



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CAMPUS AGRESTE

NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE

CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA

JONATHA ALVES DE BARROS

**CRIAÇÃO DE UM SOFTWARE EDUCACIONAL QUE POSSIBILITE UM ESTUDO
INICIAL VISUAL SOBRE A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA**

CARUARU

2023

JONATHA ALVES DE BARROS

CRIAÇÃO DE UM SOFTWARE EDUCACIONAL QUE POSSIBILITE UM ESTUDO INICIAL VISUAL SOBRE A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física – Licenciatura do Campus do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Física.

Área de concentração: Ensino de Física.

Orientador (a): Prof. Dr. João Eduardo Fernandes Ramos

Coorientador (a): Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto

CARUARU

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Barros, Jonatha Alves de.

Criação de um software educacional que possibilite um estudo inicial visual sobre a teoria da relatividade restrita / Jonatha Alves de Barros. - Caruaru, 2023. 29 p.

Orientador(a): João Eduardo Fernandes Ramos

Coorientador(a): Gustavo Camelo Neto

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Física - Licenciatura, 2023.

1. Relatividade Restrita. 2. Software Educacional. 3. TICs. I. Ramos, João Eduardo Fernandes. (Orientação). II. Camelo Neto, Gustavo. (Coorientação). IV. Título.

530 CDD (22.ed.)

JONATHA ALVES DE BARROS

CRIAÇÃO DE UM SOFTWARE EDUCACIONAL QUE POSSIBILITE UM ESTUDO INICIAL VISUAL SOBRE A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física – Licenciatura do Campus do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Física.

Aprovado em: 06/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Eduardo Fernandes Ramos (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Heydson Henrique Brito da Silva
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Augusto César Lima Moreira
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo propor a criação de um software educacional que possibilite um estudo inicial visual sobre a Teoria da Relatividade Restrita, diante da problemática de tempo curto nas disciplinas de Física Moderna no ensino superior para o tópico de relatividade restrita. A pesquisa se baseou na análise da literatura sobre a utilização das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) no ensino da Física. A metodologia proposta envolve a criação de um software educacional que possibilite o estudo das transformações de Lorentz no contexto do ensino da Relatividade Restrita. O resultado esperado é um software funcional que ao ser utilizado possibilite uma melhora na compreensão dos conceitos físicos pelos alunos, além de contribuir para a utilização das TICs no ensino da Física.

Palavras-chave: Relatividade Restrita; Software Educacional; TICs.

ABSTRACT

This work aims to propose the creation of an educational software that enables an initial visual study of the Theory of Special Relativity, given the short time available for Modern Physics classes in higher education to cover the topic of special relativity. The research was based on the analysis of literature on the use of Information and Communication Technologies (ICTs) in Physics education. The proposed methodology involves the creation of an educational software that enables the study of Lorentz transformations in the context of teaching Special Relativity. The expected result is a functional software that, when used, improves students' understanding of physical concepts, as well as contributes to the use of ICTs in Physics education.

Keywords: Special Relativity; Educational Software; ICTs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Representação visual da transformação de Lorentz no referencial “verde”	14
Figura 2-	Representação visual da transformação de Lorentz no referencial “azul”	15
Figura 3-	Representação do sistema de coordenadas do software. As linhas mais escuras representam os eixos, as linhas mais claras representam a grade.....	17
Figura 4-	Sistema de coordenadas base do software com o menu interativo.....	18
Figura 5-	A segunda grade (azul) com o referencial do laboratório (rosa) em repouso e as linhas de mundo de fótons (em azul claro) se propagando isotropicamente a partir da origem.....	19
Figura 6-	Referencial se movendo com 60% da velocidade da luz em relação ao do laboratório.....	20
Figura 7-	Perspectiva do referencial adicionado, com sua respectiva grade “deformada” pela transformação.....	21
Figura 8-	Eventos simultâneos no referencial “S”	22
Figura 9-	Eventos simultâneos em “S” vistos por “S”	23
Figura 10-	Distorção na espessura dos eixos quando estão próximos da velocidade da luz.....	25

LISTA DE ABREVIACOES

TICs Tecnologias da Informaco e da Comunicaco

TRR Teoria da Relatividade Restrita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1	TICS e o Ensino de Física.....	11
2.2	A Teoria da Relatividade Restrita.....	12
2.3	Transformações Lineares e a sua representação geométrica no plano cartesiano.....	13
3	METODOLOGIA.....	16
4	O DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE.....	17
5	A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE NO SOFTWARE	22
6	DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	24
6.1	A biblioteca P5.js e a função applyMatrix.....	24
6.2	Novos recursos.....	25
7	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

A Teoria da Relatividade Restrita (TRR) é um tema interessante, mas ao mesmo tempo desafiador para os alunos do ensino superior, especialmente para aqueles que possuem lacunas na sua formação em matemática básica, em geral, e em álgebra linear em particular, dificultando o estudo de disciplinas relacionadas à Física Moderna. A complexidade dos conceitos apresentados pela teoria, como as transformações de Lorentz, pode tornar a aprendizagem desafiadora para alguns, mas desestimulante para outros. Nesse contexto, a utilização de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) pode ser uma ferramenta auxiliar para tornar as ideias mais claras e, conseqüentemente, o aprendizado mais acessível.

A utilização de TICs no ensino pode ser considerada uma prática pedagógica inovadora e promissora. Com o avanço tecnológico, a educação pode se beneficiar de ferramentas que possibilitem uma aprendizagem mais dinâmica, permitindo uma maior interação entre alunos e professores. Além disso, as TICs podem auxiliar na formação de professores, fornecendo ferramentas para a criação de recursos didáticos mais atrativos.

[...] a utilização das TIC potencializa a construção e desenvolvimento do processo de formação do conhecimento e cidadania, apoia os fazeres e práticas pedagógicas e funciona como um relevante instrumento de interação entre os membros do processo educacional [...] (Brandão, 2014, p.17).

Tendo isso em vista, o objetivo deste trabalho é elaborar um software educacional que auxilie no processo de ensino e aprendizagem das transformações de Lorentz, no contexto da Teoria da Relatividade Restrita, considerando o curto tempo tipicamente oferecido para o estudo da temática em cursos de Física Moderna no ensino superior, e apresentar possíveis utilizações práticas do software para o ensino de conceitos da TRR específicos e fáceis de serem visualizados no mesmo.

O software consistirá em um plano cartesiano e em conceitos matemáticos relacionados a transformações lineares que permitirão aos usuários, por meio da visualização desse tipo de transformação, em um contexto de problema relativístico, trocar de referencial e verificar as implicações físicas presentes no problema, como dilatações temporais ou contrações espaciais.

Nas próximas seções trataremos da fundamentação teórica sobre as TICs no Ensino de Física, da TRR e suas implicações matemáticas, da metodologia de criação do software, dos desafios enfrentados na implementação do mesmo e da conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, discutiremos a relevância das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) no processo de ensino e aprendizagem de Física. Também abordaremos brevemente a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) e suas implicações físicas e a matemática presente na mesma, que será necessária não apenas para compreender a teoria, mas também para idealizar e elaborar o software.

2.1 TICs no Ensino de Física

A Física é uma ciência de caráter experimental em sua essência, e a criação de experimentos para utilização em sala de aula pode ser uma alternativa bastante interessante para tornar as aulas mais atraentes. Contudo, muitas vezes a criação de experimentos físicos se torna inviável, seja pela complexidade de tais experimentos, ou, mais comumente, pelos altos custos envolvidos na elaboração dos mesmos, principalmente no contexto do ensino público.

Sabe-se que a Física possui diversos conceitos abstratos e para que os alunos possam compreendê-los, muitas vezes um simples experimento pode facilitar o processo ensino-aprendizagem. Porém, há situações em que o professor não dispõe de tempo e nem recursos financeiros para a elaboração de experimentos (Veronez; Lunkes; Mucheski, 2015, p.153).

Por outro lado, no campo educacional, as TICs têm se mostrado ferramentas úteis no processo de ensino e aprendizagem. A Física, por sua vez, é uma ciência que pode se beneficiar bastante da sua utilização, tendo em vista a maior acessibilidade dos estudantes a esse tipo de ferramenta.

Os estudantes de hoje, desde crianças, já estão integralmente inseridos na era digital, e artefatos como computadores, vídeo games, players de música, câmeras de vídeo, celulares fazem parte do cotidiano deles. Dessa forma, a inserção das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) como elemento mediador no ensino de Física torna-se uma estratégia interessante e pode contribuir significativamente para o processo de ensino e aprendizagem (De lara et al., 2013, p.3).

Diante do exposto, é notória a relevância das TICs no Ensino da Física e do seu potencial na melhora da dinâmica das aulas e da criação de um ambiente que possibilite uma aprendizagem significativa, pois, “todo aparato tecnológico, de

informação e comunicação ajuda a estabelecer um certo grau de proximidade entre o que se sabe e o que se pode saber” (Esteves, 2019 , p.12).

2.2 A Teoria da Relatividade Restrita

Segundo Griffiths (2010), a Teoria da Relatividade Restrita, desenvolvida por Albert Einstein em 1905, é uma teoria que descreve como observadores em referenciais inerciais diferentes devem comparar suas observações sobre fenômenos físicos, tendo como base dois postulados:

- A velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores inerciais, independente do movimento da fonte
- As leis da Física são as mesmas para todos os sistemas de referência inerciais.

A partir desses postulados, uma das muitas consequências foi a necessidade de substituir as transformações de Galileu pelas de Lorentz, que descrevem como as medidas de tempo e espaço se relacionam entre diferentes sistemas de referência em movimento relativo.

As transformações de Galileu, apesar de serem bastante úteis para relacionar referencias inerciais em movimento relativo, elas implicitamente consideram que o tempo passa igualmente para todos os referenciais, e por essa diferença sutil, são incompatíveis com a TRR de Einstein.

The Galilean transformation nevertheless violates Einstein's postulates, because the velocity equations state that a pulse of light moving with speed c along the x -axis would travel at speed $c - v$ in the other inertial frame (Openstax, 2021, p. 200).

As transformações de Lorentz, por sua vez, apesar de não terem sido construídas com o propósito de servir de base para a Teoria da Relatividade Restrita, ela encontrou nessa, sua principal aplicação.

This set of equations, relating the position and time in the two inertial frames, is known as the Lorentz transformation. They are named in honor of H.A. Lorentz (1853–1928), who first proposed them. Interestingly, he justified the transformation on what was eventually discovered to be a fallacious hypothesis. The correct theoretical basis is Einstein's special theory of relativity (Openstax, 2021, p. 201).

Essa teoria teve um impacto significativo na física e na nossa compreensão do universo.

2.3 Transformações Lineares e sua representação geométrica no plano cartesiano

Transformações lineares são um conjunto de transformações matemáticas que fazem parte de um ramo fundamental da matemática: a Álgebra Linear.

Segundo Strang (2009), uma transformação linear é uma função que mapeia um vetor de entrada em um vetor de saída através da multiplicação por uma matriz, em um plano cartesiano. Esse tipo de matriz é conhecido na literatura como Matriz de Transformação Linear.

Para além da definição usual encontrada em livros de álgebra linear, as transformações lineares podem ser estudadas de forma geométrica no plano cartesiano, o que torna mais clara a maneira com que essas transformações, as matrizes e os vetores se relacionam.

As transformações de Lorentz são um conjunto de transformações lineares e, como qualquer outra transformação linear, elas também podem ser analisadas geometricamente no plano cartesiano. Esse conjunto de transformações pode ser estudado em um espaço quadridimensional, conhecido como Espaço de Minkowski (Griffiths, 2010). Nosso interesse reside em restringir nossos 'experimentos' a duas dimensões: uma dimensão espacial, medida em metros, que seguirá a direção do eixo 'x', e uma dimensão temporal, que será expressa em unidades de tempo multiplicadas pela velocidade da luz ' c ' e estará ao longo do eixo 'y' do plano. Isso resultará na unidade de medida no eixo 'y' também sendo expressa em metros. Essa é uma abordagem comumente encontrada na literatura sobre diagramas de Minkowski e é essencial para que possamos atingir o objetivo principal deste trabalho, que é o desenvolvimento do nosso software. Portanto, isso nos permitirá, por meio da visualização dessas transformações em um plano cartesiano, estudar as relações presentes na Teoria da Relatividade Restrita e entender melhor como diferentes eventos e referenciais se relacionam no espaço de Minkowski.

Esse conjunto de transformações pode ser escrito de forma matricial, em duas dimensões e na direção de x , da seguinte forma:

$$M = \gamma \begin{pmatrix} 1 & -\frac{v}{c} \\ -\frac{v}{c} & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

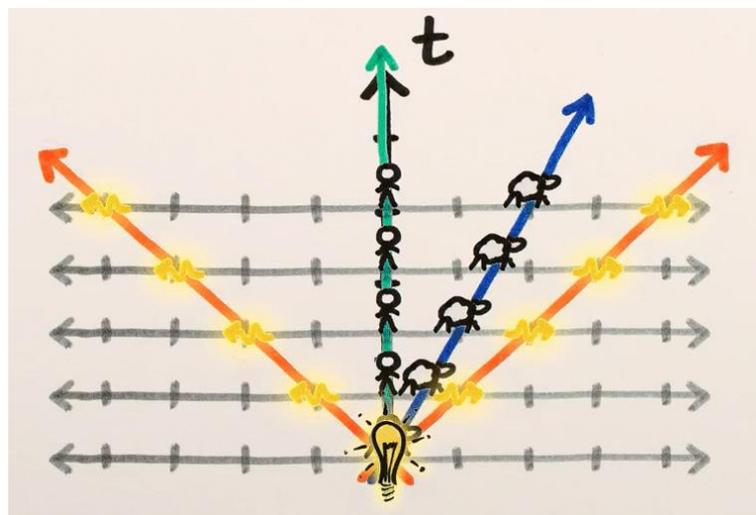
γ é conhecido como fator de Lorentz e é definido como:

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

onde v é a velocidade relativa entre os referenciais inerciais, e C é a velocidade da luz no vácuo.

A seguinte figura ilustra como um referencial “vê” o outro em um diagrama de Minkowski, de modo que o referencial em “repouso” é o que está na vertical com o eixo y .

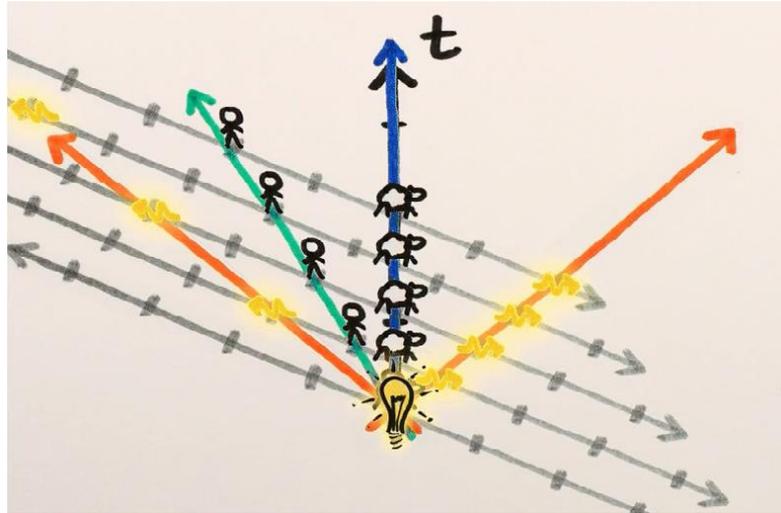
Figura 1: Representação visual da transformação de Lorentz no referencial “verde”.



Fonte. Minute Physics¹.

¹ Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Rh0pYtQG5wI>. Acesso em: 3 de outubro, 2023.

Figura 2: Representação visual da transformação de Lorentz no referencial “azul”.



Fonte. Minute Physics².

Podemos perceber, então, que quando aplicamos uma transformação de Lorentz em um espaço de Minkowski, para mudar de um referencial para o outro, temos uma característica especial bem interessante: os eixos que representam as “linhas de mundo” de fótons (ou de qualquer objeto que viaje na velocidade da luz) não têm sua inclinação alterada, o que implica de fato, a constância da velocidade da luz para qualquer observador representado no diagrama.

² Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Rh0pYtQG5wI>. Acesso em: 3 de outubro, 2023.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do software educacional proposto, inicialmente foi realizado um estudo para a melhor compreensão dos principais conceitos da TRR, incluindo a relatividade do espaço e do tempo, as transformações de Lorentz e de como eles poderiam ser representados visualmente no software.

No processo de pesquisa para a elaboração deste trabalho, foram consultados diversos materiais acadêmicos, incluindo livros, artigos científicos e tutoriais online. Dentre esses recursos, destaca-se a influência do canal do YouTube “Minute Physics”, que apresenta de forma simples conceitos da física. Em um dos vídeos, da playlist “Intro to Special Relativity Course” o apresentador mostra um aparato físico que ele construiu com o intuito de apresentar as transformações de Lorentz visualmente.

Inspirados no aparato criado pelo apresentador, decidimos procurar uma linguagem de programação que nos possibilitasse recriar em forma de software um aparato semelhante, onde pudesse ser simulado tais transformações de forma interativa. Foi definido, então, o escopo do trabalho e as funcionalidades desejadas, como a implementação das transformações de Lorentz em um plano cartesiano e a possibilidade de ajustes dos parâmetros.

Utilizando a biblioteca visual de código aberto P5.js, da linguagem de programação Javascript, foi desenvolvida a interface gráfica inicial do software, e as principais funcionalidades, como a criação e visualização de vetores e a aplicação de transformações matemáticas no plano cartesiano.

A biblioteca P5.js já traz em si transformações básicas, utilizando matrizes, como: cisalhamentos, translações, rotações e transformações de escala. Além delas, há a possibilidade da criação das nossas próprias matrizes, o que abre espaço para que possamos aplicar especificamente a nossa matriz de interesse. Na página de “referências”³ da biblioteca P5.js podemos encontrar a sua documentação completa, onde podemos pesquisar por diversos exemplos de funcionamento e tutoriais que como utilizar essa ferramenta em sua totalidade.

³ Disponível em <https://p5js.org/reference/>. Acesso em: 3 de outubro, 2023.

4 O DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

No início, foi criada uma grade que funciona como um sistema de coordenadas para a visualização das transformações. Essa grade servirá como base para uma segunda grade, a qual será posicionada acima da primeira, onde efetivamente realizaremos as transformações. Com a grade criada, podemos colocar pontos, vetores, e traçar funções da maneira que desejarmos, manipulando as coordenadas livremente usando a linguagem de programação Javascript.

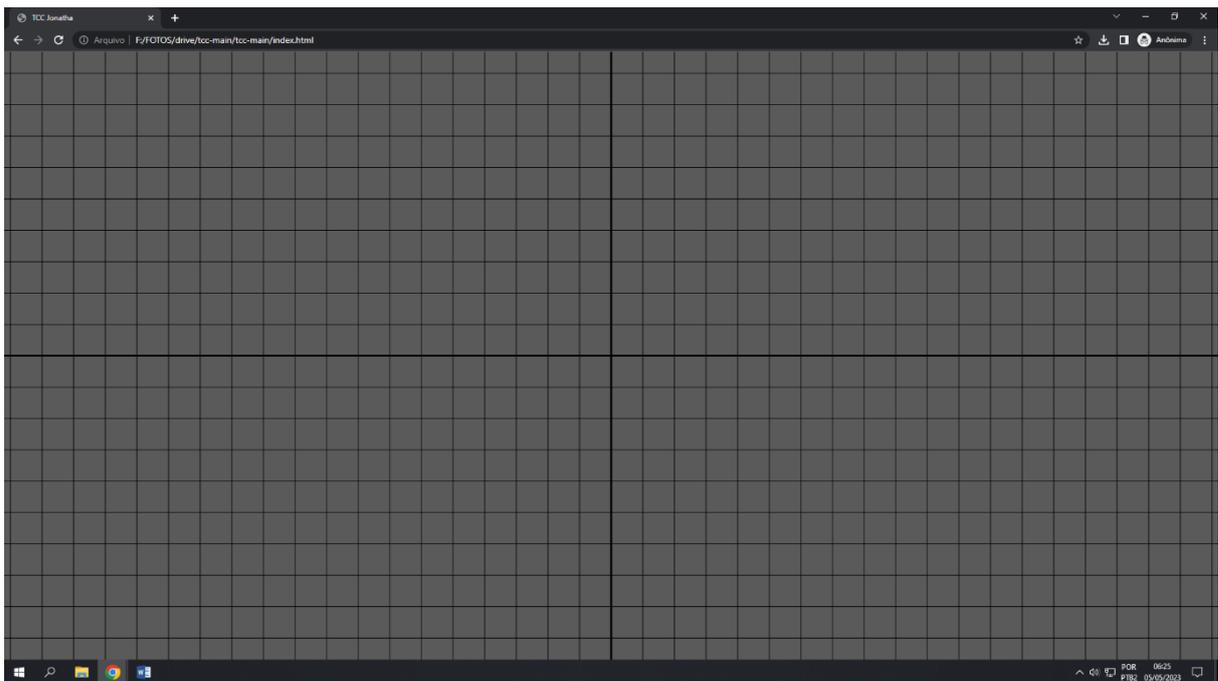


Figura 3. Representação do sistema de coordenadas do software. As linhas mais escuras representam os eixos, as linhas mais claras representam a grade.

Com a estrutura espaço de coordenadas base já estabelecida, desenvolvemos um menu que permite ao usuário interagir com a interface. Implementamos funcionalidades como a escolha da velocidade relativa entre o referencial padrão e o referencial alternativo a ser adicionado ao diagrama. Além disso, incluímos um botão para alterar a perspectiva entre os referenciais, assim como um campo para adicionar eventos no diagrama com base em suas coordenadas x e y , onde $y = Ct$ representará o eixo temporal.

Em termos de relatividade, os eventos representam acontecimentos, e em um diagrama espaço-tempo, são pontos com uma posição no espaço e um tempo definido. No nosso software, a coordenada x representa a posição em um espaço unidimensional, enquanto a coordenada $y = Ct$ está associada ao tempo. O fator C permite o ajuste de escala, para que y tenha unidade de comprimento, evidenciando a necessidade do tempo como uma dimensão a ser considerada na descrição dos fenômenos.



Figura 4. Sistema de coordenadas base do software com o menu interativo.

Podemos então criar a segunda grade, onde as transformações de Lorentz terão lugar. Esta segunda grade será sobreposta a primeira, de modo que a grade de fundo não será afetada pelas transformações. Isso proporcionará ao usuário uma visualização mais clara das transformações e facilitará a observação dos fenômenos físicos a serem estudados.

Na segunda grade, teremos as "linhas de mundo" de fótons, posicionadas a 45 graus dos eixos em ambas as diagonais, representando o trajeto percorrido no diagrama por um pulso de luz, se propagando isotropicamente a partir da origem, do ponto de vista de um observador em repouso em relação ao referencial padrão (ou referencial do laboratório).

Segundo Griffiths (2010, p. 503), “linhas de mundo” são trajetórias de partículas vistas em um diagrama de espaço tempo, também conhecido como diagrama de Minkowski.

Iniciaremos o grid na perspectiva de um observador em repouso no laboratório, portanto, seus eixos x e $y = Ct$ estão alinhados com as direções dos respectivos eixos do grid base.

O software foi desenvolvido de maneira que cada quadrado pequeno do grid base represente uma unidade tanto na horizontal quanto na vertical. Isso permite que o usuário escolha a escala de acordo com sua interpretação pessoal. Por exemplo, o usuário pode considerar que cada unidade na direção de "x" representa a distância percorrida pela luz no espaço em um segundo. Assim, o t no eixo $y = Ct$ representará 1 segundo.

De forma equivalente, o usuário pode optar por interpretar cada unidade na direção de "x" como a distância percorrida pela luz no vácuo ao longo de um ano (1 ano-luz), tornando cada unidade em seu eixo "y" equivalente ao mesmo valor e t a 1 ano. Desta forma, desde que o usuário mantenha essa coerência na escolha da escala, as duas “linhas de mundo” dos fótons permanecerão em um ângulo constante de 45 graus, em relação aos eixos de todos os referenciais inerciais.

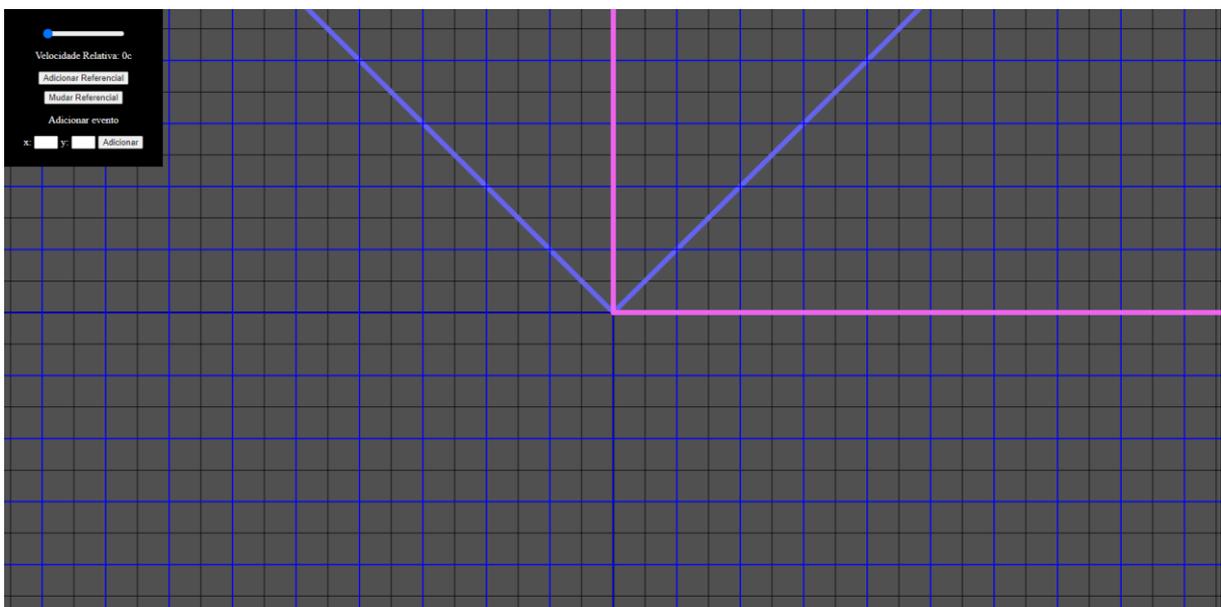


Figura 5. A segunda grade (azul) com o referencial do laboratório (rosa) em repouso e as linhas de mundo de fótons (em azul claro) se propagando isotropicamente a partir da origem.

O usuário poderá adicionar quantos referenciais desejar, bastando apenas escolher a velocidade relativa ao referencial do laboratório e clicar no botão “Adicionar Referencial”. Uma vez que temos mais de um referencial no diagrama, podemos clicar no botão “Mudar Referencial” para mudar para a perspectiva do referencial adicionado.

De acordo com a teoria da relatividade restrita, em diagramas de espaço-tempo, referenciais que se movem em relação a outro referencial inercial, têm seus eixos inclinados por um ângulo α que depende da velocidade relativa entre eles, seguindo a expressão:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v}{c}. \quad (3)$$

Dessa forma, em nosso software, um referencial que se move com 60% da velocidade da luz em relação a um referencial em repouso tem seus eixos inclinados da seguinte forma:

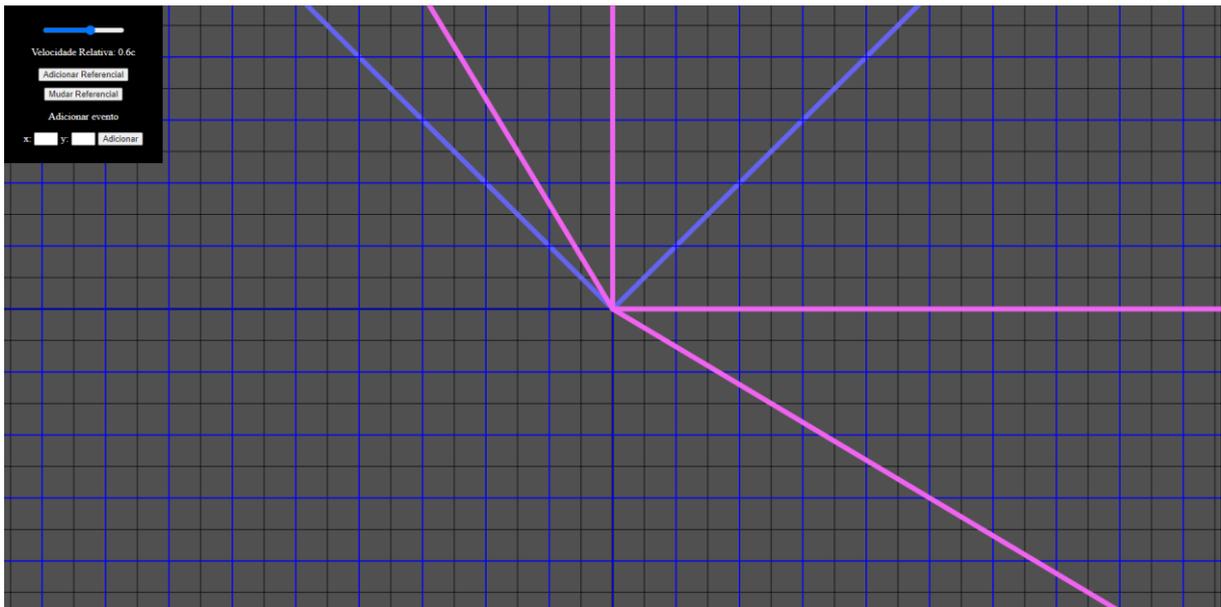


Figura 6. Referencial se movendo com 60% da velocidade da luz em relação ao do laboratório.

Assim, podemos 'mudar' para a perspectiva desse novo referencial e observar como o referencial do laboratório se comporta.

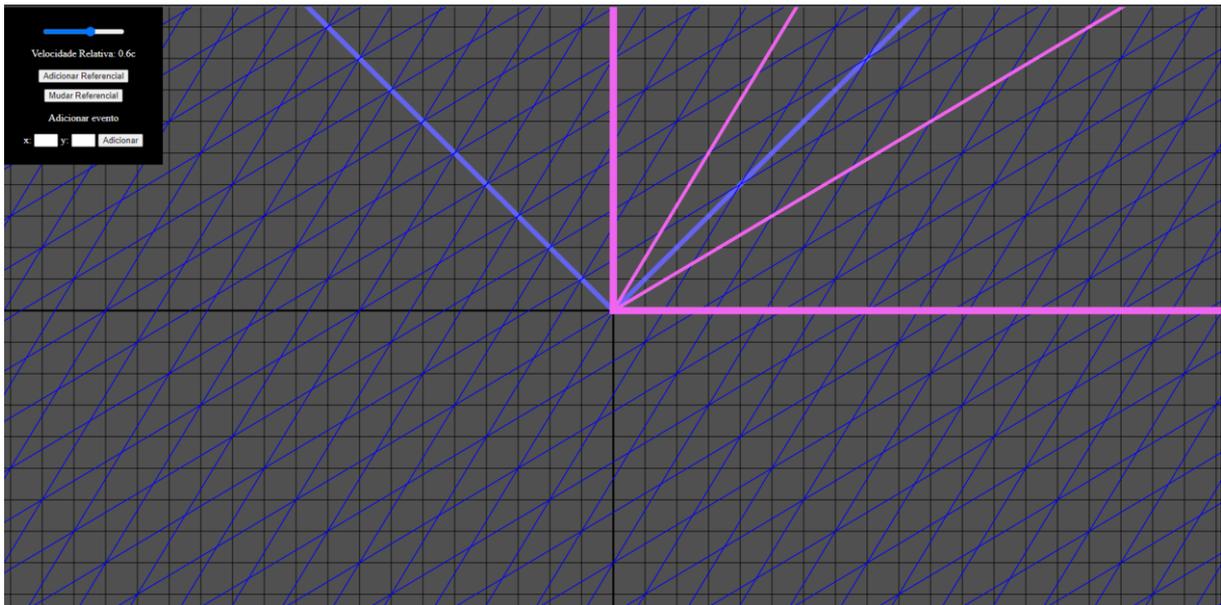


Figura 7. Perspectiva do referencial adicionado, com sua respectiva grade “deformada” pela transformação.

Podemos notar, então, que na perspectiva do novo referencial, os eixos coincidem com os eixos 'y' e 'x' do grid base. Portanto, para um observador em repouso com respeito a esse referencial, ele está em repouso, enquanto o referencial inicial está se movendo na direção oposta. Essa simetria entre os referenciais impede a definição absoluta de repouso, pois repouso ou movimento retilíneo e uniforme são meramente um ponto de vista.

Além disso, podemos notar que a inclinação das 'linhas de mundo' de um pulso isotrópico de luz, não é alterada pela transformação aplicada, independente do referencial que as observa, e, portanto, mostra uma consequência do primeiro postulado da TRR que citamos na fundamentação teórica do trabalho.

5 A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE NO SOFTWARE

Uma das consequências notórias da TRR, e uma das ideias centrais dessa teoria, é a relatividade da simultaneidade. É o fato de que, quando lidamos com movimentos relativísticos, eventos que são simultâneos para um referencial, podem não ser necessariamente simultâneos para outro. Esse é um fato bem difundido na literatura, e que pode ser encontrado em diversos livros sobre o tema, como o próprio Griffiths (2009) e afins. Em velocidades relativísticas (próximas da velocidade da luz) o “tempo passado” depende do movimento do observador relativo ao local onde o processo que está sendo cronometrado ocorre.

Em nosso software, é possível observarmos esse fenômeno acontecer de maneira trivial. Para tal, escolhemos, nesse exemplo, adicionar um referencial em repouso (S) e um referencial que se move a 33% da velocidade da luz em relação ao que está em repouso, (chamaremos de S'). Além disso, adicionamos dois eventos que ocorrem ao mesmo tempo no referencial S, e que são representados por pontos em amarelo na mesma “altura” no eixo “y”. Chamaremos de evento A o evento à esquerda do referencial S e evento B o que está à direita dele. As coordenadas usadas para os pontos foram $A = (-2,4)$ e $B = (2,4)$, nas coordenadas do referencial S.

Dessa forma, podemos observar o fenômeno de duas maneiras. A primeira, e menos direta, é observar o diagrama antes de clicar no botão “Mudar Referencial”. A segunda é mais óbvia e te permite visualizar diretamente da perspectiva do referencial S' quando mudamos para a mesma.

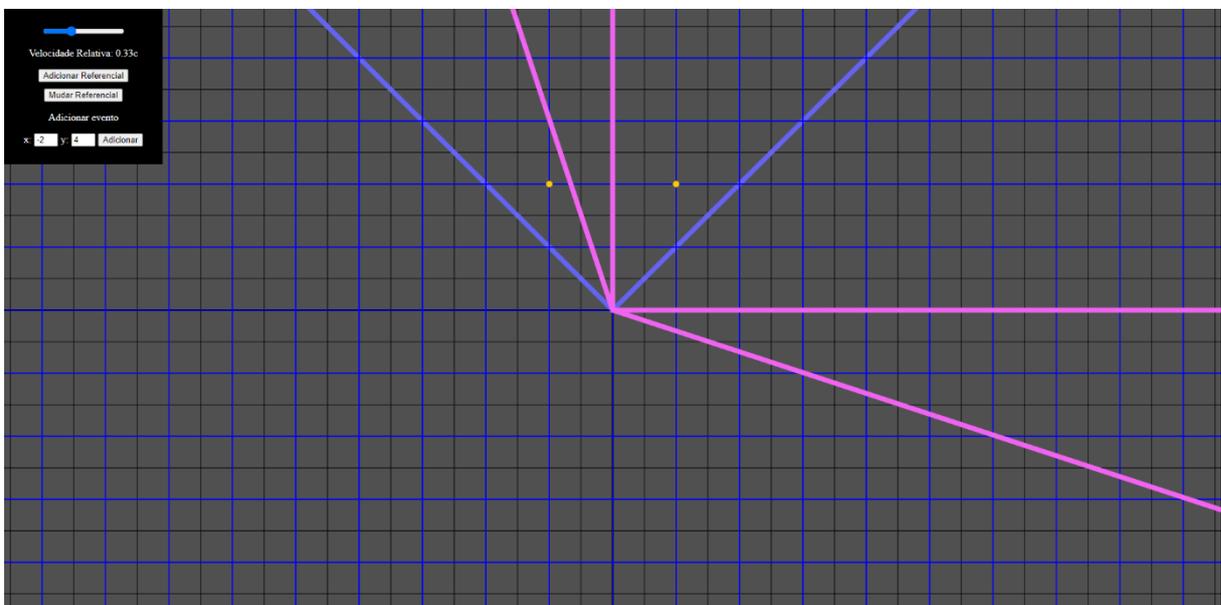


Figura 8. Eventos simultâneos no referencial “S”

Da primeira, podemos notar que, seguindo retas paralelas ao eixo x' de S' , do passado para o futuro (de baixo para cima), o plano encontra o evento A antes do B, então para S' , o evento A acontece antes de B.

Da segunda, podemos observar esse fenômeno diretamente, a partir da perspectiva do referencial S' .

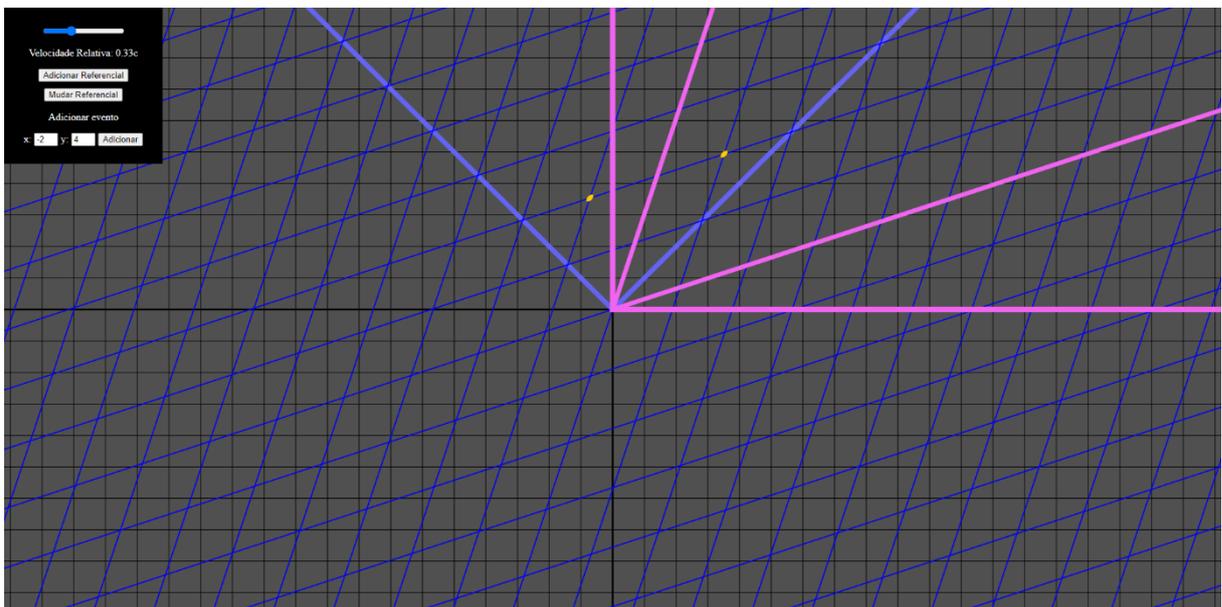


Figura 9. Eventos simultâneos em “S” vistos por “S’”

Nessa perspectiva, podemos ver claramente a diferença na “altura” dos eventos A e B no eixo y' do referencial S' , de forma que A ocorre antes de B.

É interessante mostrar que, olhando o referencial S dessa perspectiva, se seguirmos retas paralelas ao seu eixo inclinado, do passado para o futuro, elas encontram os eventos A e B ao mesmo tempo, (podemos notar pelo fato dos dois pontos estarem em cima da mesma linha do grid que foi “deformado” junto com o referencial S e continua paralelo ao eixo “x” do mesmo).

Dessa forma, podemos observar que essa conformidade está alinhada com as transformações de Lorentz e com o que foi inicialmente proposto para explicar esse fenômeno.

6 DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

O processo de desenvolvimento e implementação do software não foi trivial, e por diversas vezes encontramos desafios a serem resolvidos para que pudéssemos ter uma versão funcional do software educacional que pudesse, de fato, ser utilizada para o estudo de conceitos da Teoria da Relatividade Restrita.

Nesta seção, discutiremos sobre os principais desafios encontrados durante o desenvolvimento da aplicação e nossas perspectivas futuras para a implementação de recursos adicionais. Estas futuras melhorias têm o objetivo de enriquecer a experiência do usuário, de modo que possibilitem um estudo mais abrangente da TRR, para além do que foi apresentado até o momento em nosso trabalho.

6.1 A biblioteca P5.js e a função applyMatrix

Durante a fase de desenvolvimento do software, nos deparamos com um desafio técnico decorrente da biblioteca JavaScript p5.js. Apesar dos inúmeros benefícios que essa biblioteca proporciona para a criação de softwares criativos, deparamo-nos com um entrave relacionado à maneira com a qual a aplicação das matrizes de transformação é feita no contexto dos elementos presentes no software.

Em p5.js, trabalhamos com um canvas, que é uma área da tela com dimensões especificadas pelo desenvolvedor. Todos os elementos visíveis no software, como vetores, linhas e pontos, fazem parte desse canvas. Quando aplicamos uma transformação no mesmo, seja uma transformação padrão da biblioteca ou uma que criamos usando a função applyMatrix, ela é aplicada a todos os elementos que escolhemos.

O problema surge porque a biblioteca não nos permite selecionar quais propriedades dos elementos que estamos transformando serão afetadas por essa transformação. No nosso caso, a propriedade "strokeWeight" que define a espessura dos elementos visuais do software, é diretamente afetada pelas transformações de Lorentz que aplicamos aos eixos dos referenciais. Isso resulta em um glitch visual quando tentamos utilizar velocidades muito próximas à velocidade da luz, distorcendo assim a espessura dos eixos quando mudamos para seus respectivos referenciais.

Esse é um problema que não impede totalmente a utilização do software, mas é algo que pretendemos solucionar já em sua próxima atualização.

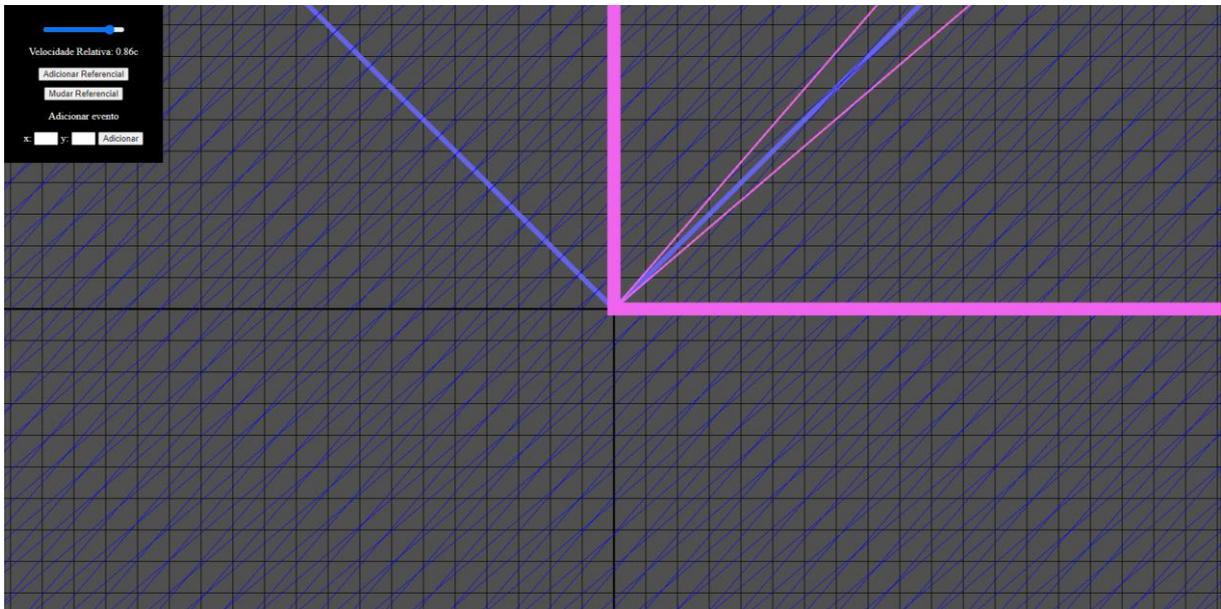


Figura 10. Distorção na espessura dos eixos quando estão próximos da velocidade da luz

6.2 Novos recursos

Apesar dos impasses, a jornada de desenvolvimento não termina aqui. Para as próximas versões, para além da correção do problema citado anteriormente, planejamos adicionar recursos que possibilitem um uso mais intuitivo dessa ferramenta, além de uma melhora no design da interface da aplicação.

Um recurso que não foi adicionado na versão atual foi o de ter um painel exclusivo para a visualização dos valores de dilatação temporal e contração espacial, que são muito importantes para a diversificação das situações que esse software poderá ser utilizado.

Além disso, planejamos para as próximas versões, adicionar modos pré-programados para explicar alguns dos paradoxos mais famosos da teoria da relatividade restrita, como o paradoxo dos gêmeos e o paradoxo da vara e do celeiro.

As melhorias propostas não apenas buscam elevar a qualidade intrínseca do software, mas também almejam transformá-lo em uma ferramenta educacional

abrangente, capaz de desempenhar um papel significativo nos cursos de Física Moderna no ensino superior. Essa expansão de funcionalidades não se limita a uma simples otimização do programa, mas visa fornecer uma ferramenta versátil que pode ser adotada tanto como uma opção principal quanto como um recurso complementar. A intenção é criar uma experiência de aprendizado mais envolvente e menos intimidadora para os alunos de graduação ao abordar conceitos provenientes da teoria da relatividade restrita.

7 CONCLUSÃO

Em suma, a elaboração e desenvolvimento deste produto educacional representa um passo importante para a integração das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) no ensino de Física Moderna. A abordagem visual e interativa escolhida tem como intuito superar desafios que são comuns no entendimento da Teoria da Relatividade Restrita (TRR), tornando seu aprendizado uma experiência mais convidativa, atrativa, dinâmica e acessível.

Ao longo do processo de desenvolvimento enfrentamos alguns problemas técnicos, destacando principalmente a questão relacionada à biblioteca p5.js e à sua função `applyMatrix`. Contudo, a aplicabilidade do software no ensino de transformações de Lorentz e conceitos provenientes da relatividade restrita permanece evidente.

Com isso, conseguimos alcançar os objetivos específicos que traçamos para a realização desse trabalho. Criamos com sucesso um software educacional que aborda de maneira visual e interativa os conceitos das transformações de Lorentz, proporcionando então uma compreensão mais tangível da Teoria da Relatividade Restrita. A implementação das funcionalidades previstas, como a visualização das transformações no plano cartesiano e a possibilidade de alterar entre diferentes referenciais, foi efetuada de maneira a atender as expectativas que traçamos.

A primeira versão desse software será publicada em um repositório público na plataforma de hospedagem de códigos, GitHub, no endereço eletrônico **github.com/JonathaBarros/relatividade** para a eventual utilização de qualquer pessoa interessada em entender melhor como a TRR e as transformações de Lorentz funcionam.

Por fim, ao encerrar esse trabalho, reconhecemos que a jornada não termina aqui. Novas oportunidades para melhorar e expandir este software surgirão.

Esperamos que esse projeto inspire outros educadores a explorar o potencial das TICs, principalmente no ensino de conceitos desafiadores da Física Moderna.

Portanto, esperamos que esse software se torne uma ferramenta que proporcione uma compreensão mais profunda e envolvente da Teoria da Relatividade Restrita.

REFERÊNCIAS

- BRANDÃO, J. N. C. AS TIC E SUAS CONTRIBUIÇÕES NO PROCESSO ENSINO-APRENDIZAGEM. 2014.
- DE LARA, A. L. et al. ENSINO DE FÍSICA MEDIADO POR TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO: UM RELATO DE EXPERIÊNCIA. **São Paulo**, 2013.
- ESTEVES, W. DE A. O USO DAS TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NO ENSINO DE FÍSICA. [s.d.].
- GRIFFITHS, David J. **Introdução à eletrodinâmica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010
- VERONEZ, D.; LUNKES, M.; MUCHESKI, F. A UTILIZAÇÃO DAS TICS NO ENSINO DE FÍSICA PARA TRABALHAR CONCEITOS DE MRU E MRUV. 2015.
- OPENSTAX. **University Physics Volume 3**. Houston, Texas: OpenStax, 2021.
- PROCESSING FOUNDATION. p5.js: a JavaScript library for creative coding. 2013. Disponível em: <<https://p5js.org/>>. Acesso em: 03 out. 2023.
- MINUTEPHYSICS. Curso de Introdução à Teoria da Relatividade Especial. 2018. Playlist. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=1rLWVZVWfdY&list=PLoaVOjvkzQtyjhV55wZcdicAz5KexgKvm&ab_channel=minutephysics>. Acesso em: 03 out. 2023.
- MINUTEPHYSICS. Transformações de Lorentz | Relatividade Restrita Capítulo 3. 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Rh0pYtQG5wl>>. Acesso em: 03 out. 2023.
- MOZILLA DEVELOPER NETWORK. JavaScript. <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/JavaScript>
- STRANG, Gilbert. **Introduction to Linear Algebra. 4th Edition**. Wellesley-Cambridge Press, 2009.
- .