



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

JOSÉ HENRIQUE FEITOSA DE OLIVEIRA

**CENÁRIO DO ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO:
UMA PROPOSTA DE ENSINO DE RELATIVIDADE ESPECIAL**

MARINGÁ

2023



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

JOSÉ HENRIQUE FEITOSA DE OLIVEIRA

**CENÁRIO DO ENSINO DE FÍSICA MODERNA NO ENSINO MÉDIO:
UMA PROPOSTA DE ENSINO DE RELATIVIDADE ESPECIAL**

Monografia para licenciatura em física apresentada à universidade estadual de Maringá (UEM), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Licenciado Pleno em Física.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Fernando Carlos Messias Freire

MARINGÁ

2023

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus por sempre estar ao meu lado nos momentos mais difíceis.

A todos os meus professores da graduação, que foram de fundamental importância na construção da minha vida profissional.

Ao professor Fernando, pela sua paciência, conselhos e ensinamentos que foram essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

E por fim, dedico a produção desta pesquisa a minha família e aos amigos que sempre estiveram presentes direta ou indiretamente em todos os momentos de minha formação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo primeiramente a Deus e a minha família, que prestou todo o apoio e compreensão necessária ao longo de todos esses anos, especialmente a minha falecida avó Marta, que foi meu primeiro e maior incentivo a seguir por essa trajetória, sem nunca duvidar ou questionar essa minha escolha, por mais duvidosa que ela pudesse parecer a princípio. Serei eternamente grato.

Agradeço imensamente aos professores do curso que fizeram parte dessa trajetória, a todos os funcionários da universidade, que trabalham dia e noite para tornar possível a realização e formação profissional de milhares de pessoas todos os anos, á todos os alunos, que apesar das dificuldades seguem sua jornada, tornando a universidade o que ela de fato deve ser, “Universal” e diversa.

Agradeço imensamente ao meu orientador Fernando, e a professora Hatsumi, que não apenas me deram uma, mas duas oportunidades de terminar esse trabalho e poder concluir minha jornada na universidade.

Por fim, agradeço a todos meus amigos e parceiros, os que já possuía antes, os que fiz ao longo da jornada, e os que farei depois, sem qualquer um deles nada disso seria possível de maneira alguma

“ [...] Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.- Nicola Tesla.

RESUMO

Não é de hoje que se sabe que o ensino de física sofre de grande insuficiência no Brasil, por diversos motivos, a situação é ainda pior quando se trata do ensino de física moderna. Um dos maiores auxiliares do professor de física e ciências no geral é o livro didático, porém quando se analisa os livros didáticos de física nota-se que o assunto, física moderna, é tratado com muita superficialidade, na maioria esmagadora das vezes apenas um pequeno número de páginas é dedicado para discussão a respeito dos conceitos que cercam a física moderna. Por conta disso, o ensino se resume basicamente a decoração de f ormulas e resolução de exercícios. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor uma maneira alternativa para se trabalhar a física moderna, mais especificamente o cont eudo de relatividade restrita, em que se procurou focar nos acontecimentos históricos que levaram ao desenvolvimento dessa teoria, tal qual os problemas de compatibilidades de novas teorias da época, como o eletromagnetismo de Maxwell e as transformações de Galileu, até chegar ao famoso experimento de Michelson Morley e os famigerados postulados de Einstein.

Palavras-chave: Física Moderna; Física Contemporânea; Livros didáticos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. A RELATIVIDADE ESPECIAL.....	10
2.1. Uma Breve Contextualização histórica – A Relatividade e o movimento da Terra.....	11
2.1.1. A Luz e o Éter.....	12
2.1.2. O Experimento de Michelson e Morley.....	13
2.1.3. Os Postulados de Einstein.....	14
2.1.4. As Consequências dos Postulados.....	14
3. A FÍSICA MODERNA NOS LIVROS DIDÁTICOS.....	21
3.1. O PNLD.....	21
3.2. ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA POR OUTROS AUTORES.....	21
3.3 ANÁLISE DAS COLEÇÕES MAIS RECENTES.....	23
3.3.1. Gualter e Newton.....	24
3.3.2. Guimarães, Piqueira e Carron.....	24
3.3.3. Ser Protagonista.....	24
3.4 Análises e discussões acerca da pesquisa.....	25
4. PROPOSTA DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	25
4.1. Proposta de Sequência Didática: A Teoria da Relatividade Especial.....	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
6. REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Não é difícil perceber que o ensino de ciência sofre de diversos problemas, um deles é a defasagem entre os conteúdos ensinados em sala de aula e o avanço tecnológico da sociedade contemporânea, talvez seja possível afirmar que uma das áreas que mais sofre com esse problema seja a física, já que a física ensinada nas escolas é basicamente a mesma do século XIX. Não só isso, como esses temas clássicos da física são excessivamente discutidos e debatidos e tratados com um formalismo matemático pouco atrativo para jovens estudantes e professores, dessa forma, tornando as aulas de física excessivamente maçantes e desagradáveis.

Moreira (2018) chama atenção ao fato de que o ensino de física está em crise, e isso se dá por diversos motivos, dentre eles, a carga horária semanal que já chegou a ser de 6 horas-aulas e hoje é de apenas 2, laboratórios e atividades práticas quase que inexistentes, o grande déficit de professores de física, a obrigatoriedade em preparar os alunos para as provas de vestibular e o fato dos conteúdos curriculares não ir além da mecânica clássica e serem abordados da maneira mais tradicional possível, com aulas puramente expositivas e centradas especificamente na figura do professor, enquanto ao aluno, cabe apenas o papel de coadjuvante.

Sendo assim, a lacuna provocada por um currículo de física desatualizado resulta numa prática pedagógica desvinculada e descontextualizada da realidade do aluno. OLIVEIRA et al., 2007 p. 448,) Realidade essa que por muitas vezes também se levanta como uma fortaleza inexpugnável a uma aprendizagem significativa por parte do aluno. Uma das possíveis medidas que podem ser tomadas para amenizar parte desse problema, principalmente no que se refere ao conteúdo abordado em sala de aula, é a inserção de tópicos de Física Moderna e Contemporânea nas aulas de física.

Nas últimas décadas, ocorreram incontáveis avanços científicos e tecnológicos, e tudo isso com o advento da internet tem chamado atenção da população em geral, nos últimos anos algumas notícias ganharam grande notoriedade, tais como a detecção experimental das ondas gravitacionais em 2017, ou a famosa foto do buraco negro do centro da galáxia M87 em 2019. Essas notícias são algumas das diversas que têm despertado nos jovens, olhares mais atentos sobre temas relacionados à ciência no geral (OLIVEIRA et al, 2007).

Levando em consideração, toda essa overdose de informação que os jovens recebem no dia a dia, OLIVEIRA et al, (2007) afirma que é comum, nas aulas de física, que os alunos tragam discussões sobre assuntos que leram ou ouviram em alguma mídia, que por serem mais atuais e estarem presentes no seu dia a dia desperta neles um interesse em conhecer e entender

os princípios físicos que explicam determinado fenômeno. Entretanto, todo esse entusiasmo é confrontado por um ensino de ciências estagnado e refém dos temas clássicos já debatidos incansavelmente. Todos esses problemas levam a uma eventual perda de interesse em ciência, mais especificamente na disciplina de física por parte dos alunos.

Ostermann e Moreira (2000), em sua revisão bibliográfica, citam diversos motivos e justificativas para a inserção dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio. Segundo os estudos de Baroja (1998), as razões levantadas através da III Conferência interamericana sobre educação em física são:

Despertar a curiosidade dos estudantes e ajuda-los a reconhecer a Física como um empreendimento humano; os estudantes não têm contato com o excitante mundo da pesquisa atual em Física, pois não veem nenhuma Física além de 1900. Esta ideia é inaceitável em um século no qual ideias revolucionárias mudaram a ciência totalmente; é de maior interesse atrair jovens para a carreira científica. Serão eles os futuros pesquisadores e professores de Física; é mais divertido para os professores ensinar tópicos que são novos. O entusiasmo pelo ensino deriva do entusiasmo que se tem em relação ao material didático utilizado e de mudanças estimulantes no conteúdo do curso. É importante não desprezar os efeitos que o entusiasmo tem sobre o bom ensino; a Física Moderna é considerada conceitualmente difícil e abstrata, mas, resultados de pesquisa em ensino de física têm mostrado que, além da física clássica ser também abstrata, os estudantes apresentam sérias dificuldades conceituais para compreendê-la. (BAROJAS, 1998, p. 173)

Todos esses fatores, alinhados ao fato de que a abordagem de Física Moderna e Contemporânea está prevista na base comum curricular (BRASIL, 2018, p.555), reforça o fato que se deve dar uma atenção especial a essa área da física.

Todavia, acima de tudo, devido à complexidade e abstração necessária para a compreensão de alguns tópicos, não é nem um pouco fácil a inserção desse assunto na sala de aula do Ensino Médio. O professor não tem ao seu dispor os recursos necessários para a abordagem satisfatória deste conteúdo, são poucos os livros didáticos, na qual a maioria dos professores baseiam suas aulas, que dão a devida importância aos tópicos de Física Moderna, são poucas as atividades experimentais que tratam de assuntos relacionados, são poucas as sequências didáticas disponíveis para os professores usarem como guia para suas aulas.

Em suma, apesar de sua enorme importância para a compreensão do contexto científico-tecnológico atual, o ensino da Física Moderna e contemporânea, ou melhor, de ciência moderna, vem sendo relegado

Tendo isso em vista, este trabalho tem como objetivo justificar e propor, através de uma

pesquisa bibliográfica, o porquê de se ensinar Física Moderna no Ensino Médio e qual a importância para a formação do aluno como indivíduo numa sociedade que hoje, mais do que nunca, precisa de profissionais que possam resolver problemas e pensar de maneira crítica. Pensando no objetivo da pesquisa, ainda busca-se analisar a abordagem de tópicos de Física Moderna no Ensino Médio, além de propor uma sequência didática baseada em uma abordagem mais histórica para o ensino da teoria da Relatividade Especial à nível de Ensino Médio.

Neste contexto, as discussões do trabalho foram feitas a partir da análise de artigos e periódicos na área do Ensino de Ciências com ênfase no Ensino de Física, a fim de apoiar e justificar uma proposta de sequência didática para o ensino da Teoria da Relatividade Especial, utilizando como base para isso, uma abordagem mais centrada na história da Física.

2. A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

A teoria da relatividade é dividida principalmente em duas vertentes, a teoria da Relatividade Especial ou Restrita (EINSTEIN, 1905) e a teoria da Relatividade Geral (EINSTEIN, 1916). No geral, a teoria da Relatividade busca estudar as possíveis diferenças que podem ocorrer entre medidas realizadas em diferentes referenciais, sendo o foco da relatividade especial, analisar apenas referenciais inerciais.

A Relatividade Especial tem suas bases em dois postulados, sendo eles as bases axiomáticas que juntas formam os alicerces da teoria e resultam em consequências totalmente contraintuitivas e que parecem ir contra aquilo que foi exaustivamente discutido na Mecânica Newtoniana (VIDEIRA, 2016). O primeiro deles e talvez o mais conhecido é que a velocidade da luz, medida em qualquer referencial, (ou qualquer radiação eletromagnética) não depende da velocidade de sua fonte.

A nível de ensino médio, os principais resultados e principais novidades que essa teoria trás, são: a dilatação temporal, a contração das distâncias, e o aumento das massas, que se dão em consequência dos dois postulados, que juntos constituem a base dessa teoria, como será discutido a seguir.

2.1. UMA BREVE CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA - A RELATIVIDADE E O MOVIMENTO DA TERRA

Diferente do que se pode pensar, o termo “relatividade” não surgiu em 1905 com a publicação do famoso artigo de Einstein, a famosa palavra já era utilizada muito antes disso, datando de épocas anteriores até mesmo a Newton.

Galileu Galilei, por volta de 1624, inspirado pela ideia de tentar explicar o movimento da Terra, propôs um "experimento hipotético" (que posteriormente seria usado por Einstein para desenvolver sua teoria) em que duas pessoas entram na cabine de um navio, completamente fechada e isolada do exterior, e fazem diversos experimentos lá dentro, tanto com o navio em repouso, ou em movimento retilíneo e uniforme (MRU).

Galileu afirma que, para ambos os casos, todos os experimentos dariam exatamente os mesmos resultados, dessa forma concluiu que, nenhum experimento realizado dentro da cabine do navio, permite afirmar se o navio está em repouso ou em MRU. E, portanto, o mesmo vale para a terra (MARTINS, 2006).

Newton (1687) chama a atenção para a diferença entre os movimentos de rotação e translação. Através de um experimento simples, onde, um balde cheio de água é preso ao teto com uma corda, e ele gira, a princípio a água, que estava parada, continuará assim, mas, depois de um tempo, é possível perceber que a água começará a girar com o balde, a superfície da água que antes era perfeitamente plana agora está côncava. Entretanto, tanto antes, como depois de colocar o balde em movimento, a água está parada em relação ao balde, e vice-versa. Logo não se esperava que houvesse efeitos físicos observáveis e deveria se esperar que a superfície da água continuasse plana.

Depois de várias tentativas de explicar a forma côncava da superfície da água, Newton chega à conclusão de que "a rotação produz efeitos absolutos" (MARTINS, 2006). Mas ainda restava descobrir em qual quadro de referência a rotação em relação a ele produz esse efeito. Para tal, Newton investiga o, até então, suposto movimento de rotação da Terra. Se, de fato a Terra gira, essa rotação deveria produzir efeitos observáveis, Newton então calculou o efeito causado pela rotação da Terra e imediatamente apontou para dois efeitos observáveis, o primeiro é que o período de um relógio de pêndulo deve depender de sua latitude, e depois, que a terra devia ser achatada, por conta da rotação (MARTINS, 2006).

Já que de fato era possível observar esses efeitos, Newton conclui que, o efeito causado na superfície da água se dá devido a rotação da mesma em relação à um referencial privilegiado, que nas palavras dele, recebem o nome de espaço absoluto:

O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com qualquer coisa externa, permanece sempre similar e imóvel. Espaço relativo é alguma dimensão ou medida móvel dos espaços absolutos, a qual nossos sentidos determinam por sua posição com

relação aos corpos, e é comumente tomado por espaço imóvel; assim é a dimensão de um espaço subterrâneo, aéreo ou celeste, determinado por sua posição com relação à Terra. Espaços absolutos e relativos são os mesmos em configuração e magnitude, mas não permanecem sempre numericamente iguais. Pois, por exemplo, se a Terra se move, um espaço de nosso ar, o qual relativamente à Terra permanece sempre o mesmo, será em algum momento parte do espaço absoluto pelo qual o ar passa; em outro momento será outra parte do mesmo, e assim, com certeza, estará continuamente mudando. (NEWTON, 2022, p.45)

Como notado por Martins (2006), as discussões de Newton basicamente se resumiam a fenômenos mecânicos. Apesar disso, outros fenômenos como os relacionados à própria luz, tiveram os seus protagonismos nas pautas do estudo de Física.

2.1.1. A LUZ E O ÉTER

Newton e seus contemporâneos acreditavam que a luz consistia em pequenas partículas emitidas por corpos luminosos que se moviam pelo espaço a velocidades altíssimas, dessa forma, como partículas, era esperado que o princípio da relatividade se aplicasse a elas também. Essa visão da natureza puramente corpuscular da luz, foi amplamente aceita até por volta de 1873, quando James Clerk Maxwell publicou seu "*Tratado sobre eletricidade e magnetismo*" mostrando que as ondas eletromagnéticas se propagam pelo espaço na mesma velocidade que a luz, velocidade essa que ele estimou com base em seus resultados como sendo $c = 299.792.458m/s$.

Até aquele momento, era de consenso geral que ondas necessitavam de um meio material para se propagar, e com as ondas eletromagnéticas não seria diferente, dito isso, era necessário descobrir qual seria o meio de propagação das ondas eletromagnéticas. Uma proposta notória entre os físicos da época era a de um éter luminífero, (apesar de o conceito de éter já haver sido proposto por Aristóteles cerca de 2000 anos atrás) um meio com propriedades especiais que supostamente preencheria todo o espaço (MUNIZ, 2015).

Ora, não poderia ser esse meio, com propriedades tão especiais, e que preenche todo o espaço, um referencial privilegiado, tal qual o espaço absoluto, proposto alguns séculos atrás por Newton? Assim, inspirados por isso e pela ideia de que a luz devia viajar com velocidade c em relação a um referencial universal, a fim de manter a coerência entre o eletromagnetismo e a mecânica, vários físicos elaboraram experimentos, entre eles, Hippolyte Fizeau, Jacques Babinet, Anders Jonas Angstrom e até o próprio Maxwell (MARTINS, 2006) na tentativa de detectar o movimento da Terra em relação ao éter, entre os quais um deles é considerado

bastante especial na história da física moderna, este é o experimento estabelecido por Albert A. Michelson e Edward W. Morley, em 1887 (MUNIZ, 2015).

2.1.2. O EXPERIMENTO DE MICHELSON E MORLEY

Por volta de 1881, em Potsdam na Alemanha, o físico Albert A. Michelson realizou um experimento simples e elegante na tentativa de detectar a diferença na velocidade da luz em um percurso de "ida e volta" e assim demonstrar o movimento da Terra em relação ao éter (LLEWELLYN; TIPLER, 2001). Como enfatiza Martins (2006), Michelson foi aquele que melhor mediu a velocidade da luz na época e, portanto, ninguém era mais adequado para a tarefa.

Assim, como constata Martins (2006), Michelson mandou construir, em 1881, o seu famoso interferômetro, um aparelho cujo princípio de funcionamento era comparar o tempo que a luz levava para realizar determinado percurso em direções perpendiculares. Michelson fez algumas suposições e previsões teóricas com base em resultados obtidos por Maxwell. Segundo os conceitos clássicos da física, as velocidades relativas se somam e, portanto, as velocidades dos feixes luminosos deveriam depender da direção do movimento da Terra em relação ao éter, assim era esperado que essa diferença fosse vista na posição das franjas de interferência que se formariam devido a diferença de fase dos raios luminosos (MUNIZ, 2015).

No entanto, a primeira versão do famoso experimento foi considerada inconclusiva porque a diferença entre as listras em diferentes locais onde o instrumento foi colocado e em diferentes estações do ano era menor que a margem de erro do instrumento. Somente em 1887, sob o impulso de Lord Kelvin e Rayleigh, e com a ajuda do químico Edward Morley, Michelson montou um interferômetro aprimorado que era muitas vezes mais sensível e preciso do que o primeiro. Eles esperavam que o efeito seria maior do que antes e que, portanto, seria relativamente fácil de detectar. Não obstante, isso não ocorreu e após uma série de medições ao longo de 4 dias observaram apenas pequenas alterações irregulares no interferograma, um resultado muitas vezes menor do que o esperado. Portanto, a conclusão não podia ser diferente, o efeito é nulo e a velocidade da Terra em relação ao éter não pode ser medida (MARTINS, 2006).

2.1.3. OS POSTULADOS DE EINSTEIN

Depois de um longo período de avanços, retrocessos, idas e voltas, que perdurou do

final do século XIX até o início do século XX, por volta de 1905, Albert Einstein publicou vários artigos, entre os quais um deles tratava da “eletrodinâmica dos corpos em movimentos” (EINSTEIN, 1905), nesse ele propôs um novo e mais abrangente princípio da relatividade, que se aplicava tanto às leis da mecânica, quanto às leis da eletrodinâmica (LLEWELLYN; TIPLER, 2001).

Como destacado por Martins (2006), a forma como Einstein apresentou a teoria da relatividade especial é baseada em dois postulados, sendo eles:

- O movimento absoluto não pode ser detectado, as leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais¹: dessa forma os fenômenos físicos em um sistema isolado não dependem da sua velocidade e, portanto, não é possível medir a velocidade de um sistema através de experimentos puramente internos, em outras palavras, não é possível medir a velocidade da Terra, usando experimentos terrestres.
- A velocidade da luz independe da velocidade da sua fonte. Ou seja, a luz emitida por uma fonte que se move com determinada velocidade, possui a mesma velocidade que a luz emitida por uma fonte em repouso.

Esses dois postulados, apesar de aparentarem simples, trouxeram consigo algumas consequências que vão totalmente contra a Física Clássica já estabelecida anteriormente (MUNIZ, 2015).

2.1.4 AS CONSEQUÊNCIAS DOS POSTULADOS

Relatividade da simultaneidade: Dois eventos que são simultâneos em um referencial não são simultâneos em um outro referencial inercial que esteja se movendo em relação ao primeiro. Para demonstrar isso Einstein propõe um experimento mental:

Supondo que, um trem está passando pela plataforma de uma estação com velocidade v , seja S' o referencial no interior do próprio trem, três observadores, A' , B' , e C' estão situados no primeiro, no vagão central e no último vagão do trem, respectivamente. Suponha então que dois relâmpagos atingem as extremidades de um trem, chamuscando tanto o trem quanto a plataforma (Figura 1).

¹ Para Einstein não há propriedades observáveis associadas a ideia de repouso absoluto, portanto, quando se fala em referencial inercial, se fala de sistemas de coordenadas que estão em repouso ou em movimento uniforme uns em relação aos outros.

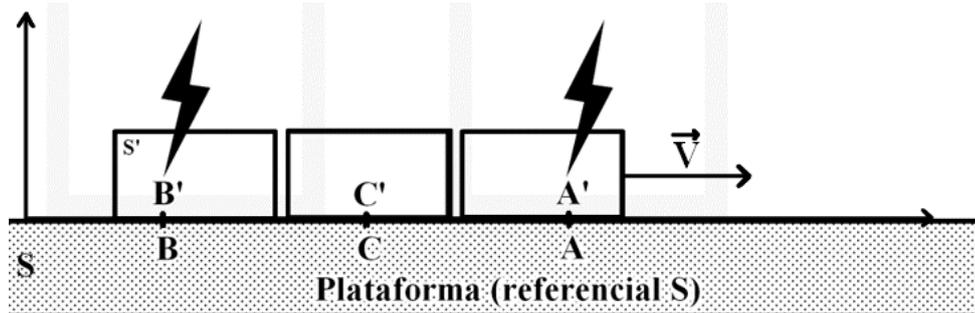


Figura 1 - Relâmpagos atingem simultaneamente trem e plataforma nos pontos A, A' e B, B'
(Fonte: Tipler e Ralph (2010).

Do referencial da plataforma (S), um observador situado em C, no meio do caminho entre A e B (que foram chamuscados pelos raios), observa os dois raios simultaneamente. Do ponto de vista do referencial S', os dois eventos só serão simultâneos se fossem observados ao mesmo tempo por um observador. É evidente que único observador capaz disso é o Observador C', que se encontra no vagão central do trem. Porém não é difícil constatar que C' observa primeiro a luz do relâmpago que atingiu o ponto A, isso porque quando a luz que atingiu os pontos A e A' chega até C' o trem já se deslocou uma certa distância em direção a A (Figura 2). Assim sendo, o Observador C' conclui que não houve simultaneidade, e sim que o raio que atingiu a parte frontal (ponto A) do trem aconteceu primeiro, e isso acontece para todos os observadores que estão em repouso em relação a S' (LLEWELLYN;TIPLER, 2014).

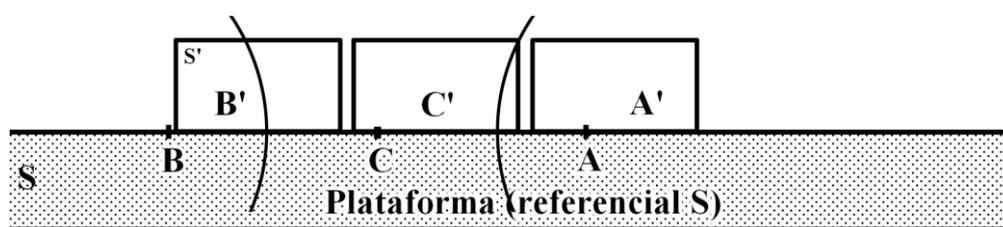


Figura 2 - O Relâmpago que atinge A é notado primeiro pelo observador C', devido ao deslocamento do trem na direção de A. Fonte: Tipler e Ralph (2010)

Logo, conclui-se que, diferente do que acontece na mecânica clássica, dois (ou mais) eventos que acontecem simultaneamente em um determinado referencial, não necessariamente são simultâneos em um referencial que se move com velocidade constante em relação a esse outro

Dilatação Temporal: Uma das consequências mais marcantes e imediatas do segundo postulado de Einstein é que, aceitando a constância de velocidade da luz, se é obrigado a aceitar, a relatividade do tempo (Muniz, 2015). Ou seja, se dois relógios estão sincronizados quando parados em relação um ao outro, não estarão mais sincronizados quando um deles for colocado em movimento em relação ao outro (Martins, 2006).

Para demonstrar isso (Figura 3), considere uma espaçonave se movendo com velocidade v , em relação a um referencial S , um observador no interior da nave (Referencial S') dispara um feixe luminoso na direção de um espelho, localizado no teto da aeronave a uma distância D , com o auxílio de um detector e um relógio ele mede o intervalo de tempo ($\Delta t'$) entre o disparo do laser e a detecção do feixe refletido.

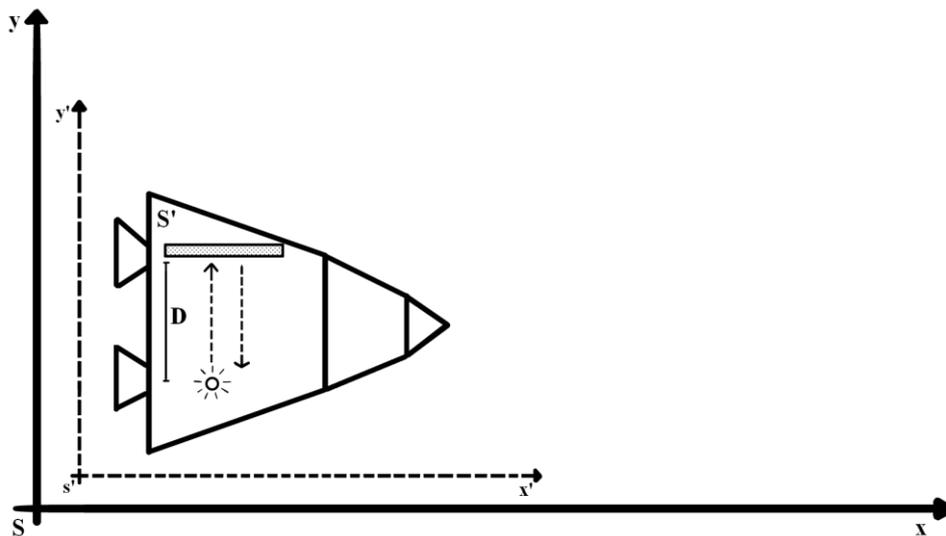


Figura 3 - do ponto de vista da aeronave (referencial S') a distância percorrida pelo feixe luminoso no intervalo de tempo $\Delta t'$ é $2D$. Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

Como o segundo postulado nos diz que a luz viaja com velocidade constante (c) o intervalo de tempo medido pelo observador no interior da nave deve ser:

$$\Delta t' = \frac{2D}{c} \quad (1)$$

Porém, para um observador parado em relação ao referencial S , a nave (e o referencial S') estarão se movendo para a direita com velocidade v (Figura 4), portanto, a trajetória do feixe luminoso será diferente quando observado por um observador em S , já que no intervalo entre a saída do feixe até o seu retorno a nave se deslocou de um ponto x_1 para x_2 , não é difícil perceber que o deslocamento da nave nesse intervalo foi de:

$$\Delta S = v\Delta t \quad (2)$$

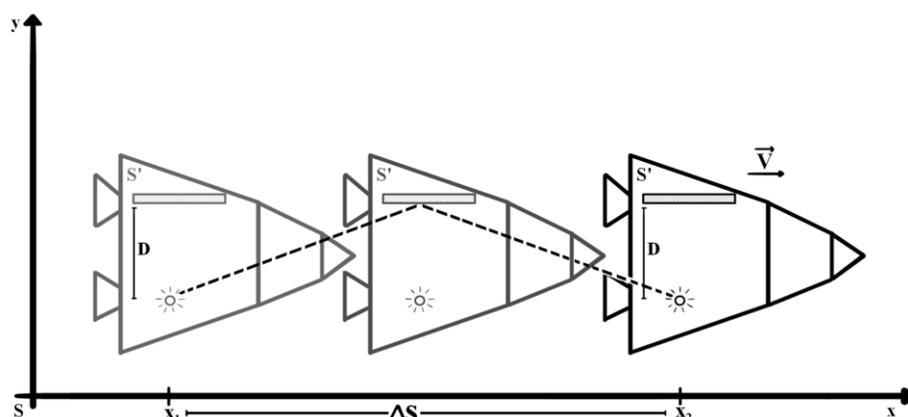


Figura 4 - Do ponto de vista do referencial S a nave tem um deslocamento $\Delta S = v\Delta t$. Dessa forma, a trajetória (linha tracejada) do feixe luminoso é diferente para o observador em S. Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

Entretanto, o segundo postuladado nos diz que a velocidade da luz é a mesma independente da velocidade da sua fonte, portanto o valor medido deve ser o mesmo, tanto no referencial S, quanto no referencial S', assim sendo, o deslocamento total do raio de luz, no intervalo de tempo Δt foi de $\Delta S = c\Delta t$. Desse modo, deslocamento da aeronave e do raio de luz pode ser representado pela Figura 5:

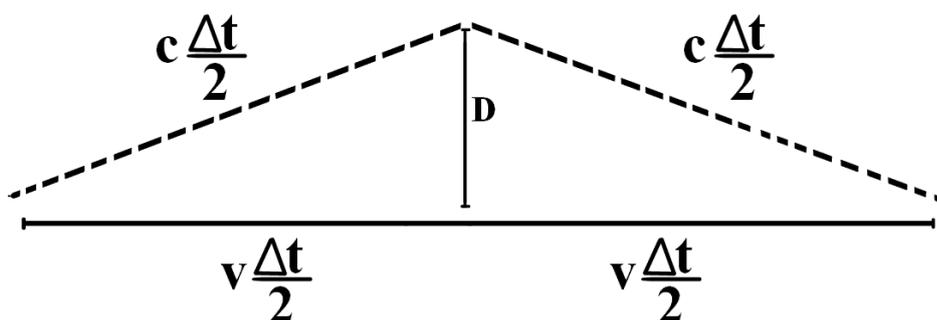


Figura 5 - Diagrama da trajetória da aeronave e do feixe luminoso.

Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

Como a distância percorrida pela luz vista pelo observador em S é claramente maior do que a observada em S', podemos concluir que o intervalo de tempo medido em S também será maior que o medido em S'. Através do teorema de Pitágoras podemos ver que:

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \quad (3)$$

Ou

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{v^2 - c^2}} = \frac{2D}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (4)$$

sabemos que o tempo $\Delta t'$ medido no referencial S' , é dado pela equação (1) e seu valor é $\Delta t' = \frac{2D}{c}$, assim podemos dizer que o tempo Δt medido em S em função de $\Delta t'$ medido em S' é dado por:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t' \quad (5)$$

Onde

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6)$$

é o chamado **fator de Lorentz**. Uma observação imediata que é possível fazer é que γ é sempre maior que 1, e para velocidade muito menores que a da luz $\gamma \approx 1$. Assim sendo, o valor do intervalo de tempo Δt medido no referencial S , será sempre maior que o intervalo de tempo $\Delta t'$ medido em S' . Esse fenômeno recebe o nome de **dilatação temporal**, ou dilatação dos tempos (LLEWELLYN; TIPLER, 2014).

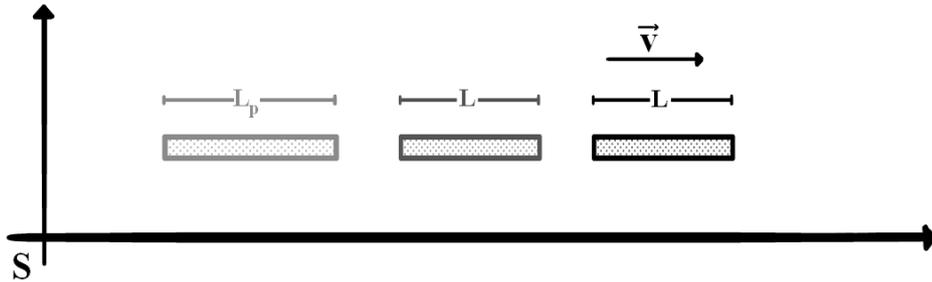
Contração das distâncias: Um outro fenômeno que está associado diretamente ao anterior, a dilatação dos tempos é a contração das distâncias, ou contração espacial (às vezes também chamada de contração dos objetos). Para isso suponha um que tem comprimento L_p (chamaremos de **comprimento próprio**, que é comprimento medido do próprio referencial do qual se encontra o objeto) medido em um referencial S' no qual ele se encontra em repouso (Figura 6).



Figura 6 - barra de comprimento próprio L_p medida de um referencial em repouso S' . Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

Em um referencial (S) onde o objeto se move com velocidade na direção paralela ao seu comprimento, a medida do comprimento L , é menor que a medida do comprimento próprio L_p , medida no referencial em repouso S' (Figura 7).

Figura 7 - para um observador em S, o comprimento L medido é menor que o comprimento próprio L_p medido num referencial em repouso S' .



Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

O observador em S, irá medir o comprimento L menor que o comprimento L_p por um fator $1/\gamma$ dessa forma²:

$$L = \frac{1}{\gamma} L_p = L_p \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (7)$$

Adição de velocidades: Considere um referencial S' que se move com velocidade u constante em relação a um referencial S. É natural pensar que um objeto em S' que se move com velocidade v' em relação a S' (na direção paralela do movimento de S'), terá sua velocidade medida em S como o valor da soma algébrica das duas velocidades (Figura 8).

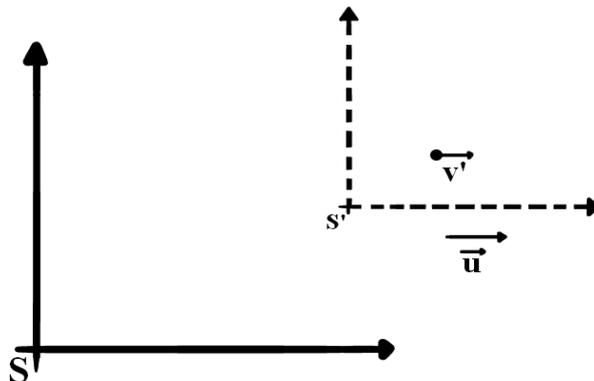


Figura 8 - Um objeto se move com velocidade v' em relação ao referencial S' , que por sua vez se move com velocidade u em relação a S. Fonte: redesenhado pelo autor a partir de Tipler e Ralph (2010).

² Uma dedução mais detalhada do fenômeno de contração espacial pode ser encontrada em LLEWELLYN; TIPLER, 2014, p152.

Ou seja:

$$v = u + v' \quad (8)$$

Porém, na teoria da relatividade especial, para velocidades próximas à da luz essa equação para adição de velocidades não é válida, a adição de velocidades é feita seguindo a seguinte equação³:

$$v = \frac{v' + u}{1 + (u/c^2)v'} \quad (9)$$

É importante notar que para o caso de velocidades muito menores que a da luz, o resultado se resume ao já conhecido da mecânica clássica expresso na equação (8).

Aumento da massa com a velocidade: se um objeto de massa m_0 (enquanto parado), e é então colocado em movimento com velocidade v , em relação a um referencial S, parecerá ter tido um aumento de massa quando medida do referencial S. Esse efeito pode ser representado pela seguinte relação⁴:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10)$$

Relação entre massa e energia: e finalmente, um dos resultados mais conhecidos da teoria da relatividade (e talvez de toda a física) é a conexão entre massa e energia, na relatividade especial não é possível separar os conceitos, de modo que se passa a ter o princípio da conservação da massa-energia.

VIEIRA, S. et al (2004), apresentam algumas deduções que podem ser feitas (a maioria acessível para serem utilizadas em ensino médio) da famosa equação:

$$E = mc^2 \quad (11)$$

³ A dedução dessa equação envolve conceitos de cálculo diferencial e integral, o que a torna complicada de ser feita a nível de ensino médio, sua dedução detalhada pode ser encontrada em livros universitários básicos, como, o utilizado nesse caso: LLEWELLYN; TIPLER, 2014, p161.

⁴ : LLEWELLYN; TIPLER, 2014, p165. Apresenta uma justificativa para esse resultado com base na definição de momento relativístico.

Isso significa dizer que a massa de um objeto é proporcional a sua energia, ou que, analogamente, a energia tem uma inércia associada a ela (Muniz, 2015).

3. A FÍSICA MODERNA NOS LIVROS DIDÁTICOS

O livro didático possui um papel fundamental na prática docente, pois ele orienta e auxilia o caminho a ser seguido pelo professor ao longo do ano, a escolha do material didático deve ser feita cuidadosamente e com cautela. Para isso foi criado pelo governo o Programa Nacional do Livro e do Material Didático (PNLD).

3.1. O PNLD

O PNLD (Programa Nacional do Livro e do Material Didático) é um indicativo destinado a avaliar e a disponibilizar obras didáticas, pedagógicas e literárias, entre outros materiais de apoio à prática educativa, de forma sistemática, regular e gratuita, às escolas públicas de educação básica das redes federal, estaduais, municipais e distrital e também às instituições de educação infantil comunitárias, confessionais ou filantrópicas sem fins lucrativos e conveniadas com o Poder Público (BRASIL, 2017).

Os materiais distribuídos pelo MEC às escolas públicas de educação básica do país são escolhidos pelas escolas, desde que inscritos no PNLD e aprovados em avaliações pedagógicas coordenadas pelo Ministério da Educação e que conta com a participação de uma comissão técnica específica, integrada por especialistas das diferentes áreas do conhecimento correlatas, cuja vigência corresponderá ao ciclo a que se referir o processo de avaliação (BRASIL, 2017). As obras são inscritas pelos detentores de direitos autorais, conforme critérios estabelecidos em edital, e avaliadas por especialistas das diferentes áreas do conhecimento. Se aprovadas, compõem o Guia Digital do PNLD, que orienta o corpo discente e o corpo diretivo da escola na escolha das coleções para aquela etapa de ensino (BRASIL, 2017).

3.2. ANÁLISE DE LIVROS DIDÁTICOS DE FÍSICA POR OUTROS AUTORES

Com o objetivo de entender melhor o panorama dos materiais didáticos, que são o principal aliado do professor na prática didática, foi realizado uma breve pesquisa bibliográfica, acerca de como os materiais disponibilizados pelo PNLD que tratam o assunto de física moderna. Para tal foi consultado dois artigos que investigam sobre isso.

Rodrigues e Oliveira (1999) analisaram o trabalho de transposição didática, mais especificamente sobre a parte da teoria da relatividade em livros didáticos do ensino médio, foram analisados dois livros do ensino médio (FILHO, 1997; MÁXIMO; ALVARENGA, 1997). Foram comparados os conteúdos de relatividade restrita apresentadas nesses livros com os apresentados nos livros universitários básicos e com artigos de divulgação científica, a conclusão dos autores foi que, a principal fonte para o conteúdo relacionado a teoria da relatividade restrita, são os **artigos de divulgação científica**. Artigos esses que de acordo com os autores possuem caráter, informativo e não formativo, como se espera que seja um livro didático. Logo, é possível perceber que o conteúdo de física moderna é apresentado não de maneira lógica e progressiva, mas sim assumindo um caráter de curiosidade, ou **leitura complementar**.

Pereira et al. (2019) realizaram um trabalho investigativo de natureza qualitativa, fazendo um recorte bibliográfico de obras que analisam a forma com que os livros didáticos apresentam conteúdos de Física Moderna, no total foram analisadas oito produções entre dissertações e teses:

Número de Trabalhos	Autor (a). Título. Orientador (a)	Produção/ Instituição	Cidade/ Estado	Área de Conhecimento/ Ano
1	SIMÕES, C. C. Elementos de Astronomia nos livros didáticos de Física. Orientadora: Yassuko Hosoume.	Dissertação Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais	Belo Horizonte/MG	Educação/ 2008
2	GARCIA, L. V. S. A Física Moderna e Contemporânea no ensino médio: caminhos para sala de aula. Orientadora: Maria Regina Dubeux Kawamura.	Dissertação Universidade de São Paulo	São Paulo/ SP	Educação/ 2009
3	DOMINGUINI, L. O conteúdo Física Moderna nos livros didáticos do PNLEM. Orientador: Vidalcir Ortigara	Dissertação Universidade do Extremo Sul Catarinense	Criciúma/SC	Educação/ 2010
4	MONTEIRO, M. A. Discursos de professor(a)es e de livros didáticos de Física do ensino médio em abordagens sobre o ensino da Física Moderna e Contemporânea: algumas implicações educacionais. Orientador: Roberto Nardi	Tese Universidade Estadual Paulista	Bauru/ SP	Educação/ 2010

5	MEGGIOLARO, G. P. A abordagem da dualidade onda-partícula em livros didáticos de Física do ensino médio. Orientadora: Cátia Maria Nehring	Dissertação Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul	Ijuí/RS	Educação/ 2012
6	CAVALCANTE, A. B. S. Energia Nuclear no ensino médio: uma análise dos livros didáticos de Física dos programas PNLEM 2007 e PNLD 2012. Orientadora: Maria Inês Martins	Dissertação Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais	Belo Horizonte/ MG	Educação/ 2013
7	BERNARDO, F. L. Análise praxeológica de tópicos de Física Moderna em livros didáticos do Programa Nacional do Livro Didático. Orientador: Frederico Firmo de Souza Cruz	Dissertação Universidade Federal de Santa Catarina	Florianópolis/ SC	Educação/ 2015
8	MARTINS, V. R. O ensino da Física Moderna nos livros didáticos do início do século XX. Orientadora: Cristina Leite	Dissertação Universidade de São Paulo	São Paulo/ SP	Educação/ 2015

Tabela 1 - Trabalhos analisados por Pereira et al.

Fonte: Pereira et al.

A análise revelou uma desarticulação entre o que sugere os documentos oficiais e o entendimento dos autores e editores de livro didático sobre como deve ser abordado o conteúdo da Física Moderna. Os principais problemas destacados foram:

- A abordagem de Física Moderna se encontra no final da programação, normalmente no último capítulo.
- Se encontra presente no livro de maneira escassa, se comparado a outros conteúdos.
- Ausência quase total de conteúdo acadêmico de caráter formativo, os que têm, são tratados de maneira superficial à nível de curiosidade.

3.3. ANÁLISE DAS COLEÇÕES MAIS RECENTES

As análises feitas por Rodrigues e Oliveira e até as de Pereira et al. são referentes a coleções mais antigas de livros didáticos. Visando ter um panorama mais atual da situação, foi realizada uma pesquisa de cunho bibliográfico dos livros didáticos de Biscuola (2016), Guimarães, Piqueira e Carron (2016) e Edições (2016).

3.3.1. GUALTER E NEWTON

O livro de Gualter e Newton, assim como destacado anteriormente, expõe o conteúdo de física moderna na sua seção final, especificamente sobre o conteúdo de relatividade restrita, o livro faz uma breve contextualização histórica sem entrar em muitos detalhes. O livro faz questão de deixar claro já de início que irá tratar apenas de alguns pontos da teoria.

Após a contextualização, Gualter e Newton apresentam os postulados e discorrem sobre as consequências cinemáticas, tais quais, contração espacial, dilatação temporal, composição de velocidades, aumento de massa com a velocidade e equivalência entre massa e energia.

O livro se utiliza do formalismo matemático na medida certa para explicar os fenômenos da melhor forma possível, também utilizando e discutindo os famosos experimentos imaginários, utilizados pelo próprio Einstein para desenvolver a teoria. Entretanto, o livro não apresenta exemplos reais e factíveis do uso da teoria, limitando-se apenas às situações hipotéticas dos experimentos mentais.

3.3.2. GUIMARÃES, PIQUEIRA E CARRON

Assim como no caso anterior, o livro de Guimarães et. al. também expõe o conteúdo de Física Moderna na sessão final do livro, algumas poucas páginas foram dedicadas para a Teoria da Relatividade Restrita. E da mesma forma que o anterior o livro apresenta os postulados e discorre sobre as consequências cinemáticas trazidas por eles, utilizando, também, do formalismo matemático na medida certa. Porém, diferentemente do anterior o livro apresenta mais casos de fenômenos reais que envolvem a teoria, como o decaimento de múons, e também discute mais sobre alguns aspectos históricos envolvidos no desenvolvimento da teoria.

3.3.3. SER PROTAGONISTA

“Ser Protagonista” não difere muito dos dois anteriores, no quesito da quantidade de páginas da abordagem em si, do conteúdo de Física Moderna, porém, para o caso, da Teoria da Relatividade, em específico, o livro dedica pouquíssimas páginas, utilizando apenas uma página para cada uma das versões da teoria, como consequência, toda a discussão é bastante superficial, a maneira como é abordada, faz a teoria da relatividade soar apenas como uma curiosidade. As consequências cinemáticas, que foram muito bem discutidas nos casos anteriores recebem aqui,

um pequeno espaço, no canto lateral da página em uma sessão intitulada: “conceito em questão”.

3.4. ANÁLISES E DISCUSSÕES ACERCA DA PESQUISA

Após a leitura de diversos artigos e também análise direta dos materiais didáticos disponibilizados aos professores, não é difícil perceber a insuficiência com o qual é tratado o conteúdo da física moderna nos livros didáticos do ensino médio.

Dessa forma, o professor que queira discutir o conteúdo de maneira adequada, com caráter formativo e não informativo como é apresentado nos livros didáticos, necessita de um material no qual possa basear suas aulas. Pensando nisso, foi redigido uma proposta de sequência didática sobre o conteúdo de Relatividade Especial. Utilizando o aspecto histórico do desenvolvimento da teoria como base para a disposição das atividades, e também pensando no caráter qualitativo e quantitativo da teoria, tal como as aplicações da mesma em âmbito tecnológico.

4. PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Para Zabala (1998), uma sequência instrucional é uma série ordenada e bem definida de atividades que formam uma unidade instrucional. Elas são (ou pelo menos devem ser) planejadas e desenvolvidas para atingir determinados objetivos educacionais. Zabala discute em profundidade 4 unidades de ensino em "Prática Educacional", sendo a última considerada a mais completa e a mais recomendada. Cada unidade é analisada para ver que tipo de conteúdo ela usa, se conceitual (C), processual (P) ou atitudinal (A).

A tabela a seguir apresenta as unidades didáticas e o tipo de conteúdo que elas trabalham, de acordo com Zabala:

Tabela 2 – As unidades didáticas e seus conteúdos, segundo Zabala

Unidade 1	Conteúdos		
1. Comunicação da Lição	C		
2. Estudo Individual	C	P	
3. Repetição do conteúdo aprendido	C	P	
4. Prova ou Exame	C		
5. Avaliação	C		
Unidade 2	Conteúdos		
1. Apresentação de uma situação Problemática	C		
2. Busca de soluções	C	P	A
3. Exposição do conceito e algoritmo	C	P	
4. Generalização	C	P	
5. Aplicação	C	P	
6. Exercitação	P	C	
7. Prova ou exame	C	P	
8. Avaliação	C	P	
Unidade 3	Conteúdos		
1. Apresentação de uma situação Problemática	C		
2. Diálogo entre professores e alunos	C	P	A
3. Comparação dos pontos de vista	C	P	A
4. Conclusões	C		
5. Generalização	C		
6. Exercícios de memorização	C	P	
7. Prova ou exame	C		
8. Avaliação	C		
Unidade 4	Conteúdos		
1. Apresentação de uma situação Problemática	C		
2. Problemas ou Questões	C	P	A
3. Respostas intuitivas ou suposições	C	P	A
4. Fontes de informação	C	P	A
5. Busca de informação	P	C	A
6. elaboração de conclusões	P	C	A
7. Generalização	C		
8. Exercícios de memorização	P	C	
9. Prova ou exame	C		
10. Avaliação	C	P	A

Fonte: Zabala (2015).

Observando a tabela, verifica-se que o conteúdo da unidade 1 é basicamente conceitual, as habilidades praticadas são basicamente: fazer anotações, resumir e memorizar exercícios, é até mesmo algumas atividades de natureza procedimental, mas a disposição das atividades em si não contribui para isso.

No caso da Unidade 2, o material estudado é principalmente procedimental em termos de uso de algoritmos para realizar atividades e conceitual em termos de compreensão de conceitos. O único lugar onde se é possível vislumbrar traços de conteúdo atitudinal é na fase de busca de soluções, que consiste em diálogos entre professores e alunos ou entre alunos. Nas palavras de Zabala o objetivo desta unidade é que os alunos "saibam como fazer" aritmética fracionária, cálculos de velocidade média, etc.

Na Unidade 3, por sua vez, é possível ver atividades que, embora centradas no conteúdo de caráter conceitual, também possuem conteúdo de natureza procedimental e atitudinal, mas que não são objeto de estudo, porque não possuem uma intenção educativa clara, pois nem sequer se destinavam a ser objetos de avaliação. Desta forma, pode-se concluir que o objetivo desta unidade é aprender conteúdos conceituais, ou seja, que os alunos "saibam" temas históricos, sociais, literários, artísticos ou científicos.

Na Unidade 4, ficou explícito que conteúdos de traço, conceitual, procedimental e atitudinal emergiram em quase todas as atividades que formam a sequência. Nesse caso, os alunos têm total controle sobre o ritmo da sequência, atuando constantemente e utilizando diversas técnicas e procedimentos como: diálogo, debate, trabalhos em grupo, pesquisa bibliográfica, pesquisa de campo, produção de questionários, entrevistas, etc. Ao mesmo tempo, eles se deparam com uma série de conflitos sociais individuais e grupais que precisam ser resolvidos, o que significa que eles devem aprender a "ser" de alguma forma: tolerantes, cooperativos, respeitosos, rigorosos, etc.

Desta forma, foi produzido uma sequência de ensino visando principalmente atingir os objetivos da Unidade 4, sobre o conteúdo de relatividade restrita, tal sequência é voltada para alunos do terceiro ano do ensino médio, foi considerado que a disciplina de física tem apenas 2 aulas semanais e que o conteúdo será ministrado nas últimas semanas do ano letivo.

4.1.PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA: A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Objetos do Conhecimento

- Princípio da Relatividade Clássica;
- Newton e o espaço absoluto;
- Éter e propagação de ondas eletromagnéticas;
- Experimento de Michelson e Morley

- Postulados de Einstein;
- Consequências cinemáticas dos postulados;

Habilidades

- Compreender o Princípio da relatividade Clássica
- ter ciência do contexto histórico que corroborou para o surgimento da teoria da relatividade
- compreender e interpretar os resultados do experimento de Michelson e Morley
- Elucidar e discutir acerca dos postulados de Einstein da relatividade
- Deduzir, com base nos postulados as consequências cinemáticas, como dilatação temporal, contração espacial, etc.

Habilidades segundo a BNCC:

- (EM13CNT201⁵) Analisar e discutir modelos, teorias e leis propostos em diferentes épocas e culturas para comparar distintas explicações sobre o surgimento e a evolução da Vida, da Terra e do Universo com as teorias científicas aceitas atualmente
- (EM13CNT301) Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.
- (EM13CNT308) Investigar e analisar o funcionamento de equipamentos elétricos e/ou eletrônicos e sistemas de automação para compreender as tecnologias contemporâneas e avaliar seus impactos sociais, culturais e ambientais.

⁵ O primeiro par de letras EM indica a etapa de Ensino Médio; O primeiro par de números: 13, indica que as habilidades descritas podem ser desenvolvidas em qualquer série do Ensino Médio, conforme definição dos currículos; A segunda sequência de letras: (CNT) indica a área ou o componente curricular representado pelo primeiro par de letras (EM):

CNT = Ciências da Natureza e suas Tecnologias

Os números finais: 201, indicam a competência específica à qual se relaciona a habilidade (que corresponde ao 1º número: 2) e a sua numeração no conjunto de habilidades relativas a cada competência (dois últimos números: 01).

Fonte: Habilidades da BNCC: veja quais são para as etapas da educação básica. (Disponível em: <<https://educacao.imagine.com.br/habilidades-da-bncc/>>.)

Plano de aula

Aula 01

Tempo de aula: 40min

Objetivo da Aula: Verificar os conhecimentos prévios dos alunos acerca da teoria da relatividade, introduzir algumas situações a partir de tirinha, propor debates acerca do que foi apresentado e motivar a criação de mapas conceituais acerca do que foi estudado.

- (10 minutos) Explicar aos alunos o que é um mapa conceitual, como funciona, qual a ideia e como fazê-lo.
- (10 minutos) separar os alunos em grupos (que não seja muito grande nem muito pequeno) e pedir para que façam um mapa conceitual com seus conhecimentos (que até então espera-se que seja pouco) sobre a teoria da relatividade. (aqui como possível alternativa o professor também pode optar por aplicar um simples questionário para verificar os conhecimentos prévios dos alunos)
- (20 Minutos): Distribua a seguinte Tirinha aos grupos:

Figura 9 - Quadrinho: Calvin and Hobbes



Fonte: Acervo do escritor William Boyd Watterson II. Disponível em:
<https://sites.google.com/site/sitedoperon/quadrinhos>

O professor pode optar por levar a tirinha impressa, exibir para todos os alunos com a ajuda de um projetor. Dessa forma, é possível fazer os seguintes questionamentos:

1. Qual o objetivo de Calvin nessa tirinha? (espera que a maioria dos alunos responda, “testar a teoria da relatividade”)
2. O que seria a teoria da relatividade que ele pretendia testar? (espera-se novamente que a maioria responda o que está no quadrinho: quanto mais rápido se move mais lentamente o tempo passa?)
3. E deu certo? ele conseguiu testar a teoria? (espera-se que a maioria responda, não)
4. Por que ele não conseguiu testá-la?
5. Deixe os grupos discutirem a resposta das perguntas e ouça atentamente a discussão. Se possível anote (ou peça que os alunos anotem) as respostas para serem discutidas na próxima aula.

Aula 2

Tempo de aula: 40min

Objetivo da Aula: Introduzir e discutir o princípio da relatividade através dos exemplos de Galileu

Parte 1 - Exemplo do Trem (ou Navio)

(20 minutos) Nesse primeiro momento pode-se começar a aula com o clássico exemplo do trem ou navio de Galileu, onde ele supõe que uma pessoa dentro de um trem/navio inicialmente em repouso e posteriormente colocado em movimento, realiza diversos experimentos, tal qual arremessar uma bola para cima e pegá-la. Aqui o professor pode optar por realizar a aula com o auxílio de um projetor, mostrando gifs ou trechos de vídeos para os exemplos, ou utilizando o quadro fazendo desenhos esquemáticos.

É interessante que o exemplo se desenvolva sempre com a ajuda dos alunos, sugere que o professor monte de forma que o aluno possa se sentir realizando a ação, se julgar pertinente o professor até pode pedir para um dos alunos realizar uma ação ou outra.

Ao final da discussão a pergunta que pode ser feita é: É possível, para quem está dentro do trem/Navio, distinguir quando ele está em repouso ou em movimento?

Parte 2 - Referenciais Inerciais

(Tempo aproximado: 20 minutos) Aqui o professor pode usar mais um exemplo, pode ser novamente o exemplo do navio ou qualquer outro semelhante, para demonstrar o que é um referencial e como referenciais em repouso ou em movimento uniforme retilíneo não possuem distinção entre si. Há diversos exemplos que o professor pode usar aqui, como o de um peixe/barco que esteja sendo levado pela correnteza de um rio, o peixe/barco, está parado em relação às águas do rio (que se movem junto com ele) porém, está em movimento em relação às margens do rio. Entretanto, é importante deixar claro para os alunos que do ponto de vista desses dois referenciais, não há como saber se quem está se movendo é o peixe/barco e as margens estão em repouso, ou se é o peixe/barco estão em repouso e as margens que se movem na direção contrária. Da mesma forma, como é possível saber se a Terra gira de leste para oeste ou se são as estrelas e todos os demais corpos que giram na direção contrária?

Aula 3

Tempo de aula: 40min

Objetivo da Aula: demonstrar através de uma simulação a equivalência entre os referenciais no que se refere às medidas de velocidade e distância.

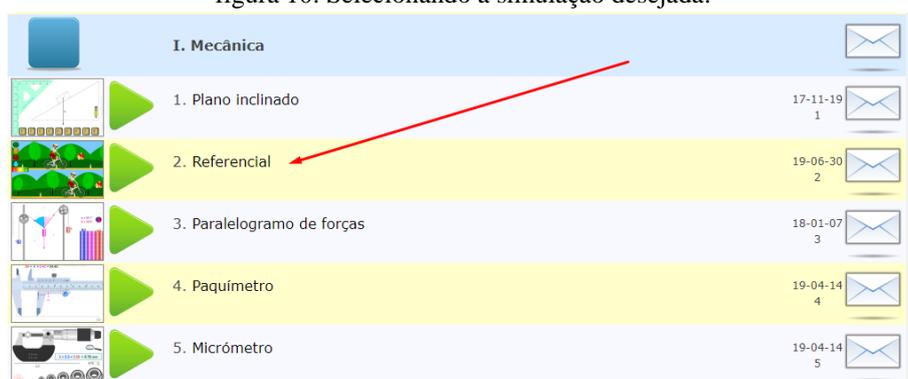
Recursos adicionais: Laboratório de Informática ou projetor multimídia.

A Simulação

Para essa atividade o professor pode optar por levar os alunos em uma sala de informática, caso esteja disponível, ou, caso não seja possível, utilizar um projetor para realizar a simulação com a turma.

O simulador aqui utilizado é o desenvolvido pelo professor Dr. Vladimir Vascak disponíveis gratuitamente (e em português) no site do próprio autor. A simulação em questão a ser utilizada é a "Referencial", para isso, basta na tela inicial, clicar na área correspondente a simulação (Figura 10).

figura 10: Selecionando a simulação desejada.



fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Após selecionar a simulação, será possível ver uma tela com uma bicicleta, em que apenas suas rodas estarão em movimentos, além de três botões coloridos que controlam as ações da simulação (Figura 11).

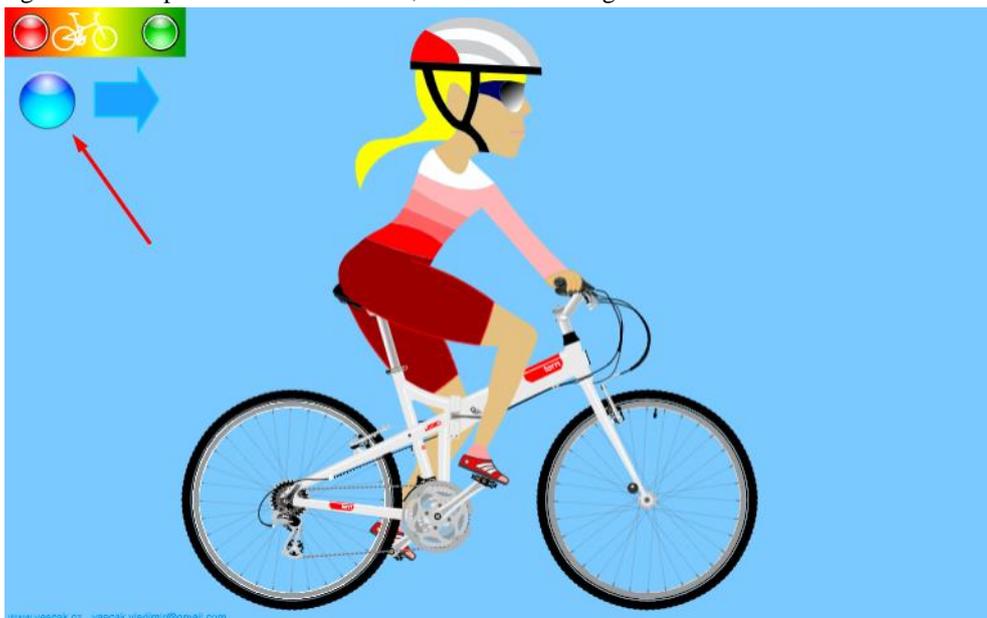
Figura 11 - Tela inicial da simulação



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Nesta tela inicial, o botão verde aumenta a velocidade das rodas, enquanto o vermelho diminui. Já o botão azul coloca uma figura em cima da bicicleta, como mostrado a seguir (Figura 12):

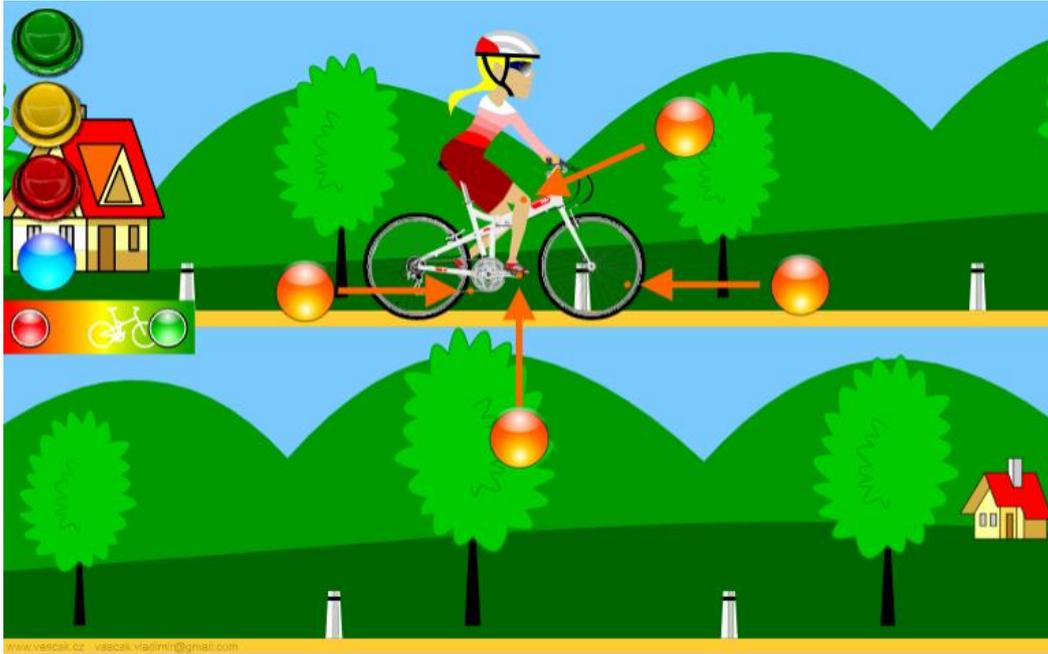
Figura 12 - Ao pressionar o botão azul, é adicionado a figura de uma ciclista sobre a bicicleta.



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Porém, não há muito o que se fazer ou comentar com os alunos nessa interface, por isso recomenda-se, utilizar a segunda interface da simulação, que se consegue acesso ao clicar na seta azul, que fica ao lado do botão azul, no canto superior esquerdo (Figura 13):

Figura 13 - Interface geral do simulador de referência



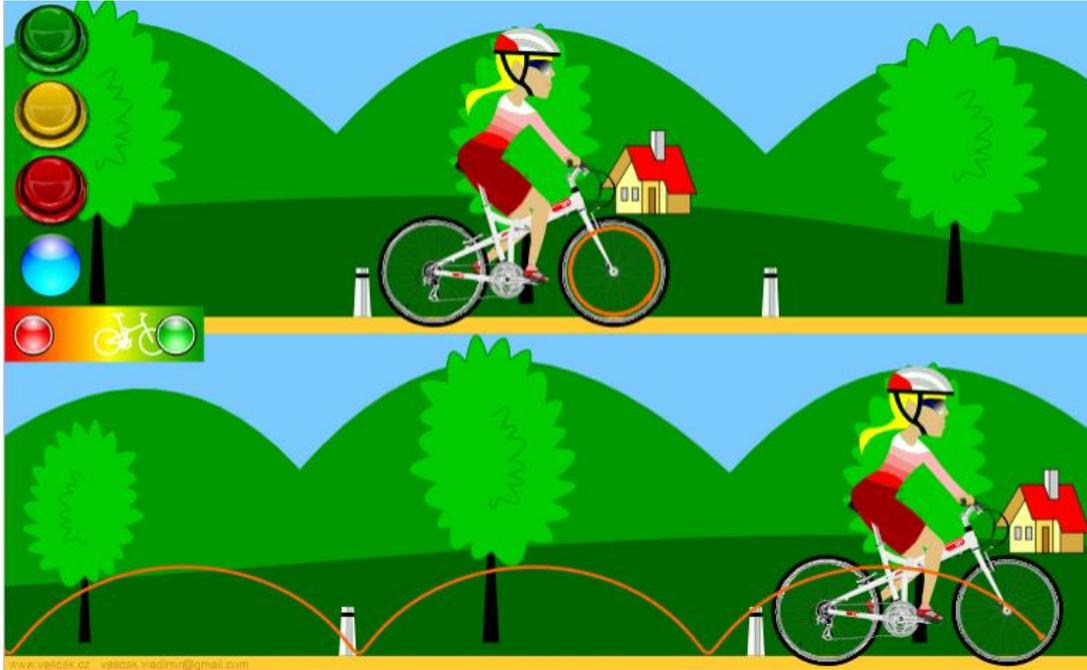
Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Nessa simulação temos dois referenciais, o de cima, acompanha o movimento da bicicleta, portanto está parado em relação à mesma, e o de baixo está em repouso em relação a estrada. temos, novamente a presença de alguns botões coloridos, como:

- Verde: Inicia a simulação, dando início ao movimento da bicicleta
- Amarelo: Pausa a simulação
- Vermelho: Para a Simulação, voltando a tela inicial (da simulação)
- Azul: Troca o desenho do ciclista (para possibilitar uma melhor visualização, caso necessário)
- Amarelo: Escolhe o ponto da bicicleta e ciclista onde se quer analisar o movimento e trajetória
- Verde e amarelo menores: Aumentar ou diminuir a velocidade da bicicleta, respectivamente.

Após escolher, utilizando o botão amarelo, um ponto para analisar o movimento (por exemplo: A roda dianteira) a simulação terá início, e o movimento do ponto escolhido poderá ser visto da seguinte maneira na simulação:

Figura 14 - Simulação em andamento.



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Dessa forma, o professor pode usar de uma aula, com o auxílio desse simulador para elucidar melhor a questão dos referenciais, já discutidos nos exemplos dados na aula anterior. Caso queira, o professor também pode optar por distribuir um pequeno questionário para orientar e ordenar as ações dos alunos (isso caso a atividade seja realizada em uma sala de informática).

Aula 04

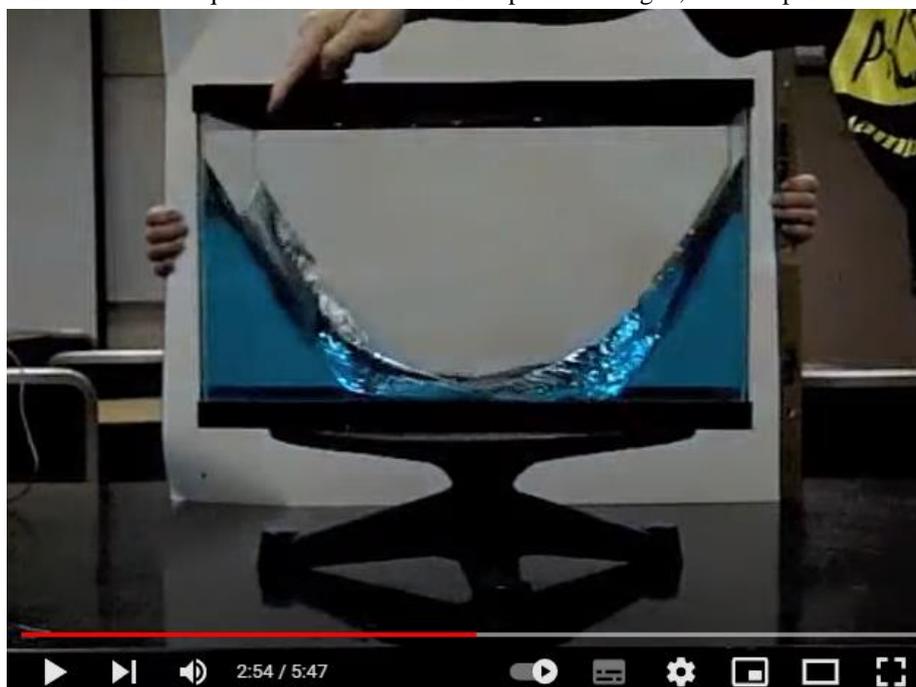
Tempo de aula: 40min

Objetivo da Aula: Explicar o Experimento do balde girante de Newton e as conclusões por ele tiradas

Recursos adicionais: Projetor multimídia.

(25 min) Nesse primeiro momento da aula, o professor pode começar dando um pequeno contexto histórico acerca de como Newton, chamou a atenção para a diferença entre os movimentos de translação e rotação, propondo e realizando, o experimento do balde girante (MARTINS, 2006, p08). Assim como já realizado anteriormente o professor pode, com auxílio da lousa fazer figuras esquemática para demonstrar a situação ou utilizar vídeos (Figura 15).

Figura 15 – Frame de um vídeo que mostra a curvatura na superfície da água, causada pelo movimento de rotação



Fonte: Youtube (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Zip9ft1PgV0>)

Posteriormente, pode-se discutir com os alunos as possíveis causas do Efeito, e ainda exibir um outro vídeo mostrando o fenômeno do referencial do balde, ou seja, através de uma câmera que está girando junto com o conjunto (Figura 16).

Figura 16 – Frame do vídeo mostrando que é possível ver a curvatura da água.



Fonte: Youtube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NOBh6FZIJAI>

(15 min) após a exibição do vídeo discutir e motivar o debate das possíveis causas de tais fenômenos com os alunos, elucidando que para explicar isso, Newton usa como base a existência de um “espaço absoluto”, um referencial privilegiado, onde, movimentos com velocidade de translação absoluta não produzem efeitos, porém movimentos com velocidades de rotação produzem. Se possível também ressaltar que Newton posteriormente foi severamente criticado por isso.

Tempo de aula: 40min

Objetivo da Aula: Realizar uma breve discussão e revisão sobre ondas, e lembrar que as ondas mecânicas são aquelas que necessitam de um meio para se propagar, enquanto as ondas eletromagnéticas são as que não necessariamente precisam, portanto, sendo capazes de se propagar no vácuo.

(20 min) Essa é uma aula de revisão, com o auxílio do quadro, ou qualquer outro meio que achar pertinente, o professor pode revisar, sempre contando com a interação dos alunos o que é uma onda, e quais as propriedades delas no geral. É importante deixar claro que a luz, apesar de ser uma onda eletromagnética e não precisar de meio para se propagar, nem sempre foi assim que se imaginava, como a ideia sugerida por Christiaan Huygens, de que a luz seria uma onda que se propaga num meio transparente com propriedades especiais e que preenche todo o espaço, chamado de éter luminífero.

(20min) Leitura de um trecho do texto: “Histórias das Ciências: A construção dos modelos atômicos – Por que um Éter”.

Disponível em:

https://extensao.cecierj.edu.br/material_didatico/cee1809/scripts/pop_mod04_PqEter.html

Aqui o professor pode imprimir uma cópia do texto para cada aluno, ou, caso não seja possível, utilizar o projetor multimídia para mostrar o texto para a turma, a dinâmica de leitura pode ser da maneira que o professor desejar, porém, é recomendado que seja alunos que leiam, e que o professor apenas solte comentários instigando a discussão e o debate entre os alunos.

Aula 6

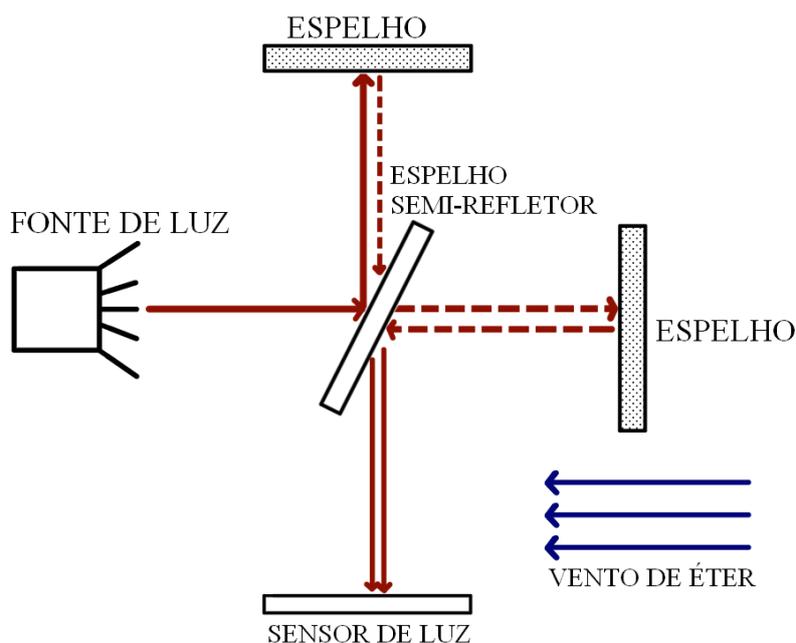
Objetivo da Aula: Explicar, analisar e discutir o experimento de Michelson-Morley e Seus Objetivos

Recursos adicionais: laboratório de informática ou projetor multimídia

Esta atividade pode ser dividida em 2 aulas de 40 minutos cada (se for em sequência é ainda melhor), onde a primeira delas será dedicada a uma explicação de caráter histórico-contextual sobre o que pretendia o experimento de Michelson-Morley. Já a segunda aula será realizada na sala de informática ou com a ajuda de um projetor multimídia, usando o novamente o simulador do professor Dr. Vladimir Vascak para observar uma animação simplificada de como seria o experimento, e ver qual era o resultado esperado, e qual foi o resultado obtido.

Primeira parte da atividade) **(40 min):** O professor pode usar essa primeira aula para fazer uma revisão história sobre tudo que foi visto até aqui, e depois introduzir o experimento de Michelson, sempre deixando claro qual era seu objetivo, detectar o movimento da Terra em relação ao éter (Figura 17).

Figura 16 - Esquema simplificado do experimento de Michelson Morley.



Fonte: Redesenhado pelo autor deste trabalho.

O professor pode utilizar o esquema acima (seja desenhado na lousa ou impresso) para explicar que o experimento consiste em separar um raio de luz em dois, utilizando um espelho semi-prateado (ou semi-refletor), e fazer com que os raios separados sigam percursos

perpendiculares, sendo refletidos por espelhos e voltando a se encontrar novamente no espelho semi-refletor posicionado ao centro. depois de se encontrarem os raios vão se combinar e ir em direção a um sensor de luz, onde devido a diferença de fase entre os raios se formará uma figura de interferência.

Em outras palavras, como destacado por Karam et al. (2015) o experimento consistia em comparar os intervalos de tempo necessários para a luz percorrer uma mesma distância, no sentido paralelo ou transversal à direção de movimento da Terra em relação ao éter, pois até aquele momento acreditava-se que a velocidade da luz não deveria ser isotrópica.

Portanto girando o aparato experimental em um ângulo de cerca de 90° , esperava-se que houvesse uma mudança significativa na figura de interferência vista no aparato, já que teria uma alteração relativa na direção do vento de éter, fazendo com que a velocidade do raio de luz na direção transversal a ele fosse alterada.

O primeiro experimento realizado por Michelson foi considerado inconclusivo, pois o deslocamento das franjas observado na figura de interferência foi inferior não só ao esperado, como inferior à margem de erro do instrumento de Michelson, Posteriormente Michelson, com auxílio de Morley, melhorou bastante seu aparato e realizou novamente o experimento várias vezes em diversas épocas do ano. Porém, o resultado ainda seguia o mesmo: nada foi detectado.

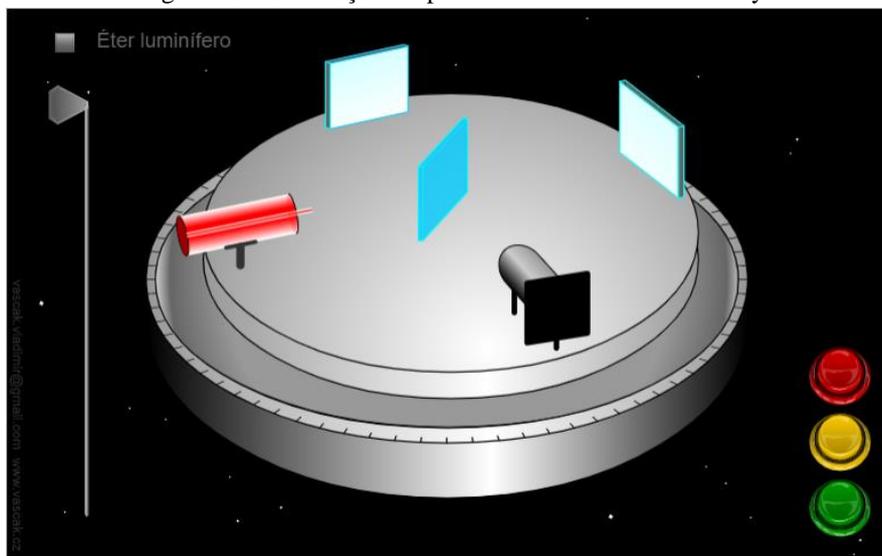
Aula 7

Objetivo da Aula: Dar continuidade as atividades feitas na aula 6.

Recursos adicionais: laboratório de informática ou projetor multimídia

(40 min) Nessa aula, após ter feito explicação teórica qualitativa do experimento, o professor pode, novamente, através de uma simulação, mostrar o experimento em si para a turma, para isso, ele pode optar por levar os alunos em uma sala de laboratório de informática, ou, com o auxílio de um projetor multimídia, exibir a simulação para toda a turma. A simulação, pode ser encontrada no site: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt> pode ser exibida para os alunos através da seção “XIII. Relatividade restrita”, bastando acessar “1. Experiência de Michelson-Morley” (Figura 18).

Figura 18 – Simulação: Experiência de Michelson-Morley



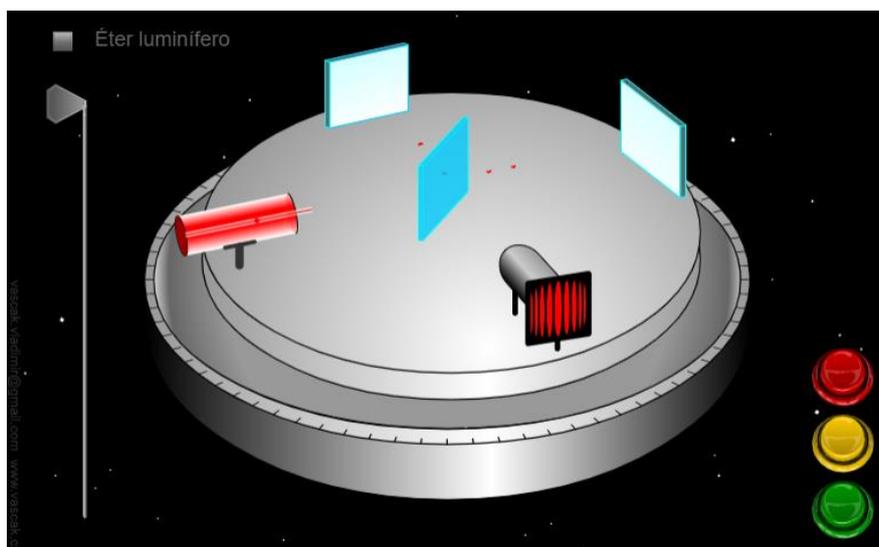
Fonte: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=str_michelson&l=pt

Sendo assim, a interface do simulador consiste em:

- Botão “Éter Luminífero”: Ativa o éter luminífero, fazendo ser visualizado o efeito na figura de interferência caso realmente houvesse a presença desse meio especial;
- Barra de Regulagem: Altera a orientação do aparato experimental
- Botão vermelho: Para a simulação, fazendo com que o aparato volte para a configuração original;
- Botão amarelo: pausa a simulação;
- Botão verde: Inicia ou reinicia a simulação;

Para começar, aperte o botão verde, assim a simulação terá início, o feixe de luz sairá da fonte e chegará ao espelho semi-refletor, o raio será dividido em dois e cada um deles refletirá em um espelho mais a frente, dessa forma, voltando e se encontrando no espelho central, a soma dos dois feixes será vista como uma figura de interferência no aparato (Figura 19).

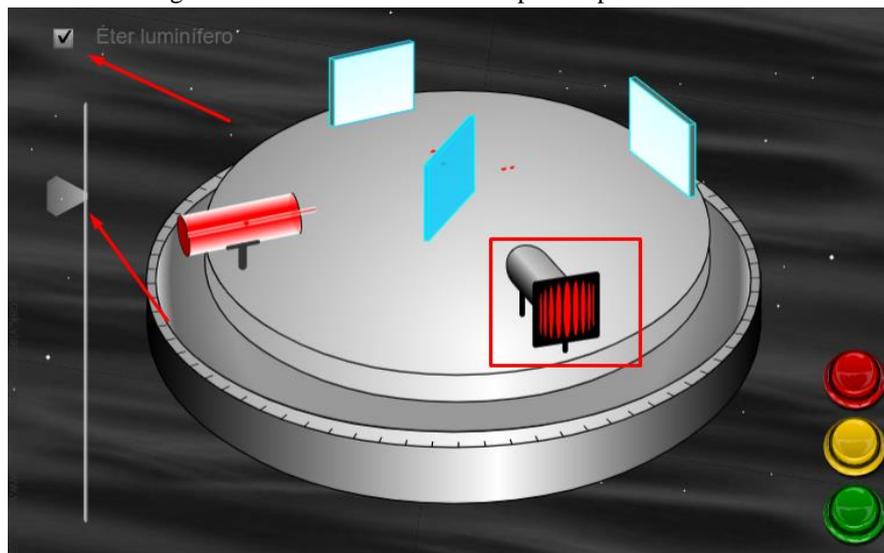
Figura 19 – Padrão de interferência causado pelo reencontro dos feixes no espelho central



Fonte: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=str_michelson&l=pt

Através da utilização do simulador de Michelson, em ambos os dois experimentos feitos, esperava-se que fluxo de éter luminífero faria a velocidade dos feixes de luz se alterar quando o aparato fosse girado, dessa forma alterando também a figura de interferência vista no aparato. O resultado esperado é possível de ser visualizado ativando o botão “Éter Luminífero” e novamente rotacionando o aparato (Figura 20).

Figura 20– Obtendo o resultado esperado por Michelson.



Fonte: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=str_michelson&l=pt

Dessa forma se torna possível demonstrar para os alunos a diferença entre o resultado esperado e o resultado obtido por Michelson, e porque após isso ficou muito mais difícil de defender a ideia de um “éter luminífero”.

Aula 8, 9 e 10

Objetivo da Aula: debater e discutir como tudo que foi discutido anteriormente culminou na Teoria da Relatividade de Einstein, apresentar os postulados, e a partir deles, discorrer algumas das consequências cinemáticas, como a dilatação temporal e a contração espacial.

Recursos adicionais: laboratório de informática ou projetor multimídia

Aula 8 (40 Min) Finalmente, depois de discutir um pouco do contexto histórico, é chegado a hora de introduzir os postulados de Einstein. Para isso, o professor pode usar de uma típica aula tradicional, sempre lembrando de contar com a ajuda dos alunos para exemplos, discussões debates etc., o professor pode discutir, como, apesar de parecer simples, esses postulados (principalmente o segundo) contrariam e muito o que se entende como senso comum. O professor pode até aproveitar aqui e fazer uma breve revisão sobre o conceito clássico de composição de velocidades e como o mesmo não se aplica a luz.

Aula 9 e 10 (80 Min) Após introduzir os postulados, o professor pode utilizar as aulas restantes para deduzir as principais consequências cinemáticas, como a dilatação temporal, e a contração espacial, para isso o professor pode optar por realizar uma aula dentro da sala de aula, com auxílio da lousa, de maneira mais tradicional, ou ainda se preferir, como nos casos anteriores, também pode contar com o uso de simulações, para que os alunos tenham uma melhor visualização dos fenômenos.

As simulações de dilatação e contração espacial, assim como a de Michelson-Morley, também podem ser encontradas na seção “XIII. Relatividade restrita”, basta escolher uma das duas e clicar (Figura 21).

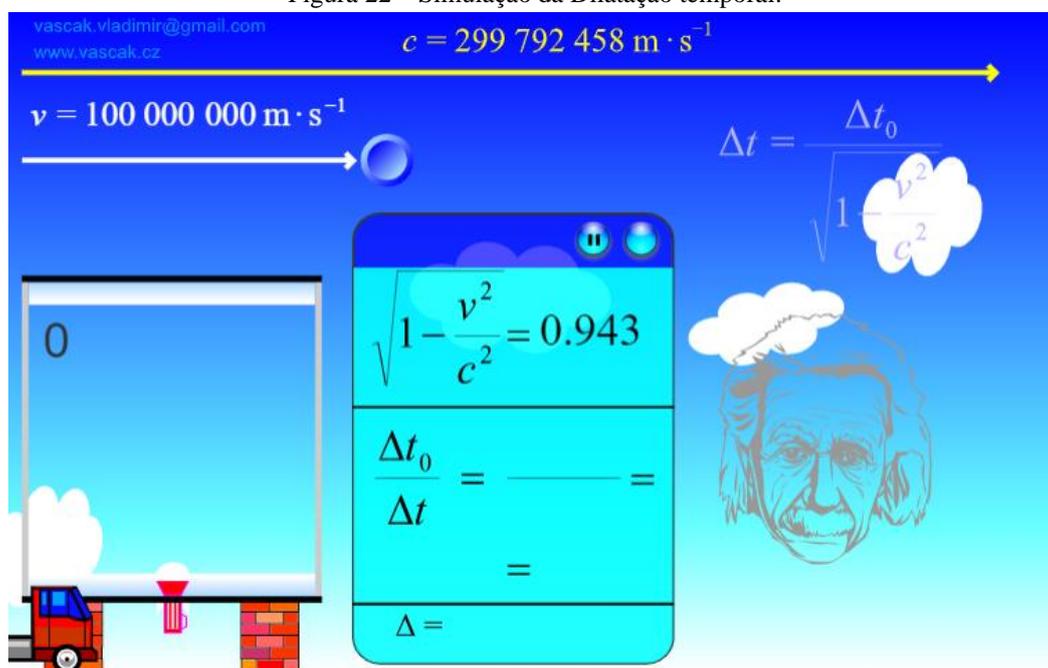
Figura 21 – Simulações Dilatação temporal e contração espacial



Fonte: <https://www.vascak.cz/?id=1&language=pt>

Selecionando qualquer um dos dois, como por exemplo, o de dilatação do tempo, o simulador abrirá em uma janela separada, o layout assim como os anteriores é bastante simples (Figura 22).

Figura 22 – Simulação da Dilatação temporal.



Fonte: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?s=str_dilatace&l=pt

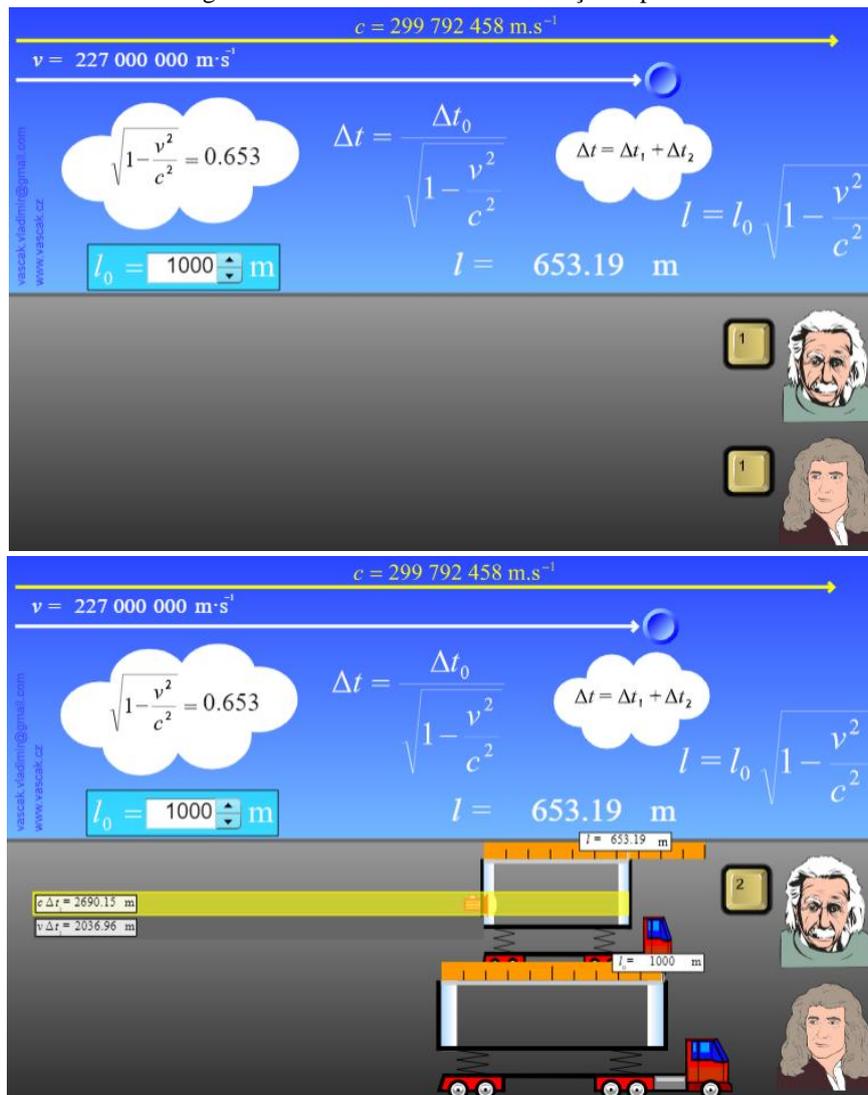
Para iniciar a simulação é bastante simples, basta clicar na figura do caminhão no canto inferior esquerdo, fazendo isso o caminhão entrará em movimento na velocidade indicada logo acima ($v = 100\,000\,000\text{ m s}^{-1}$), essa velocidade pode ser alterada previamente ou mantida no valor que está.

Quando o caminhão passar pela lanterna rosa logo a frente, um feixe luminoso será disparado no interior da sua caçamba, esse feixe será refletido no interior da caçamba (que se supõe que seja espelhada), e o número de vezes em que esse feixe foi refletido poderá ser comparado com o número de vezes que um outro sinal, lançado simultaneamente, porém, em uma caçamba em repouso em relação ao primeiro, foi refletido.

Já o simulador da contração espacial, segue uma lógica parecida. Porém, agora são dois caminhões que seguem dois caminhos diferentes, um deles segue um caminho que respeita a Teoria da Relatividade de Einstein, enquanto o outro segue por um caminho onde reina o espaço de caráter absoluto de Newton, a velocidade dos caminhões pode ser regulada previamente, tal qual no caso anterior. Ao iniciar a simulação clicando no botão 1 ao lado do desenho de Einstein, a animação mostra a diferença de comprimento entre os caminhões nos

dois percursos, no da relatividade de Einstein, e no do espaço absoluto de Newton (Figuras 23 e 24).

Figura 23e 24 – Simulador da contração espacial.



Fonte: https://www.vascak.cz/data/android/physicsatschool/template.php?f=str_kontrakce&l=pt

E por fim, caso sobre algum tempo o professor ainda pode optar por realizar alguns exercícios de caráter qualitativo e quantitativo acerca da Teoria da Relatividade com os alunos.

Avaliação

Para avaliação, nesse caso aconselha-se a avaliação contínua, ou seja, como foram realizadas várias atividades que exigem a participação dos alunos de maneira prática, é então sugerido que o professor avalie a participação e o interesse demonstrado pelos alunos em cada uma das atividades, este pode acabar (se o professor preferir) fazendo o papel da primeira avaliação, também é sugerido que o professor separe os alunos novamente em grupos, de preferência os mesmos grupos formados na primeira aula, e peça que os alunos novamente façam um novo mapa conceitual sobre o tema, Relatividade, este por sua vez pode acabar fazendo o papel da segunda avaliação, assim a nota dos alunos pode ser calculada da seguinte forma:

$$Nota\ final = \frac{Nota\ de\ Participação + Nota\ do\ mapa\ conceitual}{2}$$

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi realizado visando discutir o panorama do Ensino de Física, mais especificamente Física Moderna no Ensino Médio, além disso, foram realizadas algumas pesquisas de cunho bibliográfico para realçar a importância dos conteúdos de Física Moderna no Ensino Médio. Além de uma investigação a respeito de como os livros didáticos tratam do assunto, os resultados não foram satisfatórios, levando a conclusão de que o professor não conta com um material no qual possa basear suas aulas de maneira satisfatória.

Assim, depois de discutir as bases teóricas e o desenvolvimento histórico da Teoria da Relatividade procurou-se propor uma sequência didática, com base no referencial teórico proposto por Zabala, que possa servir de material para que o professor baseie as suas aulas. Ao longo do trabalho foi possível constatar que não se configura nem um pouco fácil elaborar um material para ensino de física moderna, principalmente por conta das dificuldades apresentadas no contexto da sala de aula.

Apesar da escassa quantidade de matéria teórico sobre o assunto, e da complexidade e abstração necessária para a compreensão de um tema, foi possível elaborar um material que trata o conteúdo de Relatividade Especial com a profundidade e esperada para um ensino de caráter formativo, que atenda as expectativas da base nacional comum curricular (BNCC). espera-se que o professor possa montar sua aula da maneira que achar mais adequada e também complementar a proposta, caso seja possível, ou caso sinta a necessidade, de acordo com a realidade do ambiente escolar no qual atua.

REFERÊNCIAS

A. VILLANI, “O Confronto Einstein-Lorentz e suas Interpretações. III. “A *heurística de Einstein*”, Rev. Ens. Fis. 3, 23 (1981).

BAROJAS, J. Redes cooperativas na educação da Física. (Trad). 1 ed. Nova Iorque: Instituto Americano de Física, 1988. American Inst. of Physics, New York, 1988.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018.

ESPAÇO E TEMPO ABSOLUTOS. **FÍSICA**, 2020. Disponível em: <https://webfisica.com/fisica/curso-de-fisica-basica/aula/12-89>. Acesso em: 03 de mar. de 2023

BISCUOLA, G. J; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **FÍSICA 3**. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

BRASIL. Ministério da Educação. **PNLD: FÍSICA – Guia de Livros Didáticos**. Brasília: Ministério da Educação, Secretária de Educação Básica, 2021.

EDIÇÕES, SM. **Ser Protagonista**. 3 ed. São Paulo: SM, 2016.

EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, v. 17, p. 891-921, 1905. (Tradução para o português: EINSTEIN, A. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento)

EINSTEIN, A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, v. 49, p. 769-822, 1916. (Tradução para o português: EINSTEIN, A. A base da teoria da relatividade geral.)

GONÇALVES, A. F.; TOSCANO, C. **Física e realidade**. São Paulo: Scipione, v. 2, 1997.

GUIMARÃES, O.; CARRON, W.; PIQUEIRA, J. R. **FÍSICA**. 2 ed. São Paulo: Editora ática, 2016.

KARAM, R. A.; CRUZ, S. M. S. C. DE S.; COIMBRA, D. Experiência De Michelson-Morley No Ensino médio: Prerrogativas e Possibilidades. **Educação Científica e Tecnológica**, vol. único, n. 1, p. 1-9, 2016.

LLEWELLYN, R.; TIPLER, A. P. **Física Moderna**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC - livros técnicos e Científicos, 2011.

MARTINS, R. de A. O surgimento da teoria da relatividade restrita. 1 ed. São Paulo: Editora Manole, 2006.

MOREIRA, M. A. Uma análise crítica do ensino de Física. **Estudos Avançados**. v. 32, n. 94, p. 73-80, 2018.

MUNIZ, S. R. Introdução à Teoria da Relatividade. **Escola de Física Contemporânea**, v. único, n. 1, p. 1-9, 2015.

NEWTON, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural**. 2 ed. São Paulo: Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

OLIVEIRA, F. F. de; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, p. 447-454, 2007.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma Revisão Bibliográfica sobre a Área de Pesquisa “Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio.” **Investigações em Ensino em Ciências**, vol. 5, n. 1, pp. 23-48, 2000.

PEREIRA, P. do N.; GUERINI, S. C.; SÁ-SILVA, J. R. Os conteúdos de Física Moderna em livros didáticos de Física do Ensino Médio. **Debates em Educação**, v. 11, n. 24, p. 106-124, 2019.

PICIN, C. **Referencial - Balde de Newton**. YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=NOBh6FZIJAI>. Acesso em: 03 de mar. de 2023.

RODRIGUES, C. D. O.; OLIVEIRA, M. P. A Abordagem da Relatividade Restrita em Livros Didáticos do Ensino Médio e a Transposição Didática. **II Encontro Nacional de Pesquisa em educação em ciências**, vol. 2, n. 1, p. 1-12, 1999.

RUSSEL, D. **Centrifugal Force on Rotating Water Container**. YouTube, Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Zip9ft1PgV0>. Acesso em: 02 de mar. de 2023.

VIDEIRA, A. L. L. Um dos Maiores – Se Não Mesmo o Maior dos Feitos na História do Pensamento Humano": A Teoria da Relatividade Geral. **MONOGRAFIAS-CBPF**, v. 2, n. 1, 2016.

VIEIRA, S. et al. Uma comparação entre deduções da equação $E=mc^2$ (A Comparison Among Deductions of the Equation $E=mc^2$). v. 26, n. 2, p. 93–98, 2004.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. 4 ed. São Paulo: Penso Editora, 2015.