria, tem sido tentada exaustivamente por métodos terrestres sem sucesso ainda. Porém, Joseph Taylor e Russell Hulse descobriram em, 1974, a primeira pulsar binária. Por métodos extraordinariamente precisos de medição do tempo, verificaram uma pequena, mas constante diminuição de sua velocidade orbital, cuja única explicação até agora é que seja causada pela emissão de ondas

gravitacionais, em completo acordo com a previsão da TRG. (GAZZINELLI, 2009. P 133.)

A curvatura do espaço-tempo não é apenas uma ideia abstrata na física moderna, mas uma realidade observável que revolucionou nossa compreensão da gravidade e da estrutura do universo. Ela nos lembra que o espaço e o tempo não são apenas cenários passivos onde a física acontece, mas participantes ativos nos eventos cósmicos, moldando o próprio tecido do universo.

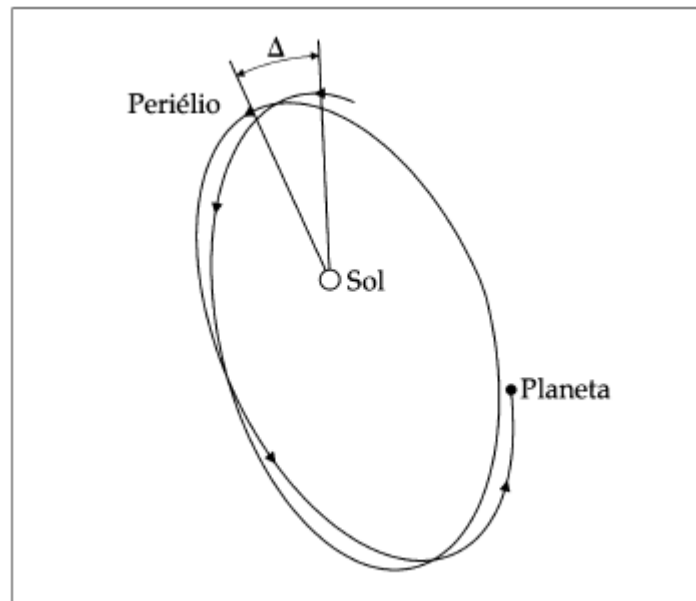
Em 1917, Einstein escreveu seu primeiro artigo sobre cosmologia – marcando o início da moderna cosmologia –, em que foi introduzido, um pouco à força, o termo cosmológico, com o objetivo de se obter um universo estacionário, pois no meio científico acreditava-se que assim deveria ser o universo. O termo cosmológico teve uma vida aventurosa: inicialmente bem-sucedido, chegou depois a ser considerado pelo próprio Einstein “a maior tolice de sua vida”, desapareceu das teorias cosmológicas e reapareceu recentemente para explicar a aceleração na expansão que, segundo as observações mais recentes, o universo parece estar sofrendo. (GAZZINELLI, 2009. P 133.)

3.2.13– AVANÇO DO PERIÉLIO DE MERCÚRIO

O avanço do periélio de Mercúrio é um fenômeno fascinante que desafiou a compreensão científica por décadas, antes de encontrar sua explicação na Teoria da Relatividade Geral de Einstein. Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, possui uma órbita elíptica que sofre um lento avanço de seu ponto mais próximo ao Sol ao longo do tempo. Esse deslocamento, conhecido como avanço do periélio, não pôde ser explicado pelas leis da gravitação de Newton, que dominaram a física por séculos.

Antes da formulação da TRG, um fenômeno bem conhecido dos astrônomos permitiu a Einstein testar suas ideias durante o desenvolvimento da teoria. As órbitas Periélio dos planetas têm um movimento de precessão muito lento em torno do Sol, que pode ser explicado em parte pela perturbação dos outros planetas, mas é em parte inexplicável pela mecânica clássica (Figura 7.14). (...) o avanço do periélio (ponto da órbita de um planeta mais próximo do sol) da órbita de Mercúrio é maior em relação ao dos outros planetas por causa de sua proximidade ao Sol: 1,38” de arco a cada órbita completada. Desse arco, 1,28” se deve à perturbação dos outros planetas e pode ser calculado pela lei de gravitação de Newton, mas 0,10” ficam sem explicação; em um século observa-se, portanto, um avanço em excesso de 43” de arco do periélio. Várias tentativas foram feitas pelos astrônomos para explicar essa anomalia – introdução de um planeta interno à órbita de Mercúrio ou de um satélite deste e até mesmo alteração do expoente der na lei de gravitação de Newton – sem sucesso. Einstein obteve o valor correto do avanço secular (43”) pela aplicação direta de sua teoria, resolvendo assim um problema astronômico que perdurava havia sessenta anos e essa continua a ser a explicação aceita até hoje. (GAZZINELLI, 2009. P 133.)

Figura 16. Precessão do periélio de órbita planetária



Fonte: GAZZINELLI, 2009. P 133

O avanço do periélio de Mercúrio não apenas desafiou e intrigou os cientistas por décadas, mas também desempenhou um papel crucial na validação da Teoria da Relatividade Geral de Einstein, uma das teorias mais influentes e bem-sucedidas já desenvolvidas pela física moderna.

3.2.14– OS BURACOS NEGROS E O TEMPO

Os buracos negros são fenômenos cósmicos fascinantes e misteriosos que desafiam nossa compreensão convencional do tempo e do espaço. Previstos pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, esses objetos extremamente densos exercem uma atração gravitacional tão intensa que nem mesmo a luz consegue escapar de sua influência. No entanto, é a interação entre os buracos negros e o tempo que realmente cativa a imaginação.

Um dos aspectos mais intrigantes dos buracos negros é o que acontece com o tempo em sua proximidade. De acordo com a Teoria da Relatividade Geral, a gravidade intensa de um buraco negro causa uma distorção maciça no tecido do espaço-tempo ao seu redor. Isso resulta em efeitos que desafiam nossa intuição, como a dilatação do tempo. Na vizinhança de um buraco negro, o tempo passa de forma diferente do que estamos acostumados na Terra.

A existência dos buracos negros foi prevista por Oppenheimer e Snyder em 1939. De acordo com a teoria da relatividade geral, se a densidade de um corpo é suficientemente elevada, a atração gravitacional se torna tão forte que nada pode escapar, nem mesmo a luz e outras formas de radiação eletromagnética; é como se o próprio espaço estivesse encolhendo mais depressa do que a luz consegue se propagar. Uma propriedade notável de um corpo desse tipo é que nada do que acontece no interior pode ser comunicado ao resto do universo. Isso ocorre quando o potencial gravitacional na superfície da massa M se torna tão grande que o desvio gravitacional para o vermelho faz com que a frequência da radiação emitida pela superfície se anule. De acordo com a Equação 2-53, a frequência é nula quando o raio de um objeto esférico de massa M

tem o valor crítico $R_G = GM/c^2$. Este resultado é uma consequência do princípio de equivalência, mas a Equação 2-53 é uma aproximação válida apenas para $v \ll c$. Um cálculo mais preciso do valor crítico de R , denominado *raio de Schwartzschild*, leva a um valor duas vezes maior: (TIPLER; LLEWELLYN 2017, p. 123)

$$R_G = \frac{2MG}{c^2} \quad (36)$$

Um fato histórico interessante é que a Equação 2-59 foi proposta pelo físico francês do século XIX, Pierre Laplace, muitos anos antes que os cientistas começassem a falar de relatividade geral e de buracos negros, com base na velocidade de escape v_e de um corpo a partir da superfície de um planeta de raio r e massa M . Usando apenas a mecânica newtoniana e igualando a energia cinética do corpo ao potencial gravitacional na superfície do planeta, é fácil mostrar que a velocidade de escape é dada por (TIPLER; LLEWELLYN (2017, p.123)

$$v_e = \sqrt{\frac{2MG}{r}} \quad (37)$$

De acordo, TIPLER; LLEWELLYN (2017) Fazendo $v_e = c$, obtemos a Equação 3.2.32. Onde na qual, Laplace chegou ao resultado correto depois de não se atentar a dois erros triviais, que, por acaso, se anulavam.

Figura 17. Os cientistas acreditam que sistemas binários constituídos por estrelas de nêutrons ou buracos negros prestes a se fundir podem emitir ondas gravitacionais suficientemente intensas para serem detectadas na Terra.



Fonte: TIPLER; LLEWELLYN (2017, p.124)

CAPÍTULO 4– METODOLOGIA

Por meio da descrição detalhada do público composto por estudantes de ensino médio, selecionados com base nos critérios como idade, nível educacional, onde essa seleção dos participantes teve como objetivo garantir a representatividade e a relevância dos dados coletados para o tema investigado.

4.1 – PÚBLICO ALVO E O LOCAL DA PESQUISA

O público alvo deste trabalho serão os alunos do 3º ano das séries finais do Ensino Médio do Centro Educacional de Tempo Integral - CETI Professora Naíde Lins de Albuquerque, no CETI, no ano de 2023 contava com 8 turmas de 1º ano, 7 turmas de 2º ano, 6 turmas de 3º ano, no total eram 811 alunos matriculados, no entanto 648 cursavam ativamente. Esse Centro Educacional de Tempo Integro, está localizado no Município de Fonte Boa, Estado do Amazonas, Brasil. A cidade de Fonte Boa localiza-se ao oeste da capital Manaus, distantes 676.91 km em linha reta. De acordo com estimativa do IBGE de 2022, sua população é de 27.692 habitantes.

O público deste estudo é composta por alunos do ensino médio regular, especificamente alunos do terceiro ano, turma 01, com faixa etária entre 15 a 18 anos, residentes no Município citado. Esta seleção se justifica pela necessidade de focar em indivíduos com características que possam contribuir significativamente para a compreensão do fenômeno estudado.

A amostra selecionada para esta pesquisa compreendeu um grupo de 30 alunos de uma turma do terceiro ano do ensino médio, pertencentes ao CETI-FONTE BOA. A escolha dessa amostra buscou contemplar uma representatividade significativa da população estudantil nessa pesquisa educacional, considerando a diversidade de contextos escolares.

A amostra foi selecionada com base em critérios específicos, visando representar adequadamente a população e permitir a generalização dos resultados para um contexto mais amplo. Esta seleção ampla e diversificada teve como objetivo primordial capturar uma gama variada de experiências, percepções e opiniões dos alunos do terceiro ano do ensino médio em relação ao tema específico da pesquisa.

4.2– CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

O motivo pelo qual os alunos do terceiro do ensino médio foram escolhidos para fazerem parte dessa pesquisa de dissertação dentro do tema Relatividade Geral, se deu por conta de estarem no último ano do segundo grau. Além do mais, esses alunos tiveram contato com a física, onde foram abordados conceitos sobre o tempo, espaço, movimentos, força e energia, embora pertencentes a física newtoniana. No entanto, com esses conhecimentos prévios em

física clássica, os alunos devem estar mais preparados para compreender os princípios fundamentais da Relatividade Geral.

Alunos que demonstram curiosidade e interesse em conceitos científicos mais avançados podem estar mais dispostos a se envolver e compreender os desafios conceituais da Relatividade Geral. Esses critérios podem ajudar a identificar os alunos mais adequados para serem introduzidos aos conceitos da Relatividade Geral no terceiro ano do ensino médio, garantindo um ambiente de aprendizagem mais propício e eficaz para esse estudo avançado da física.

4.3 – CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Nos primeiros anos do ensino médio, os alunos ainda estão construindo sua base conceitual em física e matemática. A complexidade da Relatividade Geral demanda uma compreensão prévia sólida desses conceitos, que muitos alunos não possuem nesse estágio. A TRG envolve conceitos abstratos e desafiadores. Alunos mais jovens podem não ter desenvolvido completamente as habilidades de pensamento crítico e abstrato necessárias para compreender e apreciar essa teoria. O currículo dos primeiros anos do ensino médio já está preenchido com uma variedade de tópicos e disciplinas. Introduzir a Relatividade Geral nesse estágio poderia comprometer o tempo dedicado a conceitos fundamentais e essenciais.

A Relatividade Geral se baseia em princípios da física clássica e em conceitos matemáticos avançados. A introdução precoce pode ser contraproducente se os alunos não tiverem uma compreensão sólida dos fundamentos necessários. A progressão do ensino, frequentemente, segue uma estrutura que parte de conceitos mais simples para os mais complexos. Introduzir a Relatividade Geral antes que os alunos estejam prontos poderia dificultar a compreensão e o interesse na matéria. Nos primeiros anos do ensino médio, é essencial focar tópicos básicos e fundamentais da física que estabeleçam uma base sólida para a compreensão de conceitos mais avançados.

Esses critérios se baseiam na ideia de que o ensino da RG requer uma base conceitual, cognitiva e de desenvolvimento que normalmente é adquirida mais efetivamente nos estágios posteriores do ensino médio ou em níveis de ensino mais avançados.

4.4 – METODOLOGIA DA PESQUISA

A abordagem do objeto de pesquisa tem caráter qualitativo, com ênfase em uma pesquisa descritiva correlacionada com uma pesquisa bibliográfica. Segundo GERHARDT; SILVEIRA (2009) a pesquisa qualitativa:

não se preocupa com representatividade numérica, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização [...] abordagem qualitativa opõem-se ao pressuposto que defende um modelo único de pesquisa para toda as

ciências, já que as ciências [...] têm suas especificados, o que pressupõe uma metodologia própria. (GERHARDT; SILVEIRA, 2009. p.32).

Dessa forma esse tipo de pesquisa relaciona-se a comprometimento de um determinado grupo de investigação, sendo assim, a pesquisa bibliográfica “tem como base um material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos”. (GIL, 2002, p. 44).

A pesquisa qualitativa busca compreender e interpretar fenômenos sociais complexos através da coleta e análise de dados não numéricos, como entrevistas, observações e análise de documentos. Prioriza a compreensão profunda do contexto e dos significados subjacentes aos dados, permitindo uma exploração detalhada de perspectivas, experiências e relações sociais

A pesquisa qualitativa não se preocupa com representatividade numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização, etc. Os pesquisadores que adotam a abordagem qualitativa opõem-se ao pressuposto que defende um modelo único de pesquisa para todas as ciências, já que as ciências sociais têm sua especificidade, o que pressupõe uma metodologia própria. Assim, os pesquisadores qualitativos recusam o modelo positivista aplicado ao estudo da vida social, uma vez que o pesquisador não pode fazer julgamentos nem permitir que seus preconceitos e crenças contaminem a pesquisa (GOLDENBERG, 1997, p. 34).

Vejamos o que diz DESLAURIERS (1991) sobre o pesquisador dentro da pesquisa qualitativa.

Na pesquisa qualitativa, o cientista é ao mesmo tempo o sujeito e o objeto de suas pesquisas. O desenvolvimento da pesquisa é imprevisível. O conhecimento do pesquisador é parcial e limitado. O objetivo da amostra é de produzir informações aprofundadas e ilustrativas: seja ela pequena ou grande, o que importa é que ela seja capaz de produzir novas informações. (DESLAURIERS, 1991, p. 58.)

Por outro lado, a pesquisa quantitativa busca medir e analisar fenômenos através da coleta e análise de dados numéricos. Utiliza métodos estatísticos para identificar padrões, relações e regularidades nos dados, visando a generalização e a objetividade dos resultados. É especialmente útil para investigar relações de causa e efeito e para testar hipóteses.

Diferentemente da pesquisa qualitativa, os resultados da pesquisa quantitativa podem ser quantificados. Como as amostras geralmente são grandes e consideradas representativas da população, os resultados são tomados como se constituíssem um retrato real de toda a população alvo da pesquisa. A pesquisa quantitativa se centra na objetividade. Influenciada pelo positivismo, considera que a realidade só pode ser compreendida com base na análise de dados brutos, recolhidos com o auxílio de instrumentos padronizados e neutros. A pesquisa quantitativa recorre à linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno, as relações entre variáveis, etc. A utilização conjunta da pesquisa qualitativa e quantitativa permite recolher mais informações do que se poderia conseguir isoladamente. (FONSECA, 2002, p. 20.)

Embora diferentes em suas abordagens e métodos, tanto a pesquisa qualitativa quanto a quantitativa têm seus próprios méritos e são frequentemente combinadas para oferecer uma compreensão mais completa e robusta dos fenômenos estudados.

4.5 – MÉTODO A SER UTILIZADO

Esta pesquisa adotou uma abordagem mista, combinando métodos qualitativos e descritivos para explorar de maneira abrangente Teoria da Relatividade Geral no ano final do

ensino médio. A estratégia metodológica foi delineada considerando os objetivos específicos da pesquisa, buscando fornecer uma compreensão detalhada e holística do fenômeno em estudo.

4.6 – INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

Para realização da coleta dos dados serão utilizados questionários. Para MARCONI e LAKATOS (2003) o questionário é “instrumento de coleta de dados, constituído por uma série ordenada de perguntas, que devem ser respondidas [...]”. A pesquisa possuirá questionários com questões abertas e fechadas.

O questionário apresenta duas principais formas de questão são elas “as questões abertas possibilitam ampla liberdade de resposta. Nas questões fechadas conferem maior uniformidade às respostas e podem ser facilmente processadas” (GIL, 2008, p. 122 a 123).

Para a coleta de dados farei uso de 04 (quatro) questionários, O 1º questionário terá como objetivo colher informações sobre o conhecimento dos alunos acerca da Teoria da Relatividade Restrita e Geral, assim como, realizar-se um diagnóstico dos alunos. O mesmo terá 08 (oito) questões, sendo 6 (seis) perguntas subjetivas e 02 (duas) objetivas.

O 2º questionário terá como finalidade conhecer através da metodologia VARK as preferências de aprendizagens dos alunos.

O 3º buscará traçar através da análise de dados o perfil dos alunos do CETI, Fonte Boa-Am.

O 4º tem como objetivo coletar informações adquirida pelos alunos após aplicação da sequência didática, através de um teste avaliativo.

4.7 – INSTRUMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

Considerando a natureza dinâmica da pesquisa e os avanços metodológicos contínuos, este estudo identifica potenciais instrumentos de análise de dados para pesquisas futuras, visando aprimorar e ampliar a compreensão da relatividade geral no ensino médio.

Vejamos o que diz ANDRADE, (2009) em relação aos instrumentos de coletas de dados:

Instrumentos de pesquisa são os meios através dos quais se aplicam as técnicas selecionadas. Se uma pesquisa vai fundamentar a coleta de dados nas entrevistas, torna-se necessário pesquisar o assunto, para depois elaborar o roteiro ou formulário. Evidentemente, os instrumentos de uma pesquisa são exclusivos dela, pois atendem às necessidades daquele caso particular. A cada pesquisa que se pretende realizar procede-se à construção dos instrumentos adequados. (ANDRADE, 2009, P. 132/133).

Para a análise dos dados coletados nesta pesquisa foi elaborado um questionário com perguntas objetivas e subjetivas, buscando transparecer melhor os resultados, para explorar a realidade dentro do ensino da física moderna, e mais especificamente no contexto da temática da dissertação, que é a relatividade geral no ensino médio.

O uso do questionário como instrumento de análise de dados, é devido que os questionários permitem coletar dados de um grande número de participantes de forma rápida e eficiente. Isso é especialmente útil quando se deseja obter uma amostra representativa da população-alvo, além do mais, fornecem uma estrutura padronizada para as respostas dos participantes, o que facilita a comparação e análise dos dados. Isso ajuda a garantir consistência e confiabilidade nos resultados. Os questionários podem ser projetados para garantir o anonimato e a confidencialidade dos participantes, o que pode encorajar a honestidade e a sinceridade nas respostas. Isso é especialmente importante para questões sensíveis ou pessoais.

Embora os questionários sejam frequentemente associados à análise quantitativa de dados, as respostas abertas dos participantes também podem ser analisadas qualitativamente. Isso permite uma análise mais aprofundada e uma compreensão mais completa dos resultados.

4.8 – METODOLOGIA VARK

A metodologia VARK é uma abordagem inovadora para entender e acomodar os diferentes estilos de aprendizagem dos indivíduos. Desenvolvida por Neil Fleming na década de 1980, a sigla VARK representa quatro modalidades principais de aprendizagem: Visual, Auditivo, Leitura/Escrita e Cinestésico.

Alunos do ensino médio têm estilos de aprendizagem variados. Alguns aprendem melhor visualmente, enquanto outros preferem ouvir, ler/ escrever ou aprender de maneira prática. A metodologia VARK permite adaptar o ensino para atender às preferências individuais de cada aluno, tornando o processo de aprendizagem mais eficaz e envolvente.

Ao oferecer uma variedade de atividades e materiais de aprendizagem que correspondem aos diferentes estilos de aprendizagem, a metodologia VARK pode aumentar o engajamento dos alunos. Eles se sentem mais conectados ao conteúdo quando ele é apresentado de uma forma que ressoa com sua maneira preferida de aprender.

Ao adaptar o ensino para atender às preferências individuais de aprendizagem, os alunos tendem a compreender melhor o conteúdo e a reter informações de maneira mais eficaz. Isso ocorre porque eles estão recebendo informações de uma forma que faz sentido para eles e que é mais fácil de processar.

Ao aprender sobre seus próprios estilos de aprendizagem e como podem adaptar seus métodos de estudo para se adequar a esses estilos, os alunos do ensino médio desenvolvem habilidades de aprendizagem autônoma. Eles se tornam mais conscientes de como aprendem melhor e podem aplicar essas estratégias em diferentes situações de aprendizagem ao longo de suas vidas.

Ao se tornarem aprendizes mais eficazes e autogeridos, os alunos do ensino médio estão melhor preparados para ter sucesso no ensino superior e no mercado de trabalho. Eles desenvolvem habilidades de resolução de problemas, pensamento crítico e comunicação, que são essenciais para o sucesso em ambientes acadêmicos e profissionais.

Dessa forma, a metodologia VARK oferece vantagens significativas para alunos do ensino médio, permitindo uma aprendizagem mais personalizada, engajadora e eficaz. Ao reconhecer e acomodar os diferentes estilos de aprendizagem dos alunos, essa abordagem promove o sucesso acadêmico e o desenvolvimento de habilidades de aprendizagem autônoma que são fundamentais para o futuro dos alunos.

4.9 – ESTRUTURA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

As aulas que compõem essa sequência didática são expositivas e dinâmicas, fazendo uso de ferramentas didáticas como quadro branco, simulações virtuais, imagens ilustrativas, vídeos e atividades experimentais para melhor fixar os conceitos nela abordados, as atividades desenvolvidas estão propostas para 5 aulas, aplicadas em uma turma do 3º do terceiro ano do ensino médio.

A sequência didática não é apenas uma ferramenta de organização, mas também uma estratégia pedagógica que visa tornar o ensino mais eficaz e significativo. Ela permite que os professores planejem suas aulas de maneira lógica, criando um ambiente de aprendizagem que favoreça a compreensão e a retenção dos conteúdos abordados. Além disso, a sequência didática possibilita a inclusão de avaliações contínuas, o que ajuda a monitorar o progresso dos alunos e ajustar as estratégias de ensino conforme necessário. Essa sequência didática fará o uso da metodologia VARK, voltada para a temática do trabalho, onde essa ferramenta educacional buscará analisar a melhor forma que o aluno absorve o conhecimento, seja ela, através do visual, auditivo, leitor/escritor e cinestésico, como será descrito no quadro 2.

Quadro 2. Estrutura da sequência didática

Aula	Conteúdos	Metodologia	Objetivos educacionais	Duração
1ª	Questionários diagnósticos.	Aplicação de dois questionários utilizando material impresso.	O 1º questionário é conhecer o grau de conhecimento que os alunos têm sobre o tema da pesquisa e o 2º é para traçar um perfil para os alunos que fizeram parte da pesquisa.	50 min

2ª	Metodologia VARK	Aplicação do questionário VARK, fazendo uso de material impresso.	Conhecer através do VARK as preferências individuais de aprendizagem para melhorar a eficácia do ensino-aprendizagem.	50 min
3ª	Teoria da Relatividade Restrita	Aula expositiva fazendo de recursos didáticos como: Slide, vídeos, simulações e quadro.	Conhecer os princípios fundamentais da Teoria da Relatividade Restrita.	50 min
4ª	<ul style="list-style-type: none"> • Princípio da equivalência. • Curvatura da luz num campo gravitacional, • Dilatação do tempo. • Curvatura do espaço-tempo. • Avanço do periélio de mercúrio. • Buracos negros 	Transposição didática fazendo uso de slide, vídeos e atividade experimental usando uma cama elástica (pula-pula) para mostrar os efeitos gravitacionais causados pelas diferentes massas dos corpos.	Conhecer os conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral, destacando sua relevância para a compreensão do universo.	50 min
5ª	Teste avaliativo	Aplicação do teste avaliativo através de material impresso.	Avaliar a compreensão e a assimilação dos conteúdos apresentados nas aulas. identificando os pontos fortes e as áreas que necessitam de reforço, a fim de aprimorar o processo de ensino-aprendizagem.	50 min

Fonte: Autoria própria, 2024.

CAPÍTULO 8 – APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

A aplicação desse trabalho em sala de aula, foi feito durante 5 dias no Centro de Tempo Integral -CETI no município de Fonte Boa, Amazonas, Brasil.

Para fazer a aplicação, foi necessário pedir a autorização dos gestores da instituição, assim também como pedido a autorização dos pais dos alunos, para que os mesmos pudessem participar da pesquisa integralmente.

8.1 – PRIMEIRO DIA

No primeiro dia, foram aplicados dois questionários, sendo um questionário diagnóstico e o outro em forma de entrevista, para identificar e traçar o perfil do aluno do Centro Educacional de Tempo Integral – CETI, Fonte Boa, AM. Em relação ao questionário diagnóstico notou-se que os alunos tinham poucos conhecimentos prévios acerca da física moderna, e de forma específica, a teoria da Relatividade Restrita e Geral, tendo em vista que a maioria descreveu ainda desconhecer conceitos relacionados a FMC, onde já se esperava, devido a pouca exploração dos conteúdos relacionados a Física Moderna no ensino médio. no entanto souberam descrever a importância da física no dia a dia de maneira geral.

Em relação ao segundo questionário, perfil do aluno, a princípio, todos os alunos que participaram da pesquisa, estão na faixa etária entre 15 a 18, de acordo com as respostas obtidas no questionário, a classe social descrita pela maioria dos alunos foi pertencente a classe média, embora alguns alunos disseram pertencer a classe média baixa. Nesse primeiro dia foi para conhecer os alunos pertencentes a turma do terceiro ano 01, e averiguar os conhecimentos prévios acerca da temática aplicada na pesquisa.

8.2 – SEGUNDO DIA

No segundo dia foi aplicado questionário VARK foi aplicado no segundo dia, tendo em vista que essa ferramenta metodológica é importante para que nós educadores possamos identificar a preferência de aprendizagem dos alunos, o questionário foi aplicado na sala de mídia (informática) do CETI, onde na qual dispõe de internet nos computadores, já que o questionário é feito de forma online. O questionário demorou um pouco para ser finalizado devido a conexão da internet está lenta, haja visto que no município de Fonte Boa -Am, a internet de boa qualidade ainda é limitada. Assim foi finalizado o segundo dia de aplicação da sequência didática.

8.3– TERCEIRO DIA

No terceiro dia demonstrei através de uma transposição didática, uma aula sobre a Teoria da Relatividade Restrita, buscando explorar a metodologia VARK, pois foi feito uma

análise prévia do questionário aplicado no segundo dia. Nessa aula foram abordados contextos históricos envolvendo a RR, sem o uso das ferramentas matemáticas, com o intuito de promover o ensino aprendizagem do aluno. Sabemos o quão difícil é compreender os conceitos dessa teoria devido sua complexidade, no entanto essa transposição didática foi positiva, pois despertou interesse e curiosidade por parte do corpo discente.

Nessa aula introdutória, foram abordados conceitos de movimento e espaço, algo que os alunos já tinham vistos, de um ponto de vista da física clássica. Durante a aula expositiva foi explorado um pouco da história científica por trás da teoria da relatividade, buscando transparecer quem foram as grandes mentes que contribuíram com gêneses da relatividade, juntamente com seu grande mentor, Albert Einstein. Dessas mentes citadas vale um destaque para o experimento de Michelson e Morley, embora que o experimento não tenha comprovado a existência do “Éter”, mas teve uma grande importância para comunidade científica na época, além desses dois, temos as ideias iniciais de Galileu Galilei dentro dos estudos da Relatividade Restrita. Assim também como as contribuições geniais de Poincaré e Hendrik Lorentz, que de certa forma são injustiçados em alguns livros didáticos, por não serem citados como mentores dessa teoria. Sabemos que é importante mostrar para os alunos, os fatos históricos por trás das teorias científicas.

Durante a aula, notou-se o despertar da curiosidade dos alunos com as demonstrações de vídeos, animações, e a relação dessa teoria com o dia a dia, transparecendo como a ciência e a tecnologia caminham juntas. Ao final, os alunos demonstraram interesse, pois surgiram questionamentos referente a temática abordada, de um ponto de vista, a transposição didática teve aspectos positivos, pois os alunos absorveram bem os conceitos propostos. Dessa forma foi finalizado o terceiro de aplicação.

8.4 – QUARTO DIA

No quarto dia, de aplicação da sequência didática, ainda fazendo o uso da metodologia VARK, diante das quatro formas de aprendizagem, Visual, Auditivo, Leitura/Escrita e Cinestésico, a segunda transposição didática abordou conceitos da TRG, nessa aula procurou-se explorar melhor cada um desses itens citados da metodologia dentro da TRG, no entanto, procurei destacar a aprendizagem referente ao Visual, Auditivo e Cinestésico, pois ao fazer uma análise parcial no resultado do questionário feito online, notou-se que os alunos aprendem mais através das imagens, na utilização de vídeos, simulações, e através da escuta, como palestras e debates, é válido destacar também importância aprendizagem pelo Cinestésico, pois é onde o aluno faz a prática experimental, fazendo o uso da famosa frase “pôr a mão na massa”. E nessa

pesquisa, esse item metodológico (Cinestésico) está entre os mais importantes para aprendizagem do aluno, de acordo com a metodologia VARK.

A aula foi preparada em forma de slide, para ser exposta em um projetor muito sofisticado com tela interativa, o intuito do uso dessa ferramenta tecnológica era despertar o interesse por parte dos alunos. Alguns conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral, como princípio da equivalência, a curvatura da luz num campo gravitacional, dilatação gravitacional do tempo, curvatura do espaço-tempo, avanço do periélio de mercúrio e buracos negros e o tempo foram abordados.

Mostrei os postulados e sua relevância diante da comunidade científica, comentei de forma resumida sobre a vida do grande mentor dessa teoria, Albert Einstein. Além disso, quanto a dilatação temporal, foi feita uma analogia ao filme *Interestelar*, onde inclusive sugerir a eles que assistissem, pois há uma explicação bastante didática em uma das cenas do filme.

Durante aula, houve perguntas, onde a curiosidade surgiu e os alunos puderam interagir de forma dinâmica. As perguntas por parte dos alunos surgiram a partir do momento que comecei expor as aplicações da Teoria da Relatividade Restrita e Geral na área tecnológica e de que forma essas teorias estão presente no nosso cotidiano. Ao falar do GPS (Sistema de Posicionamento Global), uma ferramenta tecnológica usada constantemente no dia a dia e presente em todos os smartphones, que, no entanto, a turma não sabia que essa ferramenta tinha relação direta com a relatividade, ou seja, que essa teoria proposta por Einstein está tão presente no cotidiano.

Exploramos algumas as curiosidades motivacionais relacionada a Relatividade Geral, perguntas como, do que é feito o universo? É possível viajar na velocidade da luz? O que são buracos negros? É possível viajar no tempo? Questões que que podem despertar um interesse e a curiosidade dos alunos. Após finalizada a apresentação, os alunos puderam observar na prática como funciona a deformação do espaço-tempo com a presença de um corpo massivo, onde em sala de aula foi colocado uma cama elástica circular (pula-pula) e no seu centro um objeto com diferentes massas, para que eles pudessem observar como esses corpos de diferentes massas deformam o espaço-tempo. O objetivo era demonstrar na prática através de uma analogia como o fenômeno ocorria, e fazer uma relação com a “nova” gravidade estabelecida na Relatividade Geral de Einstein. Ao despertar a curiosidade da turma, logo surgiram os questionamentos referentes a aula experimental, e esses questionamentos são de certa forma sinônimos de conhecimentos. Essa aula prática contou com a participação direta dos alunos, pois os mesmos foram um exemplo de corpo massivo deformando o espaço-tempo.

Assim finalizamos as aulas, de forma positiva e proveitosa, pois buscou-se demonstrar a Relatividade Geral através da explicação de conceitos, experimentos, exposição de vídeos e simulação, sem a utilização direta das ferramentas matemáticas.

8.5 – QUINTO DIA

No quinto dia de aplicação da sequência didática, foi aplicado o questionário para averiguar o que foi absorvido de conhecimento por parte dos alunos em relação transposição didática feita pelo professor pesquisador. Dessa forma pôde-se observar uma evolução na aprendizagem de maneira significativa no que diz respeito aos conceitos fundamentais sobre a Teoria da Relatividade Geral, sobre sua importância e suas aplicações.

À medida que encerramos nossa exploração da teoria da Relatividade Geral, é emocionante reconhecer como expandiu os horizontes dos alunos sobre o funcionamento do universo, ter noção de como funciona espaço-tempo e a gravidade vista do ponto da Relatividade Geral. Compreender os princípios revolucionários de Einstein não apenas nos desafia a repensar conceitos básicos de tempo, espaço e movimento, mas também nos capacita a mergulhar em um mundo de descobertas científicas e aplicações práticas.

CAPÍTULO 9 – RESULTADOS E ANÁLISES

Faremos a análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos após aplicação da sequência didática, para que possamos obter um panorama do que foi absorvido pelos alunos diante das ferramentas didáticas apresentadas com propósito de inserção da Teoria da Relatividade Geral no ensino médio. Haja visto que esses resultados servirão como base para pesquisas posteriores.

9.1– ANÁLISES DOS QUESTIONÁRIOS

A realização de questionários é uma prática essencial para a coleta de dados em diversas áreas do conhecimento, proporcionando insights valiosos sobre percepções, comportamentos e atitudes dos respondentes. Nesta seção, apresentaremos os resultados e análises finais dos questionários aplicados, com o objetivo de oferecer uma visão detalhada e precisa das informações obtidas.

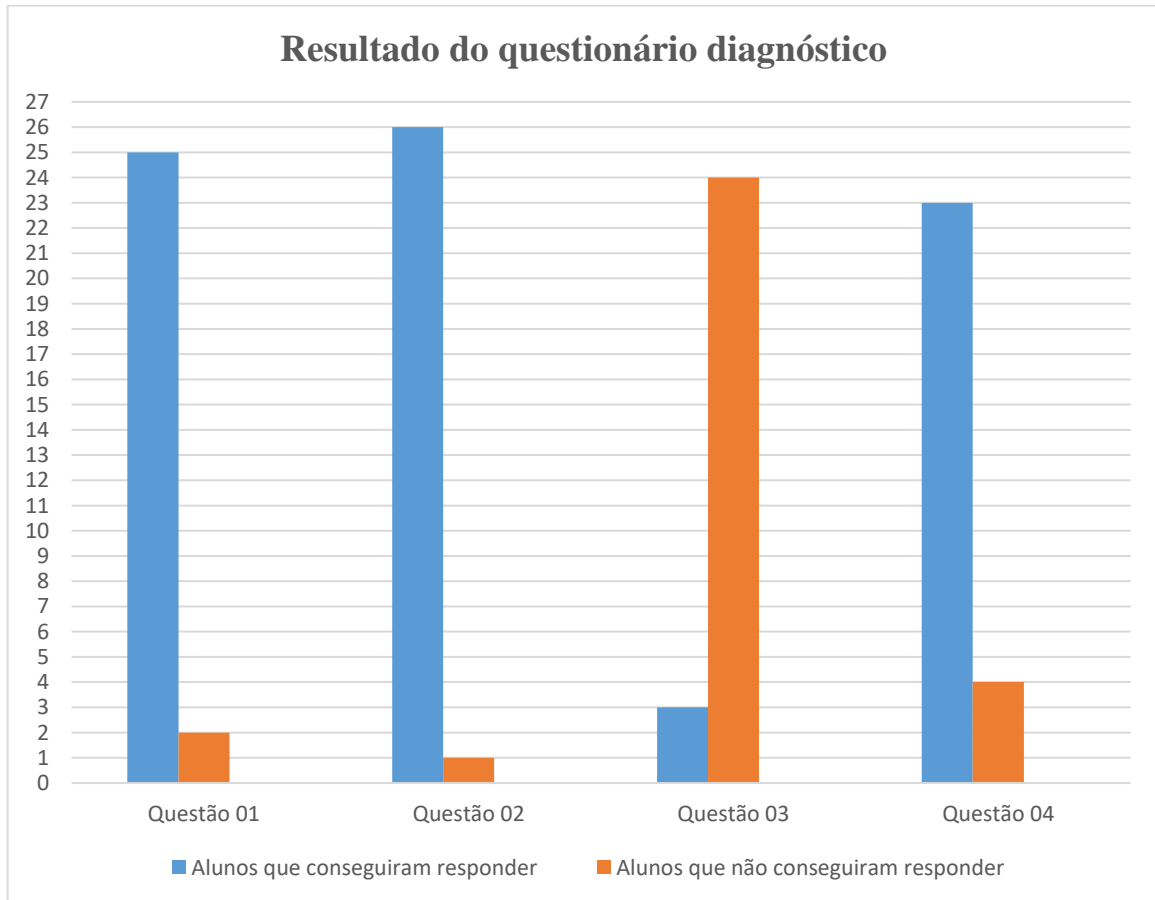
Os questionários foram desenvolvidos com base em critérios rigorosos de validade e confiabilidade, buscando capturar uma ampla gama de respostas relevantes para o nosso estudo. A amostra foi selecionada de maneira criteriosa, garantindo a representatividade dos dados coletados e permitindo a generalização dos resultados para o público-alvo.

Os resultados apresentados a seguir foram analisados utilizando técnicas estatísticas apropriadas, permitindo identificar padrões e tendências significativas. Além disso, serão discutidas as implicações destes resultados no contexto do estudo, bem como possíveis limitações e sugestões para futuras pesquisas.

O primeiro questionário a ser analisado, de acordo com resultados obtidos, será o questionário diagnóstico sobre os conhecimentos prévios dos alunos obtido pelos alunos ao longo dos anos, tendo em vista que a pesquisa foi feita com alunos do terceiro do ensino médio. O questionário diagnóstico foi realizado com alunos da turma 01 do CETI, Fonte Boa, Am. Vinte e sete (27) alunos participaram dessa pesquisa, uma turma de certa forma, pequena. O questionário foi composto por oito questões de nível razoável, onde continham seis (06) questões subjetivas e duas (02) objetivas.

A análise será feita de forma quantitativa e qualitativa, e os resultados serão apresentados através de gráficos, ao todo serão quatro (04) gráficos, o primeiro para o questionário diagnóstico, o segundo para mostrar o perfil dos alunos que participaram da pesquisa, o terceiro para o questionário VARK, e para finalizar, o quarto para o teste avaliativo referente a aprendizagem obtida após aplicação da sequência didática, as questões dos questionários estão disponíveis no apêndice A do produto educacional. Vejamos o resultado do primeiro gráfico.

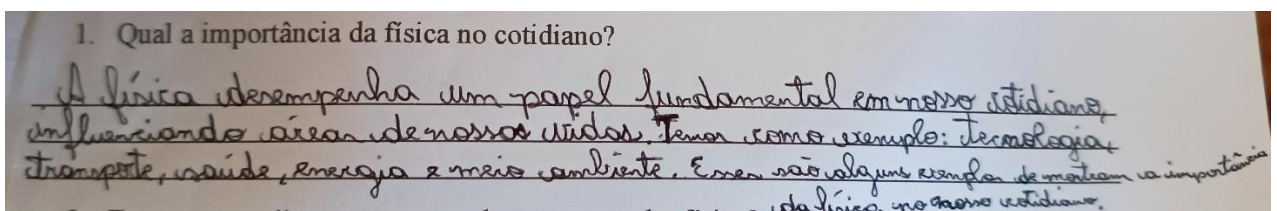
Gráfico 1: Resultado do questionário diagnóstico



Fonte: Autoria própria, 2024.

Iniciamos as análises das 04 (quatro) primeiras questões de 08 (oito) referente ao questionário diagnóstico da pesquisa como objetivo de compreender as principais tendências obtidos a partir das respostas coletadas. A primeira questão se referia a “Qual a importância da física no cotidiano?” e de acordo com o resultado, 25 (vinte e cinco) alunos conseguiram responder, ou seja, esse número corresponde a 92,5% dos alunos da turma, mas apenas 02 (dois) não conseguiram responder, correspondente a 7,5% dos alunos da turma. Isso significa que a maioria dos alunos compreendem a importância da física no dia a dia, pois muitos relacionaram com as leis da natureza, vejamos uma das respostas para o questionamento.

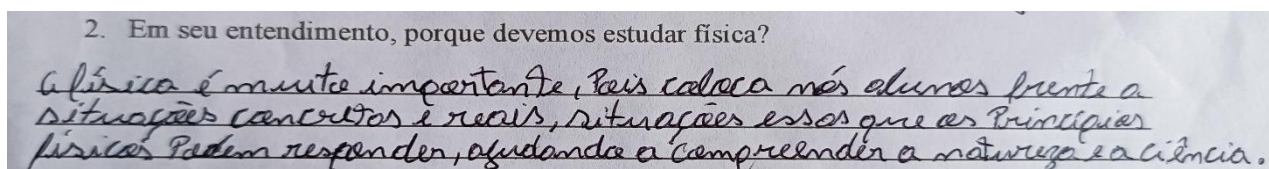
Figura 18: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno.



Fonte: Autoria própria, 2024.

O segundo questionamento buscava verificar “Porque devemos estudar física?” onde 26 (vinte e seis), ou seja, 96,2% dos alunos da turma conseguiram responder, 01 (um) aluno apenas não conseguiu responder, 3,8% do total da turma. Um resultado bastante relevante, pois a física é uma disciplina complexa, no entanto os alunos demonstraram que estudar física tem seu grau de importância. Vejamos uma das respostas para essa pergunta.

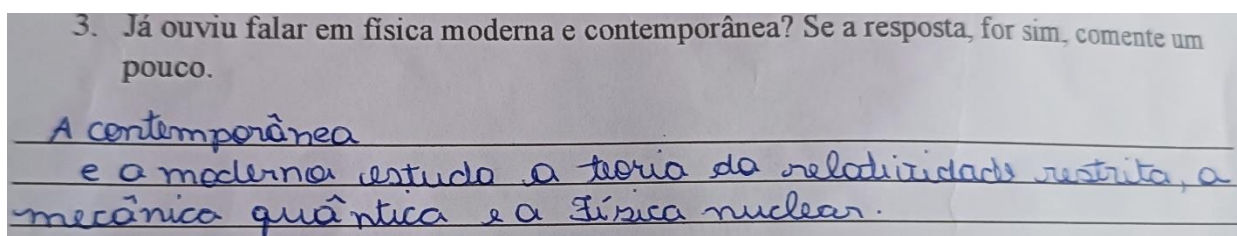
Figura 19: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno



Fonte: Autoria própria, 2024.

A terceira questão, já buscava indagar assunto relacionado a temática da pesquisa, pois direcionava a física moderna e contemporânea, apenas 03 (três) alunos conseguiram responder, 11,1% da turma, os demais 24 (vinte e quatro), alegaram que ainda não tinham ouvido falar sobre o assunto, 88,9% da turma. Diante desse resultado, notou-se que a maioria dos alunos não tinham conhecimento acerca da física moderna e contemporânea, os alunos que conseguiram responder, relataram que conheciam por curiosidade. Vejamos uma das respostas dos alunos que responderam.

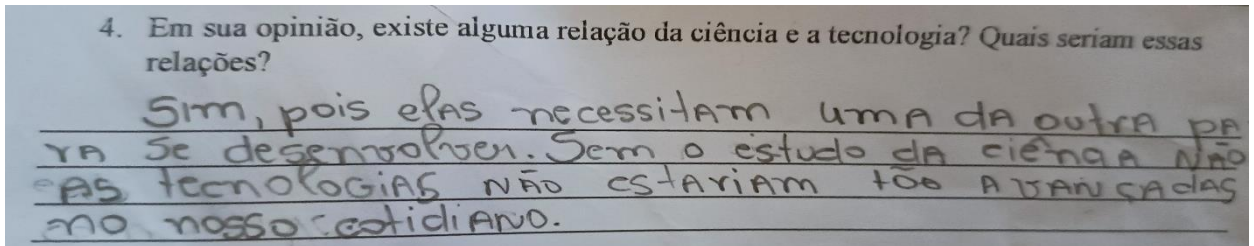
Figura 20: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno.



Fonte: Autoria própria, 2024.

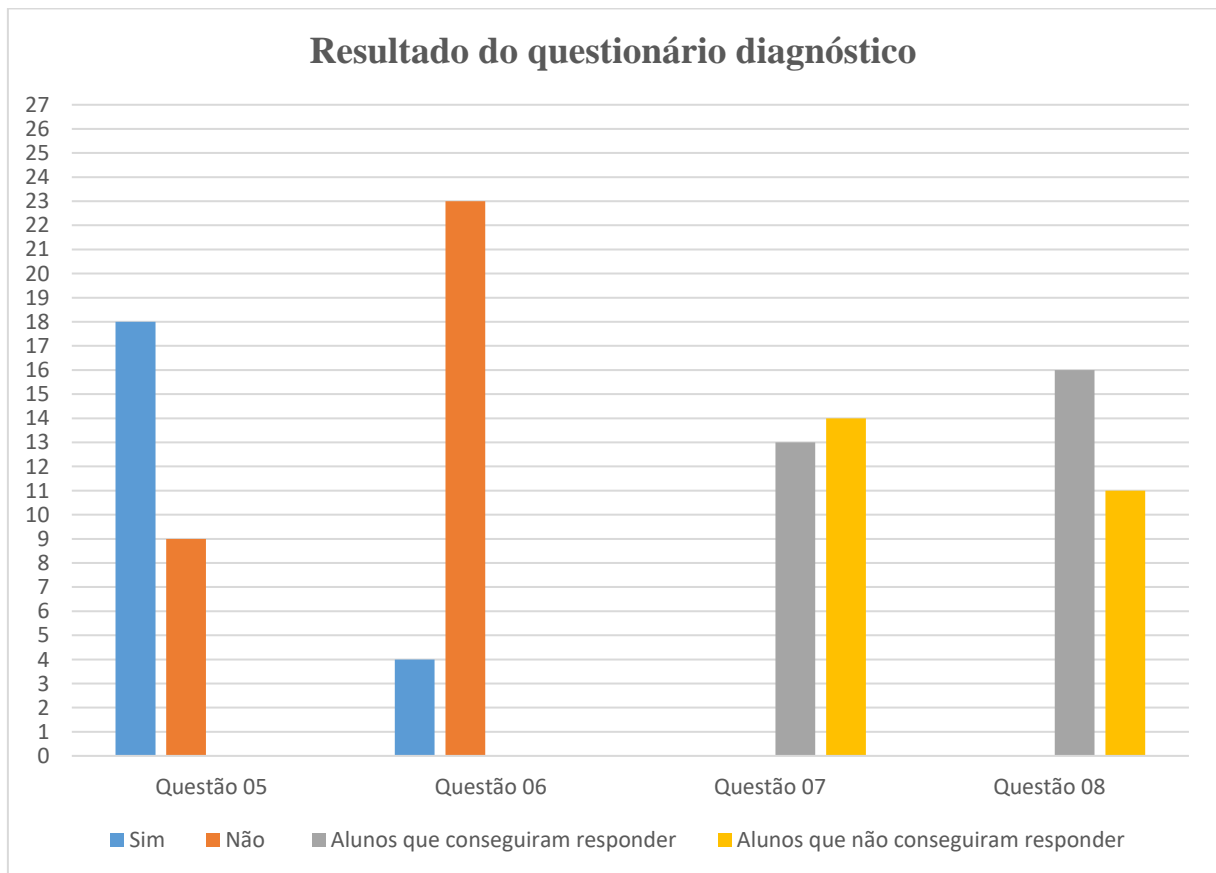
A quarta questão também era subjetiva, buscava questionar a relação ciência com a tecnologia, visando explorar os conhecimentos prévios em função desses dois conceitos importantes para a sociedade. O resultado obtido, foi que, 23 (vinte e três) alunos responderam, fazendo relação importante entre ciência e tecnologia, ou seja, 85,1% da turma buscaram fazer essa analogia, no entanto, 14,9%, 04 (quatro) dos 27 (vinte e sete) da turma não souberam descrever essa relação. Embora seja pouco, os que souberam responder, mas é importante que todos saibam que os avanços tecnológicos são resultados proveniente da ciência moderna. Vejamos a resposta de um dos participantes da pesquisa.

Figura 21: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Gráfico 2: Resultado do questionário diagnóstico



Fonte: Autoria própria, 2024.

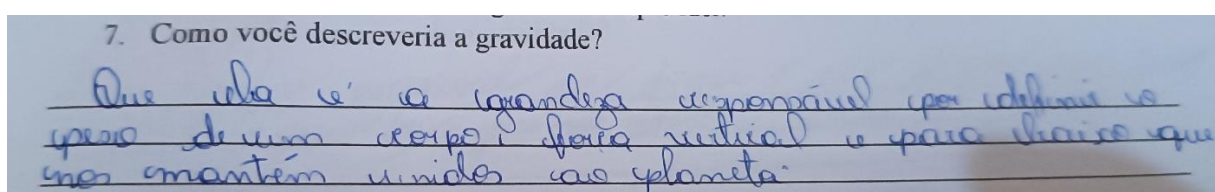
A quinta questão era objetiva, sem muitas complexidades para analisar e responder o questionamento, onde se tratava se os mesmos já tinham ouvido falar no grande gênio Albert Einstein, tendo em vista Einstein revolucionou a ciência de modo a ser reconhecido mundialmente pela sua genialidade. O resultado obtido foi que, 66,6% dos alunos, cerca de 18 (dezoito) correspondente a 27 (vinte e sete) da turma marcaram a opção que SIM, que já tinham ouvido falar em Albert Einstein, no entanto 33,4% da turma marcaram na opção que NÃO tinham ouvido falar sobre ele, isso corresponde a 9 alunos. Uma da explicação para esse resultado, de 33,4% dos alunos não saberem quem é Albert Einstein se dá pelo fato de pouca

exploração dos conteúdos relacionado a física moderna e contemporânea, e mais especificamente a teoria da relatividade.

A sexta questão também era objetiva, e buscava saber dos alunos se eles sabiam explicar algo sobre a teoria da relatividade, porém não especifiquei se era a relatividade restrita ou geral, 04 (quatro) alunos marcaram na opção SIM, que corresponde a 14,9% dos estudantes da turma, os demais 85,1%, 23 (vinte e três) alunos afirmaram que ainda não conhecia essa teoria. Não é difícil de entender o resultado proposto, pois com esse novo ensino médio, a carga horária de física foi reduzida, passando a ter 01(uma) aula por semana, outro ponto importante é que os conteúdos relacionados a relatividade são pouco explorados.

A sétima questão era subjetiva, e tinha como foco a gravidade. Entende-se que os alunos já haviam estudado a respeito desse conceito, embora que seja a gravidade proposta por Isaac Newton, o resultado mostra que 13 (treze) alunos conseguiram descrever algo relacionado ao conceito de gravidade, mas 14 (quatorze) deles não souberam argumentar algo associado a conceito proposto. Esse resultado se tornou bastante relevante, simplesmente porque a gravidade é um dos conceitos chaves na relatividade geral, sabendo que apenas 48,1% dos alunos descreveram sobre a mesma, ou seja, menos da metade, seria um desafio mostrar um conceito complexo e fazer com que os mesmos tivessem uma visão mais refinada sobre a gravidade. De acordo com os dados, 51,9% da turma não entendia o que é gravidade, conclui-se então. que os conhecimentos prévios dos alunos estavam um pouco abaixo. Vejamos como foi descrita a gravidade por um dos discentes.

Figura 22: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno.

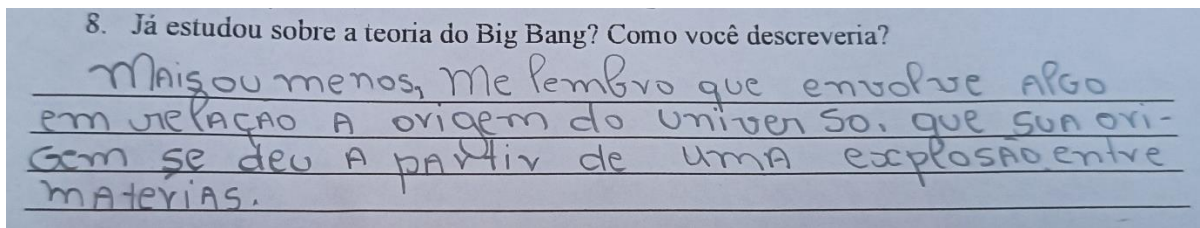


Fonte: Autoria própria, 2024.

A oitava e última questão do questionário diagnóstico para identificar os conhecimentos prévios dos alunos, era relacionada ao universo, especificamente a teoria do Big Bang, a questão buscava explorar como o aluno descreveria essa teoria referente a criação do nosso universo. Os resultados apontam que 59,2% conseguiram descrever sobre essa teoria, essa porcentagem corresponde a 16 (dezesesseis) alunos, e 40,2% não souberam descrever a respeito dessa teoria, número correspondente a 11 (onze) alunos dos 27 (vinte e sete) que participaram dessa pesquisa introdutória. A teoria do Big Bang, até então é a mais aceita no que diz respeito a origem do nosso universo, fazendo uma análise, mais da metade colocaram o que sabiam a respeito da

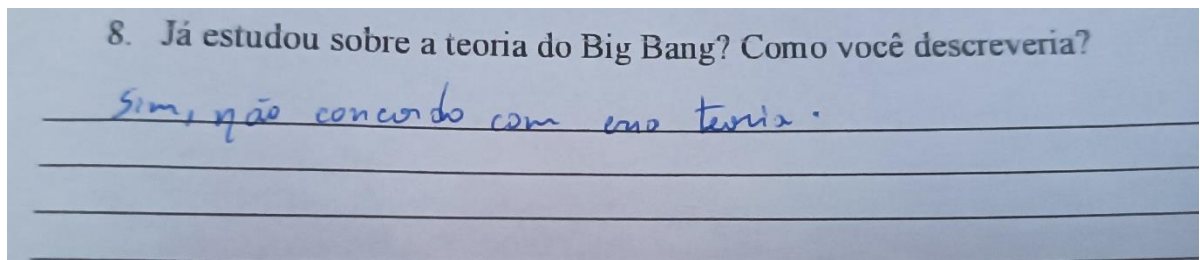
teoria, assim demonstrando na ao descrevê-la, os demais não souberam descrever a mesma, uma resposta curiosa, por parte de um discente, é que ele já havia estudado sobre, mas “não concordava com a teoria”, e quando se trata de algo sobre o universo, é tudo muito complexo, e essa complexidade traz desconfianças, e assim causando um debate de conhecimentos, com argumentos que podem convencer ou não, cabe o professor fazer essa mediação entre os alunos. Vejamos duas respostas dos discentes a respeito da teoria do Big Bang.

Figura 23: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno



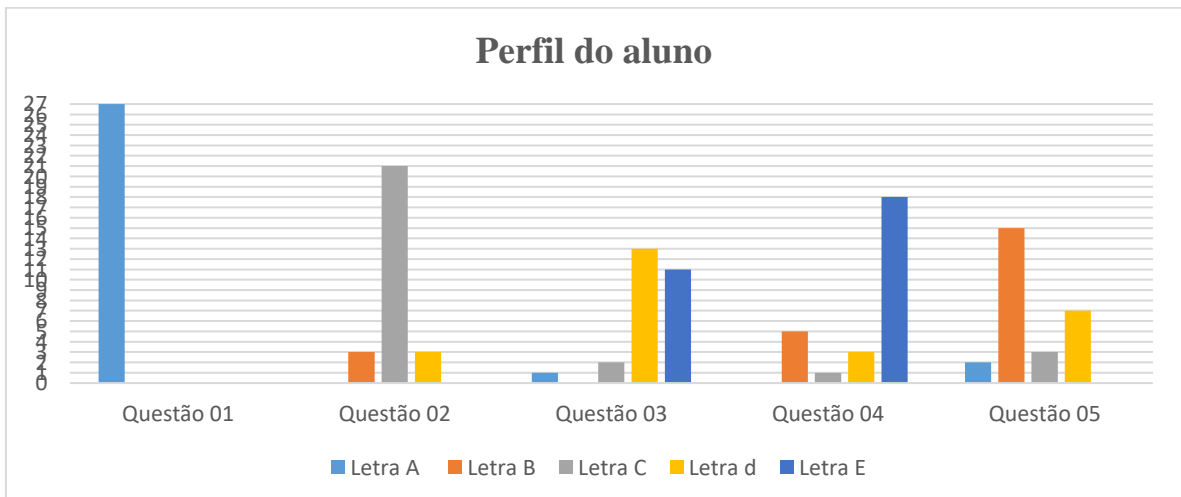
Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 24: Respostas da primeira questão do questionário diagnóstico feita por um aluno.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Gráfico 3: Perfil do aluno do CETI, Fonte Boa- Am.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Faremos análise do perfil dos alunos que participaram da pesquisa para essa dissertação. Para compreender o perfil do aluno, é essencial considerar uma gama de fatores que incluem suas características pessoais, histórico acadêmico, e comportamental, além de suas

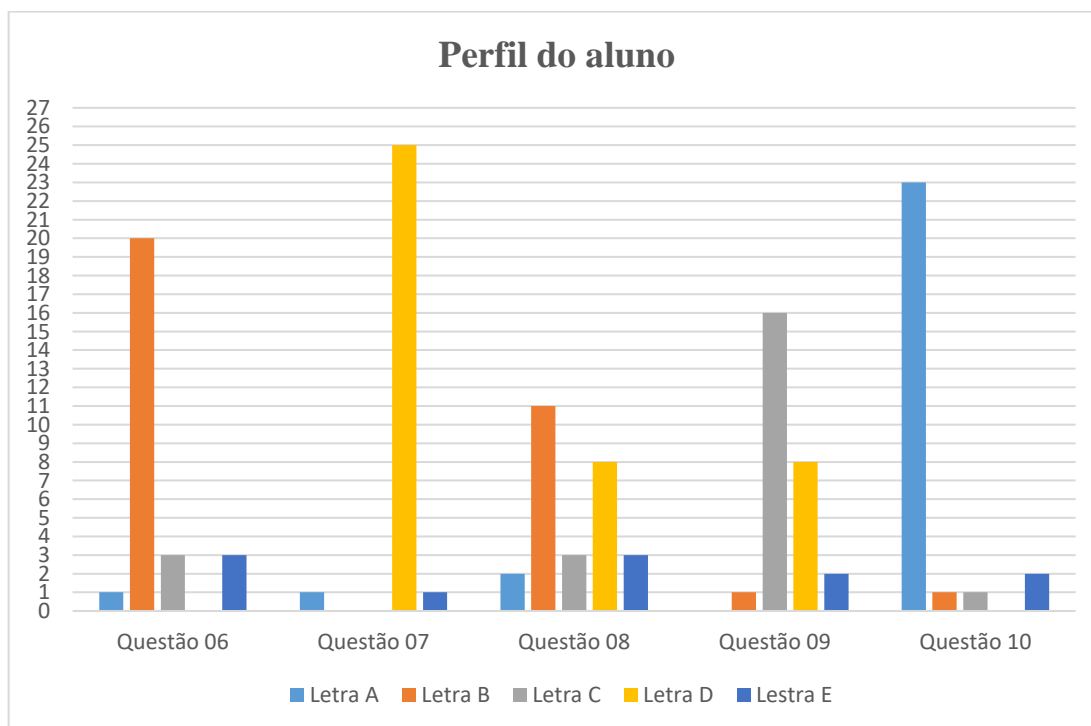
necessidades e aspirações educacionais. O questionário para traçar o perfil dos alunos é composto por 10 (dez) questões, faremos a análise de cada uma.

A primeira questão era refere-se a faixa etária dos alunos, e 100% (27 alunos) da turma como mostra no gráfico 03 marcou na opção A, indicando a faixa etária que varia entre 15-18 anos, onde era de se esperar se tratando de ensino médio regular. A segunda questão era direcionada a classe social, dividida entre classe baixa, classe média alta, classe média, classe média alta e classe alta. Dos alunos, 11% (3 alunos) diz ser pertencente a classe média baixa (alternativa B), 78% (21 alunos) diz pertencer a classe média (alternativa C), e 11% (3 alunos) diz pertencer a classe média alta (alternativa D). Quando perguntados sobre o nível de formação acadêmica (questão 03) dos seus pais, 3,7% (01 aluno) marcou na opção correspondente a ensino fundamental incompleto, 7,4% (2 alunos) marcaram na alternativa referente a ensino médio incompleto, 48,2% (13 alunos) marcaram na alternativa que os pais já tinham o ensino médio completo, 40,7% (11 alunos) na alternativa onde os pais já tinham o ensino superior completo.

A quarta questão, era sobre o nível de formação acadêmica que o aluno almeja alcançar, 18,6% (05 alunos) da turma optaram pela alternativa B, só queriam apenas o ensino médio, é lamentável, mas faz parte da nossa realidade, 3,7% (01 aluno) optou pelo curso técnico, marcando na alternativa C, o curso técnico ganhou bastante espaço no cenário educacional por ter cursos que podem ser finalizados em períodos curtos e trazer empregabilidade. 11 % (03 alunos) foram na alternativa D, optando pelo ensino superior, e 66,7% (18 alunos) mostraram queriam pós graduação, marcando na opção E.

Na quinta questão, 7,5% (2 alunos) considerava que sua formação acadêmica estava de acordo com suas aspirações marcando na opção A, 55,5% (15 alunos) afirmaram que precisa de mais estudos para atingir suas metas (alternativa B), 11% (03 alunos) considera que sua formação acadêmica já era o suficiente para suas ambições profissionais, marcando na alternativa C, e 26% (07) alunos considera que ainda estão indecisos (as) sobre o que deseja. O resultado dessa questão nos dar um panorama da realidade de muitas escolas, não só do Amazonas, mais do Brasil também, onde poucos estudantes de ensino médio procuram estabelecer metas para continuar sua carreira acadêmica e almejar uma formação melhor.

Gráfico 4: Perfil do aluno do CETI, Fonte Boa- Am.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Continuando a análise, o gráfico 04 mostra o resultado das 05 (cinco) últimas questões do questionário referente ao perfil do aluno. Quando perguntados como os alunos preferem adquirir um novo conhecimento, 4% (01 aluno) marcou na alternativa A, que prefere aprender através de livros e leitura individual, 74% (20 alunos) disseram através da alternativa B, que preferem adquirir conhecimento participando das aulas presenciais, 11% (03 alunos) acredita que assistindo vídeos e cursos online (opção C) é uma alternativa para adquirir um novo conhecimento, 11% (03) afirmaram que preferem outra opção (alternativa E), mas não especificaram a outra forma de aprender.

A sétima questão, se referia a ocupação dos alunos, se eles tinham um trabalho (emprego), 4% (01 aluno) marcou na opção A, alegando que trabalha meio período, 92% afirmaram que são estudante em tempo integral, 4% (01 aluno) marcou na alternativa E, onde o aluno diz que é estudante em meio período. É notório que a maioria dos estudantes se dedicam apenas aos estudos, e de certa forma isso é positivo, pois trabalhar e estudar é desgastante para qualquer ser humano, mas essa realidade talvez possa mudar para muitos ao entrarem na faculdade, sabemos que ensino médio e faculdade são sistema educacionais muito diferentes.

O oitavo questionamento ganha uma relevância em termos de importância, pois se tratava da área de interesse profissional que mais atraia os estudantes no momento, 7,4% (2 alunos) marcaram na alternativa A, que se referia a área das ciências exatas (matemática, física,

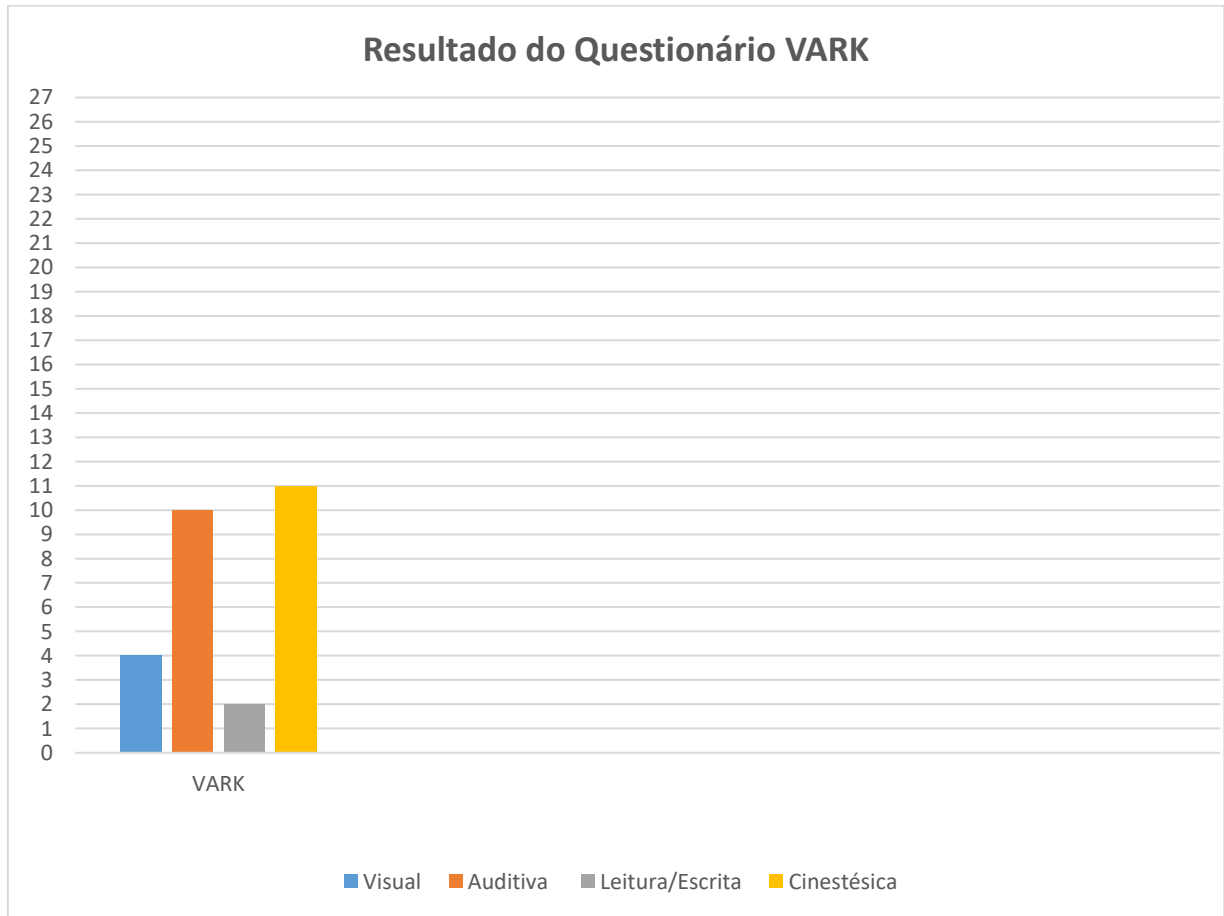
química e outras), 41% (11 alunos) afirmaram que suas pretensões estavam voltadas para a área das ciências biológicas (biologia, medicina e outras) assim, marcaram na alternativa B, 11% (03 alunos) optaram pela alternativa C, que no caso era das ciências humanas (história, psicologia e outras), 29,6% (08 alunos) alegaram que a área de interesse estava voltada para engenharia e tecnologia, marcando na alternativa D, a alternativa E era referente a arte e cultura e 11% (03 alunos) mostraram que se sentiam atraído por essa área profissional. Ao analisar esse resultado, note que os alunos estão perdendo o interesse por ciências da natureza, aí surge uma série de questionamentos a respeito dessa falta de interesse, mas vale ressaltar que todas as profissões são dignas, no entanto o professor tem um papel importante em sala de aula, principalmente de cativar e motivar seus alunos.

A nona questão se referia a programas de assistência estudantil ou bolsa de estudo, 3,7% (01 aluno) marcou na alternativa B, que já tinha participado no passado, 59,3% (16 alunos) marcaram na alternativa C, afirmando que nunca tinham participado de programas de assistências ou bolsas de estudos, 29,6% (08) marcaram na alternativa D, que não tinha participado, mas tinham interesses, 7,4% (02 alunos) marcaram na alternativa E, demonstrando que não tinham nenhum interesse em participar desses programas ou bolsas de estudos.

A décima e última questão do questionário averiguava quem era os responsáveis pelas decisões acadêmicas e profissionais dos discentes, 85,2% (23) dos alunos, afirmaram que são seus pais ou responsáveis (alternativa A), 3,7% (01) dos alunos afirmou que eram seus professores ou orientadores educacionais (alternativa B), 3,7% (01) dos alunos afirmou que eram os amigos e colegas (alternativa C), e 7,4% (02) dos alunos alegou outra fonte, mas não especificou (alternativa E).

Dessa forma, com base na análise realizada, podemos concluir que os alunos apresentam um perfil que combina com os pontos fortes e áreas em desenvolvimentos, sugerindo estratégias personalizadas para maximizar seus potenciais acadêmico pessoal, portanto o perfil da turma 01, terceiro ano do ensino médio estão em uma faixa etária de que varia de 15 a 18, pertencente a grande maioria a classe média, onde os pais tem ensino médio completo, embora muitos terem ensino superior também, esses alunos tem pretensões de chegar a pós graduação, mas necessitam estabelecer um plano de estudo para atingir suas metas e esse aprendizado será adquirido, segundo eles, através de aulas presenciais, pois suas ocupações estão voltadas para os estudos acadêmicos, pois a área de interesse mais escolhida foi as ciências biológicas, biologia, medicina e outras. São alunos que de certa forma nunca participaram de programas de assistências estudantil ou bolsa de estudo, pelo menos a maioria não e que são os pais ou responsáveis pelas decisões acadêmicas e profissionais dos mesmos.

Gráfico 5: Resultado do questionário VARK



Fonte: Autoria própria, 2024.

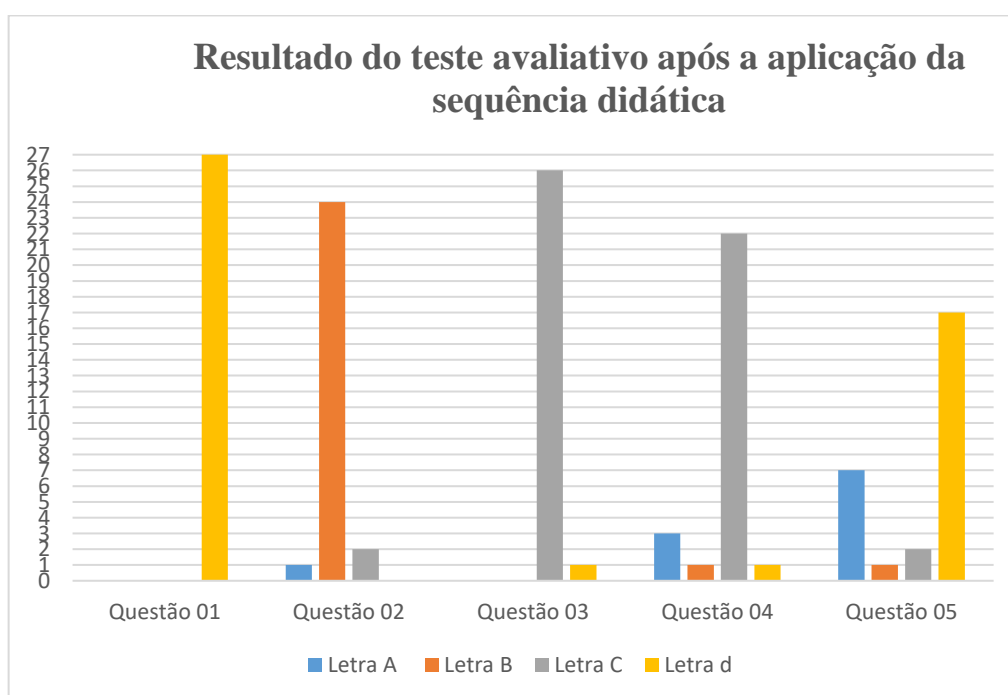
Iremos iniciar a análise do questionário VARK, iremos explorar as preferências de aprendizagem do aluno para identificar o estilo predominante e, assim, proporcionar estratégias educacionais mais eficazes e personalizadas.

Como já colocado, participaram da pesquisa 27 alunos e o objetivo da utilização dessa metodologia é justamente para identificar o estilo de aprendizagem de cada aluno, ou até mesmo fazer um balanço geral da forma que a turma assimila melhor os conteúdos aplicados, dos resultados obtidos dos 27 (vinte e sete) alunos, 02 (dois) mostraram que a forma predominante para assimilar melhor um conteúdo é utilizando a Leitura/Escrita, 04 (quatro) mostraram que aprendem melhor através do Visual, 10 (dez) mostraram que aprendem melhor através do Auditivo, 11(onze) mostraram que aprendem melhor através da Cinestésica. Dessa forma, podemos concluir que a forma predominante pelos alunos é a Cinestésica, pois 40,7% mostraram que nessa característica a aprendizagem torna mais fácil, tendo em vista que essa característica de aprendizagem é quando o alunos observa a prática e até mesmo faz experimentos para comprovar a existências dos conceitos formulados, seja em física ou em outra disciplina, um outro aspecto dentro da metodologia VARK é o Auditivo, onde 37% dos

alunos demonstraram essa característica, que aprendem melhor ouvindo, ou seja, o Auditivo pode ser trabalhado através de palestras, discussões, debates, ou podcasts, para que o aluno desenvolva principalmente o senso e desperte a curiosidade dentro dos conteúdos que estão sendo trabalhados. A categoria que ficou em terceiro do modelo de aprendizagem foi o Visual, 7,5% dos alunos se encaixam dentro dessa forma de aprendizagem, que não deixa de ser importante também.

A metodologia VARK, é uma ferramenta pedagógica inovadora e importante para o cenário educacional atual, permitindo que o docente conheça melhor as preferências ou estilo de aprendizagem de seus alunos, dessa forma facilitando o ensino-aprendizagem. Embora essa metodologia útil, é importante lembrar que os alunos podem se beneficiar de uma combinação de estilos. O objetivo não é limitar o ensino a um único estilo, mas sim diversificar as abordagens para criar um ambiente de aprendizagem mais inclusivo e eficaz. Portanto, enriquecer o processo educacional, tornando-o mais adaptado às necessidades dos alunos.

Gráfico 6: Resultado do teste avaliativo após a aplicação da sequência didática.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Faremos agora a análise dos dois últimos gráficos, que tem o grau de importância assim como os anteriores, no entanto com uma relevância bem maior, por se tratar do teste avaliativo feito após aplicação da sequência didática, após a análise iremos saber o que foi absorvido pelos alunos durante esse processo de ensino-aprendizagem. O teste era composto por 10 (dez) questões, sendo oito (08) objetivas e 02 (dois) subjetivas, as questões eram todas voltadas para a Teoria da Relatividade Geral buscando explorar a absorção de conhecimento por parte dos

alunos. O teste que foi aplicado, assim como os outros estarão no final dessa dissertação, a primeira questão, que veremos a seguir, era voltada para o autor dessa teoria Albert Einstein.

Figura 25: Questão 1 do teste avaliativo

1. **O Físico Alemão Albert Einstein criou a seguinte teoria.**
 - a) **Teoria da Evolução.**
 - b) **Teoria da Eletricidade.**
 - c) **Teoria do Eletromagnetismo.**
 - d) **Teoria da Relatividade**

Fonte: Autoria Própria, 2024.

Para essa questão tivemos 100% de acerto, apesar de ser uma questão teoricamente simples para quem conhece a teoria da relatividade, no entanto para alunos que ainda não tinham tido contato com os conceitos dessa teoria e a trajetória de Einstein se tornava difícil, mas a turma se saiu muito bem. A seguir veremos a segunda questão, que já entrava diretamente em um dos conceitos da relatividade geral.

Figura 26: Questão 2 do teste avaliativo

2. **A Relatividade Geral é uma teoria que descreve:**
 - a) **Como a eletricidade e o magnetismo interagem.**
 - b) **Como a gravidade funciona e sua relação com a curvatura do espaço-tempo.**
 - c) **Como as partículas subatômicas se comportam.**
 - d) **Como a luz se propaga no vácuo.**

Fonte: Autoria Própria, 2024

Nessa questão 88,8% da turma acertou, ou seja, dos 27 (vinte e sete), 24 (vinte e quatro) acertaram, apenas 03 (três) cometeram o equívoco, como já foi comentado, implementar uma teoria complexa como a Relatividade Geral no ensino médio é um grande desafio, entretanto a maioria dos alunos compreenderam um dos conceitos fundamentais dessa importante teoria, vale ressaltar que o objetivo de explorar esses conceitos no ensino médio é para que os alunos possam ter contato com a parte científica por trás dessa revolucionária teoria criada por Albert Einstein. Vejamos agora a terceira questão, que buscava averiguar o que eles tinham compreendido sobre a gravidade, de acordo a Relatividade Geral.

Figura 27: Questão 3 do teste avaliativo

3. **De acordo com a relatividade geral, a gravidade é resultado de:**
 - a) **Partículas subatômicas em constante movimento.**
 - b) **A interação entre campos magnéticos.**
 - c) **A curvatura do espaço-tempo causada por massa e energia.**
 - d) **O atrito entre objetos em movimento.**

Fonte: Autoria própria, 2024

É importante para o aluno compreender esses conceitos relacionado gravidade, para que o mesmo possa diferenciar a gravidade de Newton da gravidade de Einstein, 96,3% dos alunos acertaram essa questão, sabendo escolher a opção correta de acordo com os conceitos aplicados durante a sequência didática, apesar de apenas 01 (um) aluno ter errado a questão, podemos dizer que a aprendizagem foi significativa para um questionamento de boa expressão conceitual. A quarta questão do teste era sobre qual o efeito da gravidade na passagem do tempo, dentro dos conceitos formulados pela relatividade geral.

Figura 28: Questão 4 do teste avaliativo

4. Qual é o efeito da gravidade na passagem do tempo, de acordo com a relatividade geral?
- A gravidade não afeta a passagem do tempo.
 - A gravidade faz o tempo acelerar.
 - A gravidade faz o tempo passar mais devagar em regiões em com o maior campo gravitacional.
 - A gravidade faz o tempo parar completamente.

Fonte: Autoria própria, 2024.

A dilatação temporal é uma realidade e está presente no nosso dia a dia com sua aplicação direta nos satélites de GPS, dessa forma se faz necessário a exploração desse conteúdo, além do GPS, a dilatação tempo está presente nos buracos negros, um fenômeno complexo e ao mesmo tempo fascinante que desperta a curiosidade por partes dos alunos. Para a questão quatro (04) tivemos 81,4% de acertos, uma porcentagem gratificante para o entendimento em relação ao questionamento feito, tendo em vista que dos 27 (vinte e sete) alunos, apenas 05 (cinco) erraram a questão. Para que o aluno possa assimilar melhor o conceito de dilatação temporal, podemos pedir para que o aluno use sua imaginação onde ele possa fazer um experimento mental, nesse experimento o aluno pode imaginar um astronauta que viaja próximo de um buraco negro, uma região onde a gravidade tem uma grande intensidade, e depois ele volta para terra. Para ele, o tempo teria passado normalmente, mas para as pessoas na terra, ele teria envelhecido muito menos do que quem ficou na terra. Uma boa didática para ajudar na compreensão desse conceito aplicado. Vejamos a quinta questão.

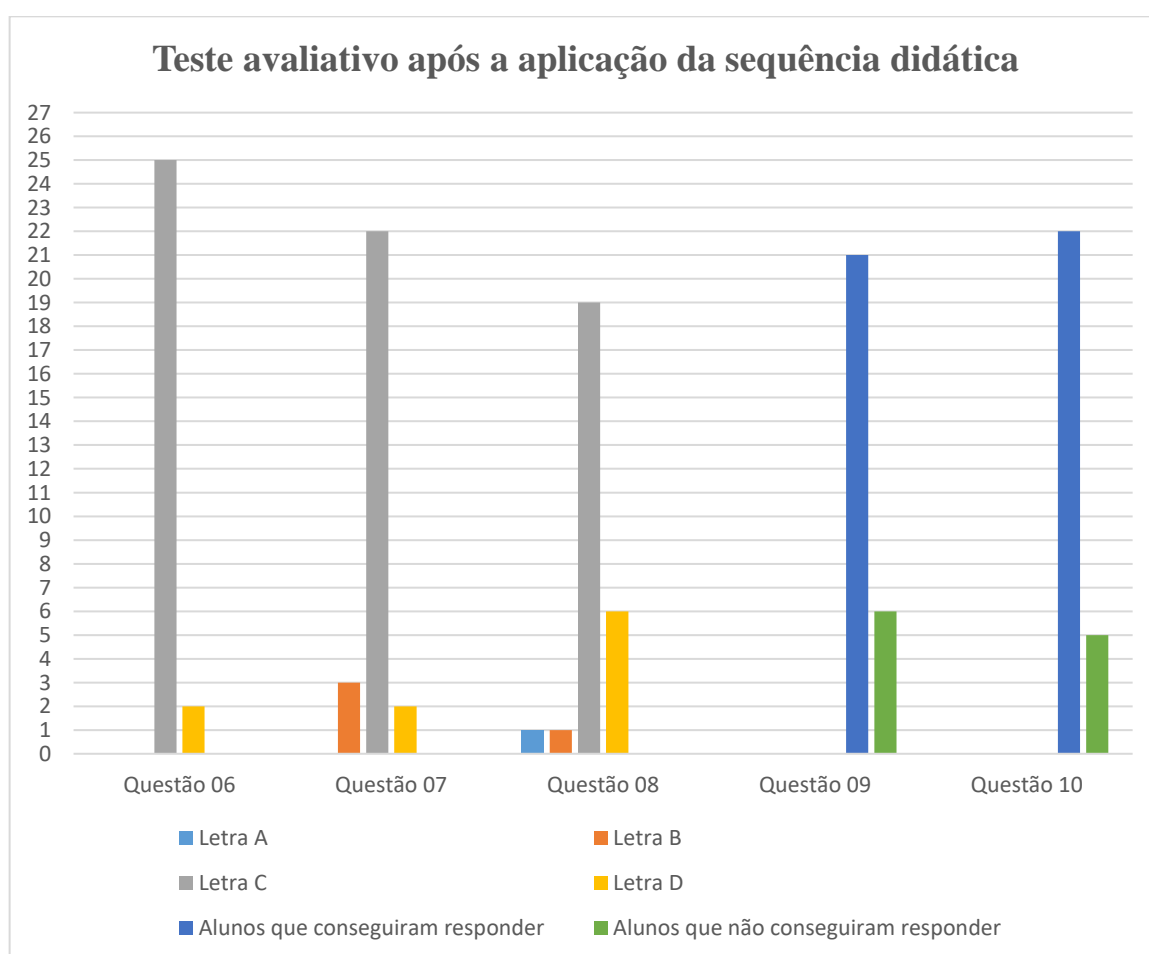
Figura 29: Questão 5 do teste avaliativo

5. O que acontece com a luz quando ela passa próximo a um objeto massivo, como uma estrela ou planeta?
- A luz é acelerada.
 - A luz muda de cor.
 - A luz é repelida.
 - A luz é desviada de sua trajetória original devido à curvatura do espaço-tempo.

Fonte: Autoria própria, 2024

Essa questão foi elaborada para explorar o conceito de lentes gravitacionais que é uma das previsões da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, fenômeno na qual a luz é desviada devido a curvatura do espaço-tempo. O resultado dessa questão nos dar uma visão reflexiva de como mostrar esse conteúdo para que o aluno possa melhor entender o que está sendo abordado, apenas 63% da turma acertaram, 17 (dezessete) alunos apenas, apesar de mais da metade, mas devemos levar em conta os 10 (dez) alunos que erraram a questão, pois se trata de um número significativo. Embora se trate de um conceito complexo, mas pode ser melhor explorado pelo professor em sala de aula, para haja uma melhor aprendizagem.

Gráfico 7: Resultado do teste avaliativo após a aplicação da sequência didática



Fonte: Autoria própria, 2024.

Faremos a análise da segunda parte do teste, da sexta questão até a décima. A seguir temos a sexta questão.

Figura 30: Questão 6 do teste avaliativo

6. O que é um buraco negro?
- Uma região do espaço com gravidade zero.
 - Uma região do espaço onde a luz viaja mais rápido.
 - Um objeto onde a gravidade é tão forte que a nem mesmo a luz pode escapar.
 - Uma área onde a gravidade não exerce efeito.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os buracos negros são uma das aplicações da dilatação gravitacional do tempo, por sua vez se trata de um fenômeno espacial que são objetos de estudo para muitos pesquisadores na área, e uma das características que sabemos a respeito é que a gravidade é tão forte que nem a luz passa despercebida, isso se torna intrigante e ao mesmo tempo fascinante, dessa forma nesse teste não poderia deixar de colocar uma questão relacionada a buraco negro, e surpreendentemente 92,5% da turma tiveram acerto nessa questão, mostrando que a transposição didática foi proveitosa, onde 25 (vinte e cinco) alunos entenderam um pouco do que se trata um buraco negro. A sétima questão indaga a relação da curvatura do espaço-tempo pela gravidade na visão de Albert Einstein.

Figura 31: Questão 7 do teste avaliativo

7. Qual é o papel da curvatura do espaço-tempo na explicação da gravidade pela relatividade geral?
- Não tem papel nenhum.
 - Ela causa repulsão entre os corpos.
 - Ela cria uma força de atração entre os corpos.
 - Ela determina como os corpos se movem em uma linha reta.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Mostrar para os alunos didaticamente como funciona essa curvatura do espaço-tempo causado por objetos massivos é essencial para que os mesmos possam compreender da melhor forma possível, um exemplo na prática que pode ser feito em sala é você usar uma folha de borracha simbolizando o espaço, e algumas bolas de diferentes tamanhos, a bola que tem mais massa ficaria no centro fazendo uma analogia com o sol, as demais bolas de menor massa seriam os planetas, assim a bola com mais massa por analogia causaria essa deformação no tecido espaço-tempo, as demais girariam ao redor, mostrando assim o papel da curvatura. Nessa questão abordada tivemos 81,4% de acertos por parte da turma, que buscaram relacionar esse papel da curvatura espaço-tempo com uma força de atração exercida pelos corpos de diferentes massas. Para que haja o ensino-aprendizagem se faz necessário o uso de ferramentas pedagógicas acessível ao entendimento dos alunos. A oitava e última questão objetiva,

direcionava seu questionamento para a contribuição da relatividade geral para com a gravidade do ponto de vista de Isaac Newton, como veremos.

Figura 32: Questão 8 do teste avaliativo

8. Como a relatividade geral contribuiu para compreensão da gravidade em comparação com a teoria da gravitação de Newton?
- a) Ela não oferece nenhuma contribuição adicional.
 - b) Ela substituiu completamente a teoria de Newton.
 - c) Ela expande e refina a teoria de Newton para incluir a curvatura do espaço-tempo.
 - d) Ela contradiz completamente a teoria de Newton.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Na última questão objetiva, tivemos 70% de acertos, 19 (dezenove) alunos de acordo com o resultado, entenderam essa contribuição da relatividade geral na clássica gravitação de Newton, é importante que o aluno entenda também, que a gravidade de Isaac Newton não foi excluída ou que ela não tem aplicações, o que Einstein fez foi expandir essa teoria, aprimorando a compreensão da gravidade dada pela teoria de Newton, a gravitação de Newton está presente na queda dos objetos na terra, órbitas de satélites artificiais, lançamentos de foguetes e entre outros, é sempre importante o professor esclarecer os fatos para que não haja confusão de conceituais por parte dos alunos. Chegamos na nona questão, que se trata de uma questão subjetiva e pedia para os alunos descreverem de acordo com seus entendimentos como passa o tempo em presença de diferentes campos gravitacionais.

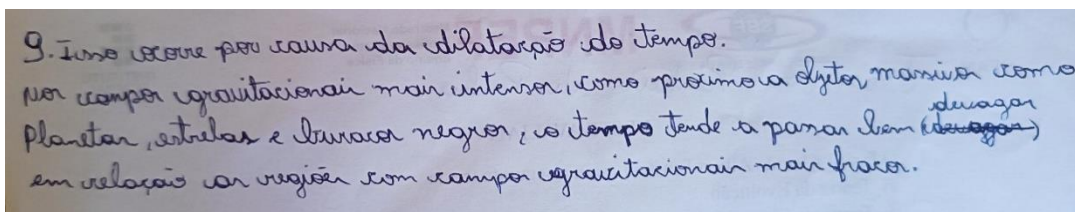
Figura 33: Questão 9 do teste avaliativo

9. Explique como o tempo passa de maneira diferente em regiões com diferentes campos gravitacionais.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Essa era uma questão para o que aluno pudesse descrever baseado naquilo que foi ensinado durante aplicação da sequência didática, 77,7% dos alunos descreveram dentro daquilo que foi transposto sobre a dilatação gravitacional do tempo, sabemos que é difícil de entender esses conceitos, e transcrever se torna desafiador, no entanto tivemos respostas onde os alunos se expressaram muito bem a respeito de como o tempo passa em regiões com campos gravitacionais diferentes, vejamos uma dessas respostas.

Figura 34: Resposta da questão 9 do teste avaliativo feita por um aluno



9. Isso ocorre por causa da dilatação do tempo. Por campo gravitacional mais intenso, como próximo a Júpiter, matéria como planetas, estrelas e buracos negros, o tempo tende a passar ^{desagor} bem ~~(desagor)~~ em relação a regiões com campo gravitacional mais fraco.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Em resumo, a correção desta questão que tem seu grau de complexidade não apenas demonstra um entendimento dos conceitos envolvidos, mas também evidencia a capacidade de aplicar esse conhecimento de forma eficaz para alunos do ensino médio. Por fim chegamos na última questão, a questão de número 10 (dez) também era voltada para analogia da dilatação temporal, como será mostrada a seguir.

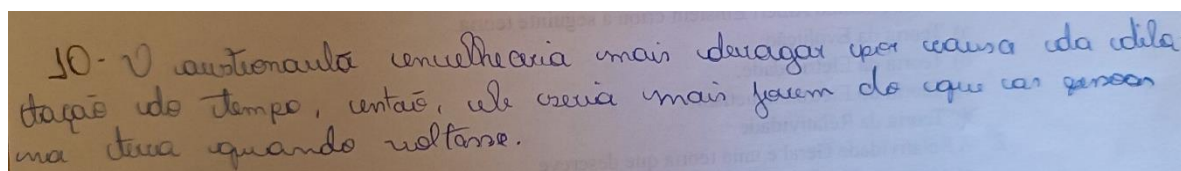
Figura 35: Questão 10 do teste avaliativo

10. Se um astronauta viajasse em uma nave espacial a uma velocidade próxima à velocidade da luz e voltasse à Terra, como o efeito da dilatação do tempo afetaria sua idade em comparação com as pessoas da Terra?

Fonte: Autoria própria, 2024.

Nessa questão, tivemos 81,4% de acertos, ou seja, 22 (vinte e dois) alunos transcreveram de maneira satisfatória esse experimento mental, explicando o efeito da dilatação do tempo para velocidades próximas a da luz, vejamos uma das respostas transcrita.

Figura 36: Resposta da questão 10 do teste avaliativo feita por um aluno



10- O astronauta envelheceria mais devagar por causa da dilatação do tempo, então, ele seria mais jovem do que as pessoas na terra quando voltasse.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Note que aluno(a) responde de maneira eficiente mostrando que o tempo sofre um efeito para velocidades próximas a da luz. Em suma, ensinar os conceitos de dilatação do tempo aos alunos do ensino médio é essencial para estimular o pensamento crítico, fornece uma base sólida em física moderna, preparar para estudos avançados, promover a interdisciplinaridade e aumentar o engajamento e a motivação. Essas lições não apenas enriquecem a compreensão científicas dos alunos, mas também lhes mostram a beleza e a complexidade do universo.

Dessa forma, ao fazer análise dos questionários dentro dos resultados obtidos, nos revelou percepções significativas sobre a abordagem dos conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral no terceiro ano do ensino médio, destacando a compreensão porte dos alunos

de um tema difícil de se compreender em pouco tempo de aplicação, e os resultados obtidos foram de certa forma surpreendente com base no questionário diagnóstico, onde muitos não sabiam a definição ou os conceitos relacionados Relatividade Especial ou Geral, e diante desse resultado positivo após a aplicação da sequência didática, abrem caminhos para futuras investigações e melhorias na melhor forma de inserir os conceitos de Relatividade Geral no ensino médio.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve objetivo de abordar os conceitos fundamentais da Relatividade Geral no terceiro do ensino médio, e investigar questões relacionadas a possibilidade de inserção desses conceitos para alunos da educação básica, tendo em vista que mostrar aos alunos do ensino médio como a relatividade revolucionou a forma de ver o espaço, tempo, a natureza da luz e a gravidade é de extrema importância, pois a relatividade impulsionou a Física Moderna. Os alunos do 3º ano 01 do Centro de Educação de Tempo Integral -CETI Professora Naíde Lins de Albuquerque no Município de Fonte Boa, Amazonas, puderam conhecer um pouco dos conceitos fundamentais da relatividade, e essa experiência acadêmica foi de certa forma bastante proveitosa. Os resultados obtidos demonstram que os alunos absorveram positivamente os conteúdos aplicados durante a transposição didática, contribuindo significativamente para a exploração da Relatividade Geral no ensino médio, ao oferecer boas perspectivas sobre a ótima absorção de conhecimentos por parte dos alunos diante do desafio proposto.

Os achados indicam uma percepção com um potencial significativo para a exploração dessa teoria na educação básica, pois é possível sim abordar conceitos fundamentais da Teoria da Relatividade Geral no ensino médio, sugerindo implicações importantes na vida dos alunos. No entanto algumas limitações como o curto tempo de aplicação da sequência didática voltada para o tema da pesquisa, nos ateve para uma melhor e mais detalhadas abordagens desses conceitos essenciais e isso deve ser considerado ao interpretar os resultados, essas limitações, embora presentes, não diminuem a validade das descobertas, mas apontam lacunas que necessitam de mais investigação.

Para pesquisas futuras, recomenda-se que o educador explore esses conceitos em um maior período de tempo, usando um material didático inovador, fazendo o uso de tecnologias digitais e até mesmo elaborando projetos voltados para temática, o que poderia ajudar a aprofundar a compreensão sobre a Relatividade Geral e superar algumas limitações referente a aplicação da temática. Além disso, para esta pesquisa, as contribuições ou a contribuição estará voltada para o uso de uma ferramenta pedagógica para melhorar a compreensão do aluno, como

a utilização da metodologia VARK, que permite identificar a preferência de aprendizagem do aluno, podendo unir a características dessa metodologia com um objetivo de proporcionar uma aula prazerosa visando a aprendizagem. Graças ao VARK, a aula pode se tornar um grande atrativo para despertar a curiosidade do aluno, ao identificar a problemática envolvendo o ensino-aprendizagem, você delimita caminhos para chegar no seu objetivo, que é fazer com que o aluno adquirir conhecimento durante o processo de ensino e aprendizagem, em física essa ferramenta é eficaz, e traz resultados como já citados nesse estudo, indicando que os resultados podem ser aplicados dentro do objetivo dessa pesquisa. Assim, espero que os professores não só de física, mais química e matemática façam o uso dessa contribuição nos seus planejamentos de aulas.

Em conclusão, está pesquisa oferece uma contribuição valiosa ao campo de estudo voltado a abordagem dos conceitos fundamentais da Relatividade Geral no ensino médio, abrindo novas direções investigações futuras e práticas aplicáveis. A experiência adquirida ao longo desse estudo foi enriquecedora, proporcionando aprendizados valiosos e novas habilidades para melhor transmitir o conhecimento de física aos alunos do ensino médio.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular: Ensino Médio. Brasília, 2018. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/wp-content/uploads/2018/11/7._Orienta%C3%A7%C3%B5es_aos_Conselhos.pdf>. Acesso em: 7 mar. 2023.

OSTERMANN, Fernanda; RICCI, Trieste dos Santos Freire. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física. Caderno Brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 19, n. 2 (ago. 2002), p. 176-190, 2002. Disponível: <http://hdl.handle.net/10183/85027> Acesso: 14 mar. 2023.

MOREIRA, Marco Antônio. OSTERMANN, Fernanda. Teorias Construtivistas. Instituto de Física – UFRGS, 1999. 56p.: il. (Textos de apoio ao professor de Física; n. 10).

Sampaio, W. S., Oliveira, A. N. de, & Siqueira, M. C. A. (2019). AS TEORIAS DA RELATIVIDADE NO ENSINO BÁSICO: UMA REVISÃO DE LITERATURA PARA TRAÇAR O PERFIL DOS TRABALHOS PUBLICADOS NO BRASIL ENTRE 2000 E 2018. *Conexões - Ciência E Tecnologia*, 13(4), 45–53. <https://doi.org/10.21439/conexoes.v13i4.1857>

Karam, R. A. S., Cruz, S. M. S. C. de S., & Coimbra, D. (2007). Relatividades no ensino médio: o debate em sala de aula. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(1). <https://doi.org/10.1590/s0102-47442007000100017>

SOUZA, Diego Rodrigues. Uma construção didática do conceito de espaço-tempo da teoria da relatividade restrita visando alfabetização científica no ensino médio. 2019. 159 f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE, Rio Branco, Acre, 2019.

Ferreira, M., do Couto, R. V. L., da Silva Filho, O. L., Paulucci, L., & Monteiro, F. F. (2021). Ensino de astronomia: uma abordagem didática a partir da Teoria da Relatividade Geral. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 43. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2021-0157>

Ostermann, F., & Moreira, M. A. (2016). UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A ÁREA DE PESQUISA “FÍSICA MODERNA E CONTEMPORÂNEA NO ENSINO MÉDIO”. *Investigações Em Ensino De Ciências*, 5(1), 23–48. Recuperado de <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/600>

Almeida, J. R., & Soltau, S. B. (2022). Filme Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio. *Research, Society and Development*, 11(5), e40911528437. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>

Wolff, J.F.S. & Mors P.M. (2006). RELATIVIDADE NO ENSINO MÉDIO: UMA EXPERIÊNCIA COM MOTIVAÇÃO NA HISTÓRIA. *Atas. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS*, 8.

RODRIGUES, C. D. O. *Inserção da teoria da relatividade no ensino médio: uma nova proposta*. 2001. 163 f. Dissertação (Mestrado em Educação) Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

CARUSO, Francisco. OGURI, Vitor. A Eletrodinâmica e a Teoria da Relatividade Restrita de Einstein. In: MARQUES G.C, JOFFILY S. Física Moderna Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos. Rio Janeiro: Elsevier, 2006. P 181 a 191.

LIMA, Carlos R. A. Teoria da Relatividade Especial. In: LIMA, C. T. A. Introdução à Física Moderna. ed. jan. Rio de Janeiro: 2009. p. 7.

RESNICK, Robert. A Base Experimental da Teoria da Relatividade Especial. In: WATAMA. Shigeo. Introdução à Relatividade Especial. São Paulo: Polígono, 1968. p. 37– 38.

TIPLER, Paul. A. LLEWELLYN, Ralph A. Relatividade I. In: BIASI, R. A. Física Moderna. ed. 6ª. Rio de Janeiro: LTC, 2017. p. 30 a 34

GAZZINELLI, Ramayana. Em busca do espaço absoluto. In: GAZZINELLI. R. Teoria da Relatividade especial. São Paulo: Blucher, 2009. p. 7.

SILVA, Melina Silva de. Einstein a Teoria da Relatividade Especial: uma abordagem da histórica e introdutória. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de física, 2013. 50 p.; il. (Textos de apoio ao professor de física. Marco Moreira, Eliane Angela Veit, ISSN 1807-2763;v. 24, n. 2).

GERHARDT. Tatiana Engel. SILVEIRA, Denise Tolfo. Metodologia de Pesquisa. Porto Alegre: UFRGS, 2009. P. 120.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6ª ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDENBERG, M. A arte de pesquisar. Rio de Janeiro: Record, 1997. p. 34.

DESAULNIERS, j.-P. (1978). "Le topless du quartier". Possibles, vol. 2, n. 4, p. 58.

FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila. p. 20

MARCONI, E. M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de Metodologia Científico. 5 ed. São Paulo. Atlas, 2003.

ANDRADE, Maria Margarida de. Introdução à metodologia do trabalho científico: elaboração de trabalhos na graduação. 9.ed. São Paulo: Atlas,2009. P. 132/133).