

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

**REVISITANDO A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA À LUZ DA TEORIA
DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE VERGNAUD**

MEDIANEIRA

2023

DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

**REVISITANDO A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA À LUZ DA TEORIA
DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE VERGNAUD**

**REVISITING THE THEORY OF SPECIAL RELATIVITY IN LIGHT OF
VERGNAUD'S THEORY OF CONCEPTUAL FIELDS**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Reginaldo Aparecido Zara.

MEDIANEIRA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira**



DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

**REVISITANDO A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA À LUZ DA TEORIA DOS CAMPOS
CONCEITUAIS DE VERGNAUD**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ensino De Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Física Na Educação Básica.

Data de aprovação: 24 de Fevereiro de 2023

Dr. Reginaldo Aparecido Zara, Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Dr. Fabio Rogerio Longen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fernando Jose Gaiotto, Doutorado - Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/02/2023.



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



PRODUTO EDUCACIONAL

DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

MEDIANEIRA - PR

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

ct

DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

$c = 299792458 \text{ m/s}$

TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

CADERNO DE ATIVIDADES

Diagramas de Minkowski

x

TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

CADERNO DE ATIVIDADES

CAPA, TEXTO, ILUSTRAÇÕES E PROJETO GRÁFICO

DIEGO PEREIRA DOS SANTOS

REVISÃO TÉCNICA

REGINALDO APARECIDO ZARA



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

INTRODUÇÃO

Este produto educacional é consequência das pesquisas desenvolvidas pelo trabalho REVISITANDO A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA À LUZ DA TEORIA DOS CAMPOS CONCEITUAIS DE VERGNAUD, dissertação de Mestrado submetido ao Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF), Sociedade Brasileira de Física (SBF), através do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Medianeira, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física deste autor.

Como tal, este produto educacional consiste em um caderno de atividades sobre CINEMÁTICA RELATIVÍSTICA, com situações-problemas possíveis de serem trabalhadas através de uma abordagem geométrica da Teoria da Relatividade Restrita.

Estas atividades foram propostas a partir de uma matriz teórica em que o conceito de referencial relativístico foi interpretado como um campo conceitual, na perspectiva da Teoria dos Campos Conceituais de Gérard Vergnaud. Entretanto, cabe salientar que esta interpretação não surge da análise dos esquemas elaborados pelos sujeitos cognoscentes confrontados pelas situações referendados pelo conceito em questão, mas sim a partir dos conhecimentos deste autor acerca da Teoria da Relatividade Restrita e das pesquisas que fundamentaram sua proposição. Este destaque é extremamente necessário, pois a Teoria dos Campos Conceituais busca investigar o sujeito-em-situação, a fim de elucidar de que maneira ocorre a aprendizagem em situação de ensino-aprendizagem.

O desenvolvimento deste caderno parte da necessidade de verificação da hipótese de que a abordagem geométrica da Teoria da Relatividade Restrita, com ênfase nos diagramas de Minkowski, ao valorizar aspectos conceituais relevantes dessa teoria, contribui para a construção e/ou consolidação da região relativística do Perfil Conceitual da noção de Referencial, na estrutura cognitiva dos estudantes que vierem a serem confrontados pelas atividades sugeridas por este caderno, de acordo Ayala Filho (2010).

APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

ESTRUTURA

Este caderno de atividades está estruturado da seguinte forma: plano de ensino, temas das atividades, atividades sugeridas, solução das atividades, considerações finais e referências bibliográficas.

PLANO DE ENSINO

Por se tratar de um caderno de atividades, este produto educacional exige um plano de ensino a fim de dar sentido e intencionalidade às suas atividades. Assim, visando favorecer a sua apropriação por outros docentes, é apresentada uma sugestão de plano de ensino como referência para a sua aplicação. Este plano é, essencialmente, o mesmo plano utilizado por este autor quando no momento da validação deste produto. Porém, dada a versatilidade da proposta em questão, fica a critério do docente utilizar ou não, total ou parcialmente, este plano de ensino da forma que lhe for mais conveniente ao seu contexto.

Assim, enquanto sugestão, a utilização do referido plano de ensino é arbitrário ao docente que vier a utilizar este produto educacional. Podendo este, inclusive, sugerir adaptações ao mesmo, assim como propor outro plano de ensino completamente diverso deste.

APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

TEMAS DAS ATIVIDADES

Quanto aos temas das atividades apresentadas, neste tópico tem-se a justificativa para apresentação da atividade a qual o tema faz menção. De forma bem resumida, explica-se o diálogo do tema em questão com a consequente atividade proposta por este tema. Essa caracterização visa nortear o docente, caso deseje encadear as respectivas atividades em uma sequência diferente da sugerida pelo plano de ensino mencionado no tópico anterior.

ATIVIDADES SUGERIDAS E SOLUÇÕES

As dez atividades sugeridas por este caderno serão apresentadas a partir dos seus respectivos temas. Esses temas fazem alusão aos conteúdos trabalhados em tópicos da cinemática relativística.

Incentiva-se com proposição destas atividades uma abordagem geométrica da Teoria da Relatividade Restrita, com ênfase nos diagramas de Minkowski. Coerente a esse tipo de abordagem, em quase todas as atividades temos o tratamento de uma situação a partir de diagramas do espaço-tempo. As únicas exceções feitas a essa condição diz respeito às primeiras atividades sugeridas pelo caderno, atividades 1 e 2. Essas são atividades que discutem o movimento relativo a partir de referenciais não absolutos no contexto da mecânica newtoniana. A proposição destas atividades justifica-se por terem como objetivos provocarem nos estudantes a reflexões sobre suas concepções alternativas acerca dos conceitos de movimento, repouso e referencial, assim como introduzir o tratamento a problemas cinemáticos a partir dos diagramas do espaço-tempo.

APRESENTAÇÃO DO MATERIAL

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas considerações finais serão feitas algumas observações quanto às possibilidades de utilização deste produto em ambientes educacionais diferentes daquele em que este foi validado inicialmente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Quanto as referências utilizadas para a elaboração deste produto educacional, estas serão apresentadas divididas em dois grupos: (1) artigos, em que constam os principais trabalhos que influenciaram na proposição do produto educacional em questão e (2) livros, em que constam obras onde foram encontradas exercícios e/ou problemas que inspiraram algumas das atividades sugeridas, ou, até mesmo, atividades que foram encontradas nestas obras e adaptadas para este produto educacional.

Por fim, espera-se que os docentes que vierem a se apropriar desta proposta possam usufruir dela da melhor forma possível. Para tanto, mais uma vez, recomenda-se a leitura da dissertação que deu origem a este produto, ainda que esta leitura não seja uma condição imprescindível para a utilização.

Diego Pereira dos Santos

SUMÁRIO RESUMIDO

TEMAS E ATIVIDADES SUGERIDAS

REFERENCIAIS NÃO ABSOLUTOS

ATIVIDADE 1 17

REFERENCIAIS E DIAGRAMAS

ATIVIDADE 2 19

DIAGRAMAS E OS POSTULADOS

ATIVIDADE 3 21

DIAGRAMAS DO ESPAÇO-TEMPO

ATIVIDADE 4 23

SIMULTANEIDADE NÃO ABSOLUTA

ATIVIDADE 5 25

OCORRÊNCIA E REGISTRO

ATIVIDADE 6 27

SUMÁRIO RESUMIDO

	DILATAÇÃO TEMPORAL	
ATIVIDADE 7		29
	CONTRAÇÃO DE LORENTZ	
ATIVIDADE 8		31
	CAUSALIDADE DE EVENTOS	
ATIVIDADE 9		33
	VELOCIDADE RELATIVA	
ATIVIDADE 10		35
SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES		36
CONSIDERAÇÕES FINAIS		56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		57

PLANO DE ENSINO

IDENTIFICAÇÃO

Cinemática Relativística, através de uma abordagem geométrica, com ênfase nos diagramas de Minkowski;

PÚBLICO ALVO

Estudantes do Ensino Médio;

CARGA HORÁRIA:

15 horas-aulas (750 min);

PRÉ-REQUISITOS:

Conhecimentos básicos sobre cinemática e dinâmica newtoniana;

OBJETIVOS:

GERAL

Apresentar tópicos sobre Teoria da Relatividade Restrita, especificamente sobre Cinemática Relativística, através de uma abordagem geométrica, com ênfase nos diagramas de Minkowski.

ESPECÍFICOS

- Apresentar as diferenças nos conceitos de referenciais quando observados na perspectiva newtoniana e relativística;
- Discutir as consequências dos postulados da relatividade através de diagramas do espaço-tempo;
- Evidenciar possíveis relações de causalidade entre eventos através de cones de luz no espaço-tempo.

PLANO DE ENSINO

ENCAMINHAMENTOS

PRIMEIRO ENCONTRO: AULAS 1, 2 E 3

OBJETIVOS

1. Levantar conhecimentos prévios sobre o tema através das situações-problemas sugeridos por um filme de ficção científica;
2. Discutir as relações entre os conceitos Tempo, Espaço, Referencial, Repouso, Movimento e Velocidade.

CONTEÚDOS TRABALHADOS

- Viagens no Tempo não-convencionais;
- Espaço, Tempo, Referenciais e medidas no contexto da Mecânica Newtoniana.

DESCRIÇÃO DOS MOMENTOS

1. Exibido do filme de ficção científica "De Volta para o Futuro" (1985);
2. Debate sobre viagens não convencionais no espaço-tempo e as relações de causalidade entre eventos, tendo como ponto de partida as consequências da trama, assim como o título do filme em questão.

ATIVIDADES ENCAMINHADAS

Relato sobre o debate, acompanhado de uma explicação sobre as relações entre os conceitos de espaço, tempo, referencial, movimento, repouso e velocidade, estudando até o momento

ENCAMINHAMENTOS

SEGUNDO ENCONTRO: AULAS 4, 5 E 6

OBJETIVOS

1. Discutir a construção dos gráficos das funções horárias da posição no estudo do Movimento Retilíneo e Uniforme (MRU);
2. Introduzir conhecimentos declarativos e procedimentais introdutórios relacionados aos Diagramas de Minkowski.

CONTEÚDOS TRABALHADOS

- Espaço, Tempo, Referenciais e medidas no contexto da Mecânica Newtoniana;
- Diagramas do Espaço vs Tempo na mecânica newtoniana, Princípio da Relatividade Galileana e os Diagramas de Minkowski.

DESCRIÇÃO DOS MOMENTOS

1. Revisar os conceitos de espaço, tempo, referencial, repouso, movimento e interação entre corpo;
2. Relacionar os conceitos do tópico anterior com as respectivas grandezas associadas e esses conceitos (posição, trajetória, velocidade, aceleração), interpretadas através das três leis de Newton.

ATIVIDADES ENCAMINHADAS

Atividades 1 e 2 do Caderno de Atividades.

PLANO DE ENSINO

ENCAMINHAMENTOS

TERCEIRO ENCONTRO: AULAS 7, 8 E 9

OBJETIVOS

1. Apresentar a Teoria da Relatividade a partir de seus postulados;
2. Apresentar os diagramas de Minkowski a partir da análise das funções horárias da posição no estudo do MRU para situações relativísticas.

CONTEÚDOS TRABALHADOS

- Postulados da Teoria da Relatividade Restrita;
 - Diagramas de Minkowski.

DESCRIÇÃO DOS MOMENTOS

1. Revisar os conceitos trabalhados no encontro anterior;
2. Corrigir as atividades 1 e 2 encaminhadas no encontro anterior;
3. Introduzir o conceito de referencial no contexto da Teoria da Relatividade Restrita, destacando as mudanças de interpretação desse conceito quando comparado com o conceito proposto pela mecânica newtoniana.

ATIVIDADES ENCAMINHADAS

Atividades 3 e 4 do Caderno de Atividades.

ENCAMINHAMENTOS

QUARTO ENCONTRO: AULAS 10, 11 E 12

OBJETIVOS

1. Discutir o conceito de Referencial no contexto da Teoria da Relatividade Restrita;
2. Relacionar as descrições de um evento a partir de diferentes referenciais inerciais;
3. Discutir a não simultaneidade de eventos e o fenômeno da dilatação temporal através de diagramas do espaço-tempo.

CONTEÚDOS TRABALHADOS

- Referencial Relativístico e Evento;
 - Transformação de Lorentz;
- Simultaneidade de Eventos e Dilatação Temporal.

DESCRIÇÃO DOS MOMENTOS

1. Discutir as diferenças entre os conceitos de referencial no contexto da Teoria da Relatividade Restrita e da mecânica newtoniana;
2. Discutir a centralidade do conceito de evento no contexto relativístico;
3. Demonstrar como são feitas as descrições de um evento a partir de diferentes referenciais inerciais, quando sobrepostos em diagramas do espaço-tempo, respeitando as condições exigidas para a sua elaboração, discutidas na correção da Atividade 4.

ATIVIDADES ENCAMINHADAS

Atividades 5 e 6 do Caderno de Atividades.

PLANO DE ENSINO

ENCAMINHAMENTOS

QUINTO ENCONTRO: AULAS 13, 14 E 15

OBJETIVOS

1. Discutir a relatividade do comprimento como consequência da simultaneidade;
2. Definir o conceito de intervalo relativístico entre eventos;
3. Representar cones de luz de um evento a partir de diagramas de espaço-tempo;
4. Discutir a causalidade de eventos a partir de cones de luz representados em diagramas de espaço-tempo.

CONTEÚDOS TRABALHADOS

- Contração de Lorentz;
- Intervalos Relativísticos;
- Cones de Luz e Causalidade de Eventos.

DESCRIÇÃO DOS MOMENTOS

1. Revisar as discussões empreendidas no encontro anterior;
2. Corrigir as atividades sugeridas no encontro anterior;
3. Discutir as consequências advindas dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita, tais como a dilatação temporal e a contração de Lorentz;
4. Apresentar o conceito de intervalo relativístico invariante;
5. Demonstrar de que maneira é possível se chegar as hipérbolas calibradoras de escalas entre referenciais sobrepostos, a partir dos intervalos invariantes.

ATIVIDADES ENCAMINHADAS

Atividades 7, 8, 9 e 10 do Caderno de Atividades.

REFERENCIAIS NÃO ABSOLUTOS



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Discutir as relações entre os conceitos tempo, espaço, referencial e velocidade, no contexto da mecânica newtoniana;
2. Descrever o movimento em diferentes referenciais;
3. Evidenciar concepções alternativas acerca do conceito de referencial;

■ Conteúdos

1. Movimento retilíneo e uniforme;
2. Velocidade relativa.

■ Observações

1. A letra (a) deve ser resolvida com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. Sugere-se encaminhar a letra (b) como tarefa para casa.

É essencial que se discuta com os estudantes a relatividade das velocidades a partir do referencial escolhido para análise, destacando-se a arbitrariedade quanto a escolha do referencial adotado. A situação proposta inicialmente é uma situação intuitiva para os estudantes, haja vista que trazem consigo a concepção alternativa de que objetos em repouso com relação ao planeta Terra são, naturalmente, os objetos a serem escolhidos como corpo de referência para definição de um referencial para análise dos movimentos de outros objetos sobre a superfície da Terra. Essa concepção trata o planeta Terra como um referencial privilegiado para a análise do movimento. Desta forma, este conflito cognitivo desse ser problematizado quando na apresentação desta atividade.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

De modo a provocar discussões que valorizem a atividade, sugere-se os seguintes questionamentos durante a sua apresentação: (1) A árvore está em repouso ou em movimento? (2) Quais são as velocidades dos carros com relação à árvore? (3) Que medidas são necessárias para se responder os questionamentos anteriores? Quais instrumentos são necessários para essas medidas?

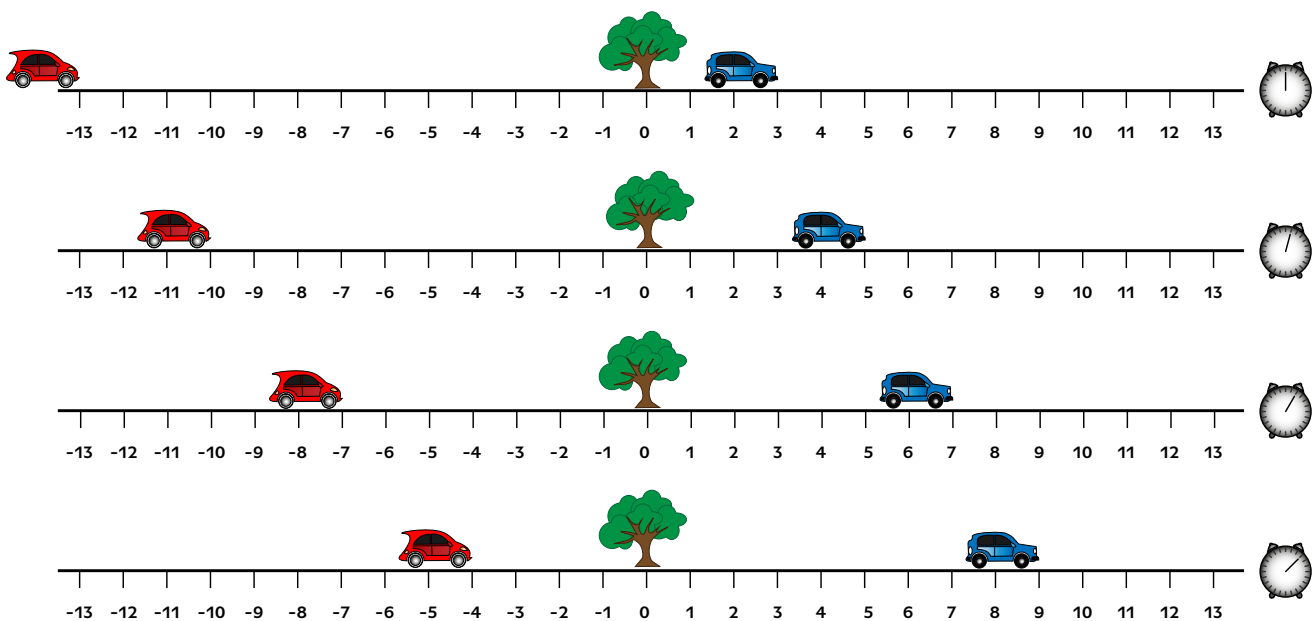
ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 1

Considere uma estrada rural, retilínea, por onde trafegam dois carros, um vermelho e outro azul, ambos em movimento retilíneo uniforme e viajando no mesmo sentido com relação ao leito da estrada. A figura abaixo mostra a distância entre esses dois carros em quatro instantes sucessivos, assim como mostra uma árvore que se encontra nas margens dessa estrada naquele trecho e que foi tomada como corpo de referência, segundo o qual é possível determinar as posições desses carros nos quatro instantes considerados.

Assumindo como instante inicial o primeiro instante proposto pela figura, determine **(a)** as sucessivas posições ocupadas pelo carro vermelho e pela árvore, em oito instantes sucessivos, tendo o carro azul como corpo de referência e **(b)** as sucessivas posições ocupadas pelo carro azul e pela árvore, em oito instantes sucessivos, tendo o carro vermelho como corpo de referência.

Figura 1 - Atividade 1



Fonte: Autoria própria (2022)

REFERENCIAIS E DIAGRAMAS



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Representar e sobrepor referenciais através de diagramas do tipo espaço e tempo;
2. Descrever os movimentos de objetos através de diagramas do tipo espaço e tempo.

■ Conteúdos

1. Diagramas do tipo espaço e tempo;
2. Escalas de diagramas do tipo espaço e tempo.

■ Observações

1. A letra (a) deve ser resolvida com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. A letra (b) deve ser debatida em pequenos grupos;
3. Encaminhar a letra (c) como tarefa para casa.

Visando introduzir a representação de referenciais e movimentos de objetos relativos a estes referenciais, através de diagramas do tipo espaço e tempo (cinemática newtoniana), sugere-se (1) a discussão das diferenças entre estes diagramas e os gráficos das funções horárias do movimento retilíneo e uniforme (MRU), com destaque para o fato de que nestes diagramas o eixo que faz referência ao tempo deve ser construído na vertical e (2) a discussão sobre a inclinação, com relação a horizontal, das retas que representam os movimentos dos objetivos no referencial escolhido para elaboração do referido diagrama, destacando que objetos em repouso serão apresentados por retas verticais e que quanto maior for a velocidade do objeto, menor será a inclinação da reta que representa seu movimento naquele referencial.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

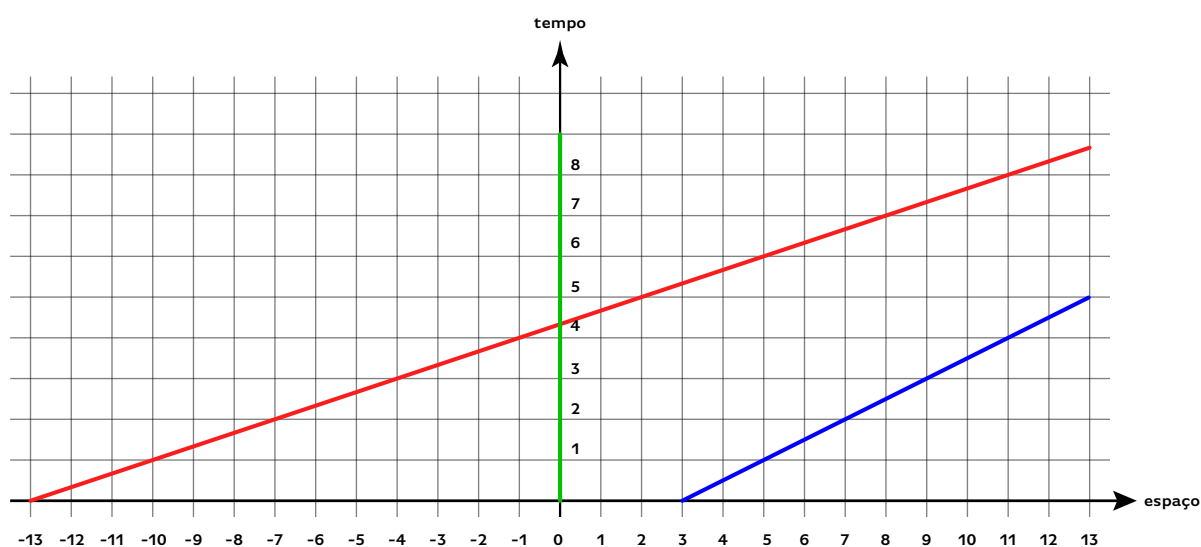
Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Como podemos calcular a velocidade dos carros através destes diagramas? (2) Com relação ao referencial adotado pela árvore, quais são as suas posições com o passar do tempo? (3) Qual a relação da escala adotada para elaboração dos diagramas e as inclinações das retas que representam as posições, com o passar do tempo, dos objetos?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 2

Na figura abaixo, um diagrama do tipo espaço e tempo, temos as posições ocupadas pelos carros (vermelho e azul) e pela árvore, na perspectiva em que o referencial adotado para análise tem a árvore como corpo de referência. Em diagramas como este, as posições ocupadas com o passar do tempo são representadas por curvas. Como os carros tratados neste problema encontram-se em movimento retilíneo e uniforme com relação à árvore, estas curvas são retas. Sendo assim, através de outros dois diagramas do mesmo tipo, represente as posições ocupadas pelos carros e pela árvore, com o passar do tempo, adotando como corpo de referência para definição do referencial **(a)** o carro azul e **(b)** o carro vermelho. Por fim, sobreponha o referencial do carro azul ao referencial da árvore e então diga **(c)** qual é a posição do carro vermelho, com relação ao referencial do carro azul, no instante igual a λ .

Figura 2 - Atividade 2



Fonte: Autoria própria (2022)

DIAGRAMAS E OS POSTULADOS



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Representar e sobrepor referenciais através de diagramas do tipo espaço-tempo;
2. Descrever o movimento de feixes de luz e de objetos através de diagramas do tipo espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Postulados da Teoria da Relatividade Restrita;
2. Indissociabilidade entre espaço e tempo (espaço-tempo).

■ Observações

1. A letra (a) deve ser resolvida com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. A letra (b) deve ser debatida em pequenos grupos e resolvida em sala de aula.

A construção de diagramas do tipo espaço-tempo exige um compromisso dos estudantes com a indissociabilidade entre o espaço e o tempo (espaço-tempo) e o segundo postulado da Teoria da Relatividade Restrita. Assim, é fundamental discutir a necessária coerência entre as dimensões dos eixos na construção de diagramas como este, assim como problematizar sobre a escala adotada para a sua representação (eixo temporal com valores múltiplos da velocidade da luz no vácuo). Através desta escala, as posições ocupados no espaço-tempo por feixes de luz terão sempre uma inclinação de 45 graus com relação a horizontal, independente do referencial adotado. Também é importante discutir como conciliar as posições ocupadas por estes feixes de luz através da sobreposição de referenciais distintos no mesmo diagrama.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Como podemos calcular a velocidade da nave através deste diagrama? (2) Com relação ao referencial adotado pelo observador (e pela nave), qual é a razão entre as distâncias das frentes de ondas da luz para a nave (e para o observador)? (3) Quais contradições podemos desprender dessas razões?

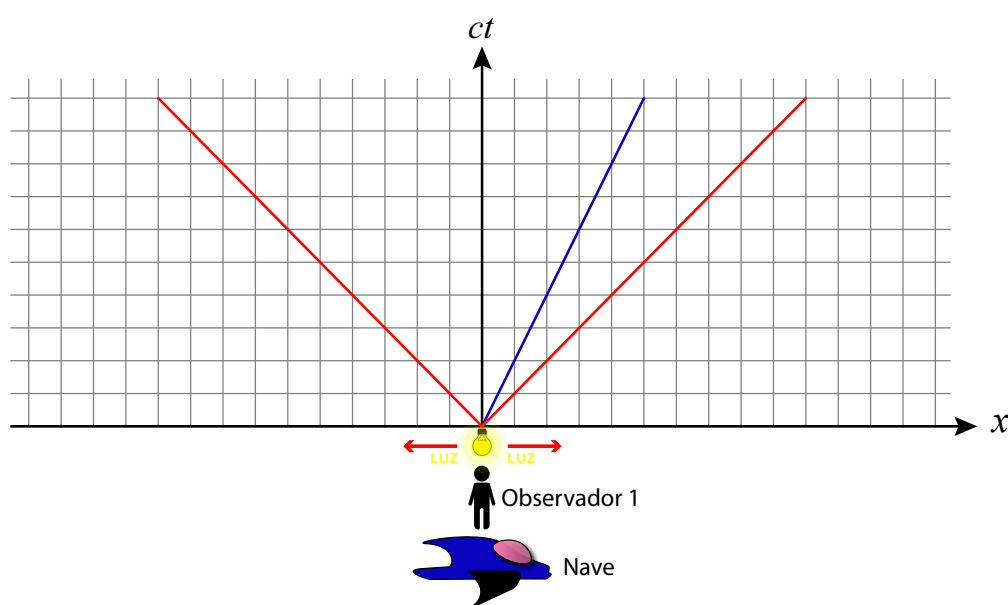
ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 3

No diagrama abaixo estão representadas as posições no espaço-tempo ocupadas pela dianteira da nave espacial (reta azul) e as frentes de ondas da luz emitida pela lâmpada (retas vermelhas) nos dois sentidos da direção x , com relação ao referencial solidário ao observador I.

Sendo assim, a partir da mesma situação, **(a)** represente através de outro diagrama, as posições no espaço-tempo ocupadas pelo observador I e pelas frentes de ondas da luz emitida pela lâmpada, adotando um referencial que seja solidário à nave. **(b)** De acordo com a resposta dada ao item anterior, represente as frentes de onda da luz emitida pela lâmpada em outro diagrama onde o referencial solidário à nave esteja sobreposto ao referencial solidário ao observador I.

Figura 3 - Atividade 3



Fonte: Autoria própria (2022)

DIAGRAMAS DO ESPAÇO-TEMPO



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Representar e sobrepor referenciais através de diagramas do tipo espaço-tempo;
2. Descrever os movimentos da luz e de objetos através de diagramas do tipo espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Postulados da Teoria da Relatividade Restrita;
2. Referenciais inerciais relativísticos;
3. Simultaneidade de eventos.

■ Observações

1. A letra (a) deve ser resolvida com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. As letras (b) e (c) devem ser debatidas em pequenos grupos e serem resolvidas em sala de aula.

Nesta atividade é explorado como devem ser representados os eixos das dimensões espaço-temporais na construção de diagramas do espaço-tempo em que referenciais inerciais em movimento relativo (movimento retilíneo e uniforme) são sobrepostos, tendo em vista a necessidade de análise dos mesmos eventos por referenciais inerciais diferentes. Assim, a apresentação da atividade em questão deve ser precedida por discussões sobre as diferenças entre referenciais inerciais newtonianos e relativísticos, assim como o conceito de simultaneidade não absoluta no contexto da Teoria da Relatividade Restrita. Nas representações sugeridas pelas respostas dadas, destaque os seguintes eventos: (1) emissão do pulso de luz pela Nave 2, (2) reflexão desse pulso de luz no espelho da Nave 3 e (3) a detecção do pulso refletido na Nave 3 pela Nave 2.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

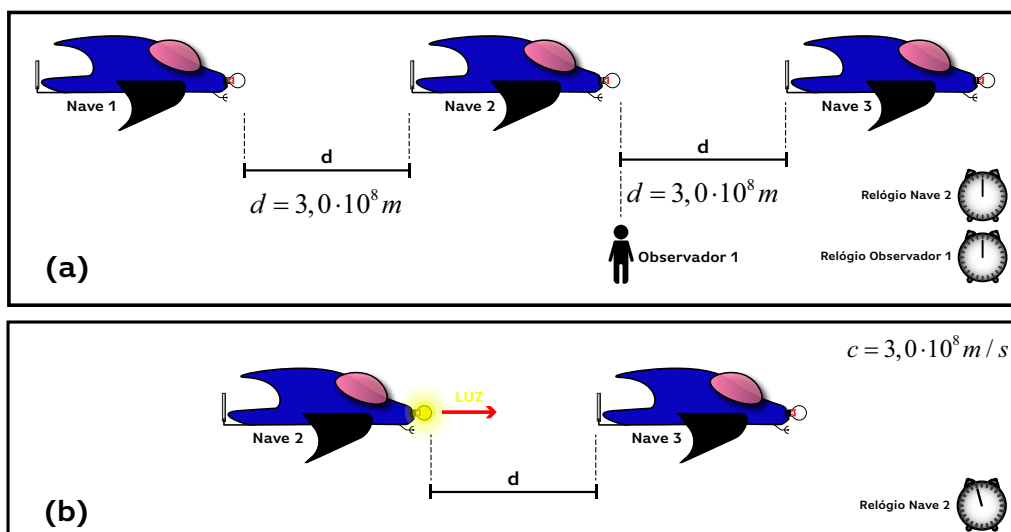
Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) A reflexão do pulso de luz pelo espelho da Nave 3 e o encontro da Nave 2 com o observador I (Fig. 1) são eventos simultâneos em qual referencial? (2) Qual é a velocidade da Nave 3 com relação à Nave 2? (3) Com relação ao referencial solidário à Nave 2, qual a posição da Nave 3 no instante da reflexão do pulso de luz pela Nave 3?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 4

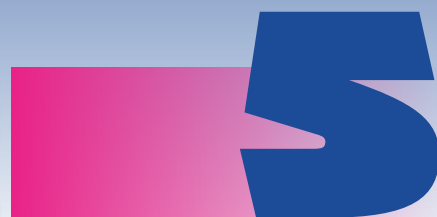
Três naves idênticas, igualmente espaçadas, viajam (em movimento retilíneo e uniforme) com velocidades iguais a metade da velocidade da luz no vácuo, medidas com relação ao observador I, em repouso com relação a Terra. Essas naves têm, acopladas a sua uma parte externa, uma lâmpada e um sensor de luz em sua dianteira e um espelho em sua traseira. Sabe-se que o relógio associado ao observador I está sincronizado com o relógio associado a Nave 2 (a). Considere que, um segundo antes da configuração sugerida em (a), de acordo com o relógio associado a Nave 2, a Nave 2 tenha enviado um pulso de luz em direção a Nave 3 (b). Através de diagramas do espaço-tempo, represente os movimentos das três naves, do observador I e do feixe de luz emitido (e refletido) pela Nave 2, em referenciais solidários ao (a) observador I e à (b) Nave 2. De acordo com as respostas dadas nos itens anteriores, (c) represente a mesma situação através de um diagrama em que o referencial solidário a Nave 2 esteja sobreposto ao referencial solidário ao observador I.

Figura 4 - Atividade 4



Fonte: Autoria própria (2022)

SIMULTANEIDADE NÃO ABSOLUTA



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Demonstrar o caráter não absoluto da simultaneidade de eventos através de diagramas do tipo espaço-tempo;
2. Introduzir a diferença entre a ocorrência e o registro de eventos.

■ Conteúdos

1. Caráter não absoluto da simultaneidade de ocorrência de eventos em referenciais inerciais relativísticos distintos.

■ Observações

1. As letras (a) e (b) devem ser resolvidas com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. A letra (c) deve ser encaminhada como tarefa para casa.

Nesta atividade apresenta-se aos estudantes uma releitura do problema clássico sobre simultaneidade, interpretando sua solução a partir de diagramas do espaço-tempo. Recomenda-se como discussão prévia à sua apresentação abordar o mesmo problema a partir da cinemática newtoniana. Ou seja, através das funções horárias do MRU, mostrar que, do ponto de vista clássico, o registro dos sinais luminosos serão simultâneos, tanto para o referencial solidário ao observador 1 quanto para o referencial solidário ao observador 2. Após esta discussão, apresentar o mesmo problema a partir do viés relativístico, também através da análise das funções horárias do MRU, demonstrando o caráter não absoluto da simultaneidade. Somente após esta discussão prévia é que a atividade deve ser apresentada aos estudantes.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

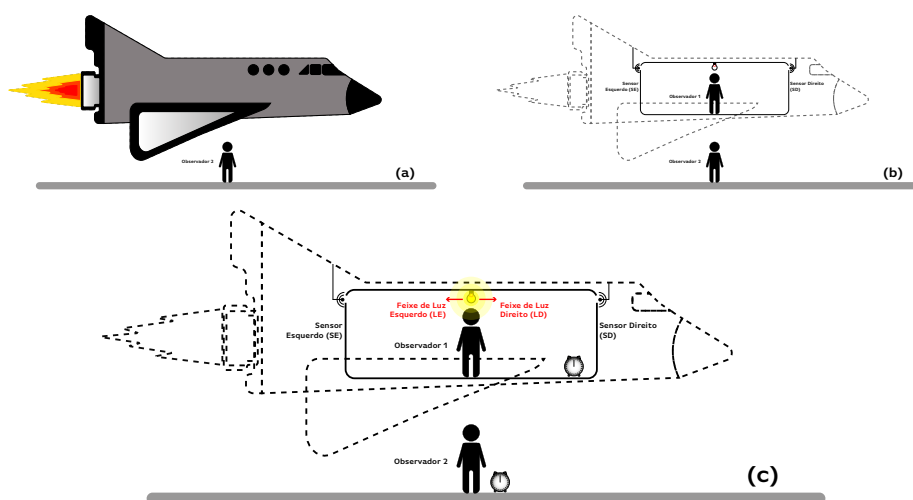
Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Ao que se deve a não simultaneidade dos registros dos sensores quando analisados por referenciais inerciais distintos? (2) A não simultaneidade destes eventos (registros dos sinais luminosos pelos sensores) tem alguma relação com o momento em que estes registros são percebidos pelos observadores em seus respectivos referenciais?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 5

Considere uma lâmpada localizada no meio do compartimento central de uma nave. Quando a fonte é ligada (Fig. 3), a luz se propaga em todas as direções com a mesma velocidade. Como essa lâmpada se encontra equidistante dos sensores de luz, à esquerda e à direita, nas extremidades frontal e traseira desse compartimento (Fig. 02), o observador 1 que se encontra dentro da nave constata que a luz alcança o sensor direito no mesmo instante em que alcança o sensor esquerdo. Porém, o mesmo não ocorre com o observador 2, que se encontra fora da nave. Para esse observador a ocorrência dos dois eventos são registradas em outro referencial, que não está em repouso com relação à nave. Mostre através de diagramas do espaço-tempo que estes eventos são simultâneos para o observador 1, porém não são simultâneos para o observador 2. Nesta demonstração adote um referencial solidário **(a)** ao observador 2 e um referencial solidário **(b)** ao observador 1. Por fim, de acordo com as respostas encontradas nos itens anteriores, **(c)** faça a mesma demonstração sobrepondo o referencial solidário ao observador 1 no referencial solidário ao observador 2.

Figura 5 - Atividade 5



Fonte: Autoria própria (2022)

OCORRÊNCIA E REGISTRO



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Discutir a diferença entre a ocorrência e o registro de eventos em referenciais inerciais relativísticos;
2. Discutir as características de referenciais relativísticos e reafirmar a velocidade da luz como um limite de velocidade para a propagação de informações no espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Ocorrência de eventos no espaço-tempo;
2. Registros das ocorrências de eventos em referenciais inerciais relativísticos distintos.

■ Observações

1. Esta atividade deve ser resolvida individualmente.

Nesta atividade é constatada, geometricamente, a diferença entre a ocorrência e o registro de eventos no espaço-tempo, a partir de diagramas do espaço-tempo. Desta forma, recomenda-se uma discussão prévia à apresentação da atividade sobre a diferença dos termos medir e observar, do ponto de vista físico. Nesta discussão é fundamental ressaltar novamente as características de referenciais relativísticos, assim como a previsão teórica da Teoria da Relatividade Restrita de que a velocidade da luz no vácuo representa um limite intransponível para a propagação de informações no espaço-tempo. Em virtude desta limitação, também se faz necessário a discussão sobre a correção dos registros temporais de eventos, quando comparado com os instantes de suas respectivas ocorrências nos referenciais de análise.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Ao que se deve a não simultaneidade dos registros dos sensores quando analisados por referenciais inerciais distintos? (2) A não simultaneidade desses eventos (registros dos sinais luminosos pelas sensores) tem alguma relação com o momento em que esses registros são percebidos pelos observadores em seus respectivos referenciais?

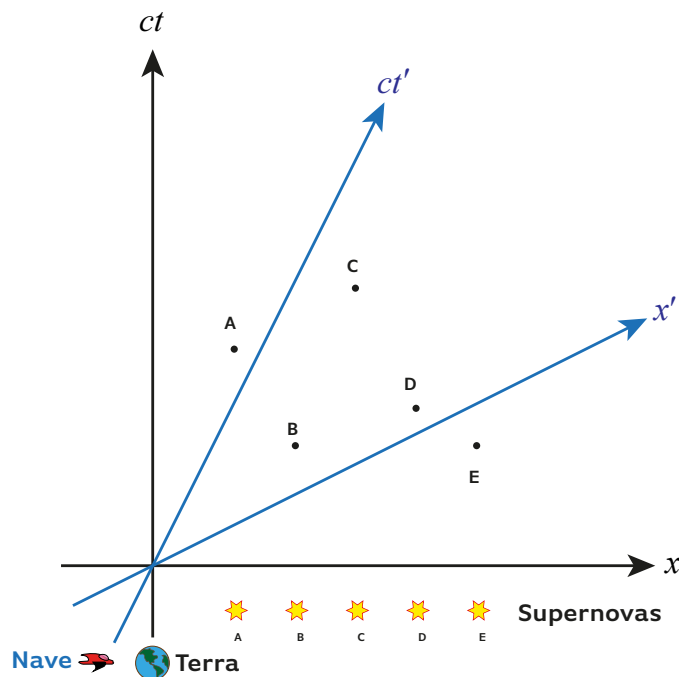
ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 6 (TAKEUCHI, 2010, p. 168)

O diagrama do espaço-tempo abaixo mostra cinco estrelas que se transformam em supernovas de acordo com os eventos A, B, C, D e E. Essas supernovas são observadas por observadores na Terra e observadores a bordo de um nave em movimento rápido, cujas linhas de mundo também são mostradas no diagrama abaixo. Responda as seguintes questões:

- (a) Em que ordem cronológica as cinco supernovas ocorrem no referencial terrestre?
- (b) Em que ordem cronológica as cinco supernovas ocorrem no referencial da Nave?
- (c) Em que ordem cronológica um observador solidário ao referencial terrestre registra a ocorrência das supernovas?
- (d) Em que ordem cronológica um observador solidário ao referencial da nave registra a ocorrência das supernovas?

Figura 6 - Atividade 6



Fonte: Autoria própria (2022)

DILATAÇÃO TEMPORAL



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Discutir o conceito de intervalo de tempo próprio;
2. Relacionar escalas dos eixos das dimensões espaço-temporais de referenciais distintos;
3. Explicitar a dilatação temporal através de medidas de segmentos de retas representados nos diagramas do espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Intervalos Relativísticos;
2. Dilatação Temporal;
3. Transformações de Lorentz.

■ Observações

1. As letras (a) e (c) devem ser resolvidas com o auxílio do docente.

Esta atividade possibilita aos estudantes a percepção da dilatação temporal de maneira explícita, através de segmentos de retas representados em diagramas do espaço-tempo. Através dos intervalos relativísticos é possível construir hipérbolas que relacionam as escalas das dimensões dos eixos espaço-temporais de referenciais inerciais sobrepostos nestes diagramas. Com esta relação é possível calcular a dilatação temporal entre dois eventos através de regra de três simples. Assim, sugere-se previamente à apresentação desta atividade uma discussão sobre intervalos relativísticos invariantes. Durante a apresentação da atividade, sugere-se também uma discussão sobre o que deve ocorrer com a escala apresentada por estes diagramas quando o referencial analisado tem uma velocidade relativa próxima à velocidade da luz no vácuo.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

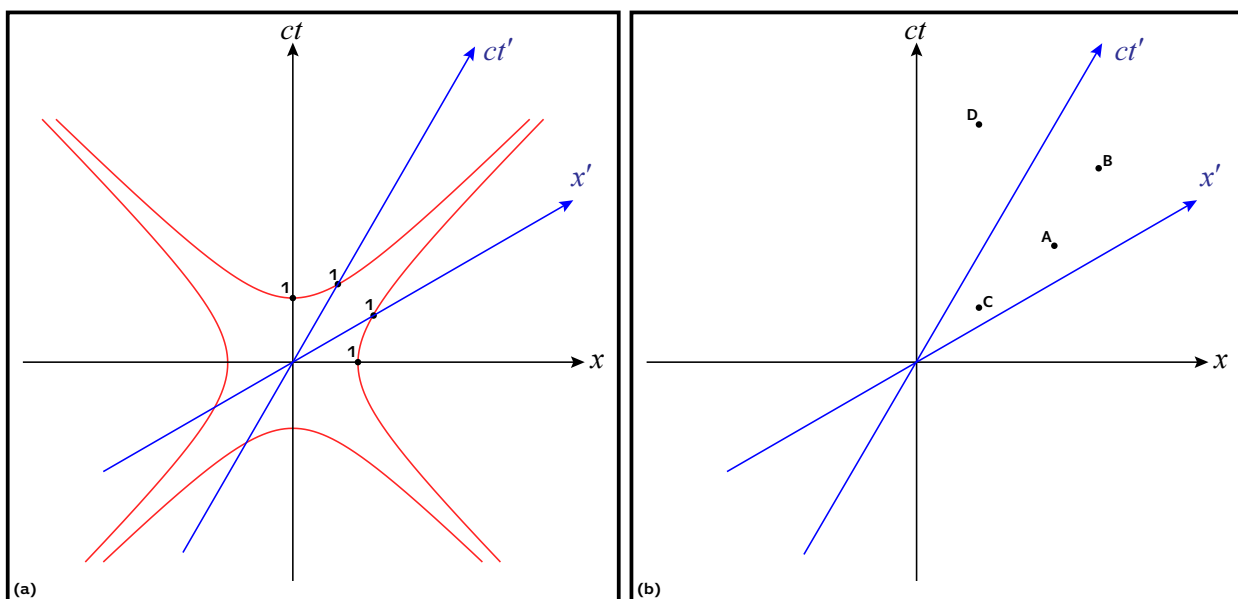
Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Como poderíamos estabelecer as coordenadas espaço-temporais destes eventos nos referenciais representados em questão? (2) Através das respostas encontradas é possível calcular a velocidade do referencial em movimento?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 7

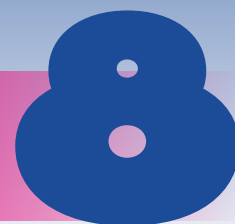
A Fig.1 representada abaixo mostra a hipérbole de calibração entre dois referenciais inerciais, assim como a escala adotada para a calibragem. Já na Fig.2 temos a representação da ocorrência de quatro eventos (A, B, C e D) no espaço-tempo. De acordo com a escala sugerida pela Fig. 1, calcule, na perspectiva dos dois referenciais inerciais representados pelos diagramas (referencial sem linha e referencial com linha), a **(a)** variação temporal na ocorrência dos eventos A e B, **(b)** a variação temporal na ocorrência dos eventos C e D, **(c)** de acordo com o referencial adotado, quais pares de eventos, (A,B) e (C,D), são definidos como intervalos de tempo próprio e a partir das respostas dos itens anteriores, **(d)** explique o fenômeno da dilatação temporal.

Figura 7 - Atividade 7



Fonte: Autoria própria (2022)

CONTRAÇÃO DE LORENTZ



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Discutir o conceito de comprimento próprio;
2. Relacionar escalas dos eixos das dimensões espaço-temporais de referenciais distintos;
3. Explicitar a contração de Lorentz através de medidas de segmentos de retas representados nos diagramas do espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Intervalos Relativísticos;
2. Contração de Lorentz;
3. Transformações de Lorentz.

■ Observações

1. As letras (a) e (c) devem ser resolvidas com o auxílio do docente.

Através dos intervalos relativísticos é possível construir hipérbolas que relacionam as escalas das dimensões dos eixos espaço-temporais de referenciais inerciais sobrepostos nestes diagramas. Com esta relação é possível calcular a contração de Lorentz através de regras de três simples. Desta forma, sugere-se previamente à apresentação da atividade uma discussão sobre a necessidade de simultaneidade entre os dois eventos que representam as posições das extremidades do objeto o qual se deseja medir o comprimento, de acordo com o referencial de análise adotado. Nesta discussão é necessário definir o conceito de comprimento próprio, sendo este o comprimento de um objeto medido através de um referencial em que o objeto em questão encontra-se em repouso.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

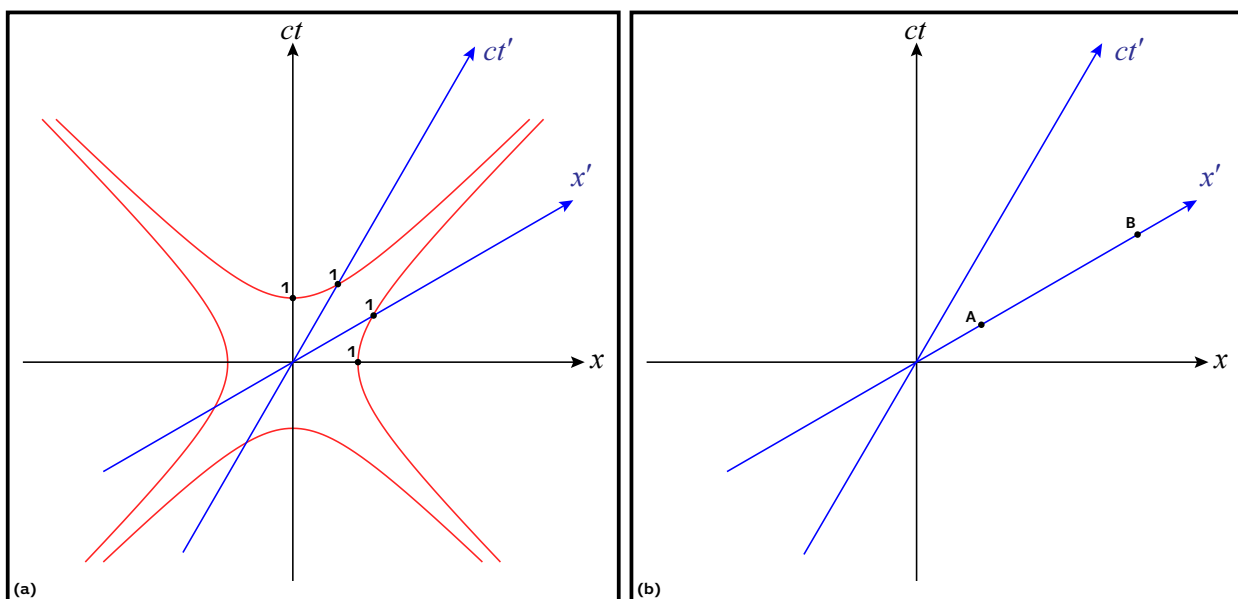
Como na atividade anterior, sugere-se o reforço dos seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Como poderíamos estabelecer as coordenadas espaço-temporais destes eventos nos referenciais representados em questão? (2) Através das respostas encontradas é possível calcular a velocidade do referencial em movimento?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 8

A Fig.1 representada abaixo mostra a hipérbole de calibração entre dois referenciais inerciais, assim como a escala adotada para a calibragem. Já na Fig.2, os eventos A e B representam as posições, no espaço-tempo, das extremidades de um objeto em repouso, com relação ao referencial com linha, de comprimento L . Como ilustrado por essa figura, este referencial (com linha) está em movimento com relação ao outro referencial (sem linha) representado. De acordo com a escala sugerida pela Fig. 1, calcule, na perspectiva dos dois referenciais inerciais representados pelos diagramas (sem linha e com linha), **(a)** o comprimento L do objeto em questão e, a partir da resposta encontrada no item anterior, **(b)** explique o fenômeno da contração de Lorentz.

Figura 8 - Atividade 8



Fonte: Autoria própria (2022)

CAUSALIDADE DE EVENTOS



INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Discutir as possíveis relações de causalidade entre eventos;
2. Avaliar as possibilidades de causalidade através de intervalos relativísticos invariantes;
3. Relacionar intervalos relativísticos invariantes às regiões do espaço-tempo associadas a cones de luz de eventos.

■ Conteúdos

1. Causalidade de eventos;
2. Intervalos relativísticos invariantes;
3. Cones de Luz.

■ Observações

1. Toda a atividade deve ser resolvida a partir de discussões em pequenos grupos.

Nesta atividade sugere-se a discussão acerca das possibilidades de inversão na ordem de ocorrência de pares de eventos, a depender do referencial adotado em suas análises. Esta discussão deve ressaltar que alguns eventos trazem consigo relações de causalidade (causa e consequência), o que impossibilita a inversão temporal entre eventos em que essas relações se manifestam. As possibilidades de ocorrência destas relações podem ser aferidas através de intervalos relativísticos invariantes que independem do referencial adotado para análise. Assim, nesta discussão deve-se ressaltar o tipo do intervalo estabelecido entre os eventos em que essa possibilidade é analisada. Esta análise determina se estes eventos estarão, mutuamente, nas regiões internas (passado ou presente) ou externas de seus respectivos cones de luz.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Que relações de causalidade (causa e consequência) são possíveis entre dois eventos? (2) Eventos simultâneos podem estabelecer relações de causalidade entre si? (3) Existe alguma relação entre a causalidade de eventos e o limite para a velocidade de propagação de informações no espaço-tempo?

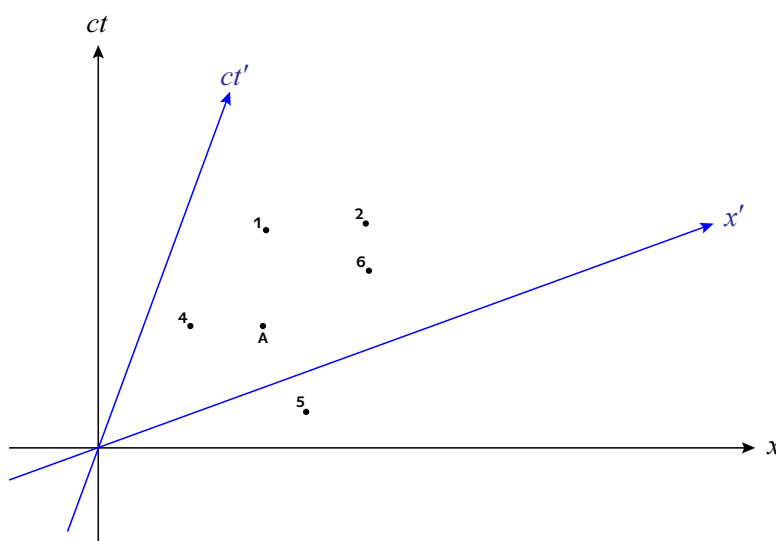
ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 9

De acordo com a Teoria da Relatividade Restrita, a ordem de ocorrência de alguns pares de eventos podem mudar. Ou seja, tomando dois eventos genéricos, (e1) e (e2), como exemplo, desde que esses eventos não guardem entre si relações de causalidade, temos três possibilidades para a ordem de ocorrência desses eventos: (e1) anterior a (e2), (e1) simultâneo a (e2) e (e1) posterior a (e2).

A figura abaixo ilustra a ocorrência de seis eventos (A, 1, 2, 3, 4 e 5) no espaço-tempo, assim como dois referenciais onde estes eventos são analisados. De acordo com essa figura, **(a)** quais dos eventos numéricos (1, 2, 3, 4 e 5) podem ter alguma relação de causalidade com o evento A? **(b)** A partir da análise desenvolvida na resposta do item anterior, explique como é possível, através de diagramas do espaço-tempo, analisar a possibilidade de alteração (ou não) na ordem de ocorrência de pares eventos no espaço-tempo.

Figura 9 - Atividade 9



Fonte: Autoria própria (2022)

VELOCIDADE RELATIVA 10

INDICAÇÕES PARA DISCUSSÃO

■ Objetivos

1. Representar referenciais relativísticos a partir de diagramas do espaço-tempo;
2. Analisar eventos através da sobreposição de referenciais distintos em diagramas do espaço-tempo.

■ Conteúdos

1. Velocidade relativa;
2. Postulados da Teoria da Relatividade Restrita;
3. Diagramas do espaço-tempo.

■ Observações

1. A letra (a) deve ser resolvida com o auxílio do docente, em sala de aula;
2. As letras (b) e (c) deve ser encaminhadas como tarefa para casa.

Por discutir a propagação de sinais luminosos no espaço-tempo a partir de observadores solidários a três referenciais distintos, a análise desta atividade fica extremamente simples quando feita através de diagramas do espaço-tempo. Nestes diagramas é possível sobrepor referenciais e, em consequência desta sobreposição, analisar eventos de forma concomitante em referenciais distintos. Assim, sugere-se a discussão acerca da interpretação do referencial relativístico através de sua representação nestes diagramas. Deve-se destacar nesta discussão a necessidade de alteração do referencial a depender da situação a ser analisada, assim como reforçar o compromisso com o caráter invariante da velocidade de propagação de sinais luminosos no vácuo, em acordo com o segundo postulando da Teoria da Relatividade Restrita.

QUESTIONAMENTOS PERTINENTES

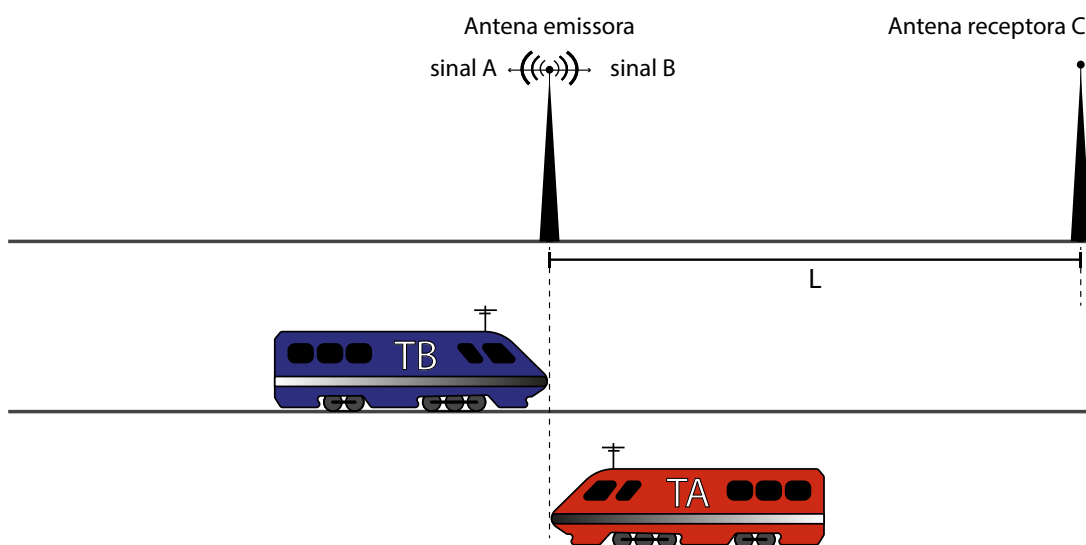
Sugere-se os seguintes questionamentos durante a apresentação da atividade: (1) Com relação ao trem A, qual a velocidade do trem B? (2) Com relação ao trem B, qual a velocidade do trem A? (3) Com relação ao trem A, quais as velocidades das antenas (emissora e receptora)? (4) Com relação ao trem B, quais as velocidades das antenas (emissora e receptora)?

ATIVIDADE SUGERIDA

ATIVIDADE 10 - Adaptação do problema dos trens (VILLANI; PACCA, 1987 apud AYALA FILHO, 2010)

Considere dois trens TA e TB que se deslocam na mesma direção e sentidos opostos com velocidade $v = C/2$ em relação aos trilhos, sendo que TB se desloca da esquerda para a direita. Em um determinado instante de tempo, estes dois trens se cruzam em uma estação. Neste instante, a antena de rádio da estação emite dois sinais eletromagnéticos A e B em sentidos opostos, sendo que o sinal A é emitido no mesmo sentido do movimento de TA e o sinal B é emitido no sentido de TB. Considere a existência de uma antena receptora C, disposta a uma distância L à direita da estação, que detecta a passagem do sinal B. Responda as perguntas a seguir, justificando suas respostas através de diagramas do espaço-tempo. **(a)** A que distância da antena emissora estarão os trens TA, TB e o sinal A quando o sinal B atingir a antena C? **(b)** Suponha que você seja um passageiro do trem TB. Quando o sinal B atinge a antena C, quais dos dois sinais (A ou B) está mais próximo de você? **(c)** Suponha que você seja um passageiro do trem TA. Quando o sinal B atinge a antena C, quais dos dois sinais (A ou B) está mais próximo de você?

Figura 10 - Atividade 10

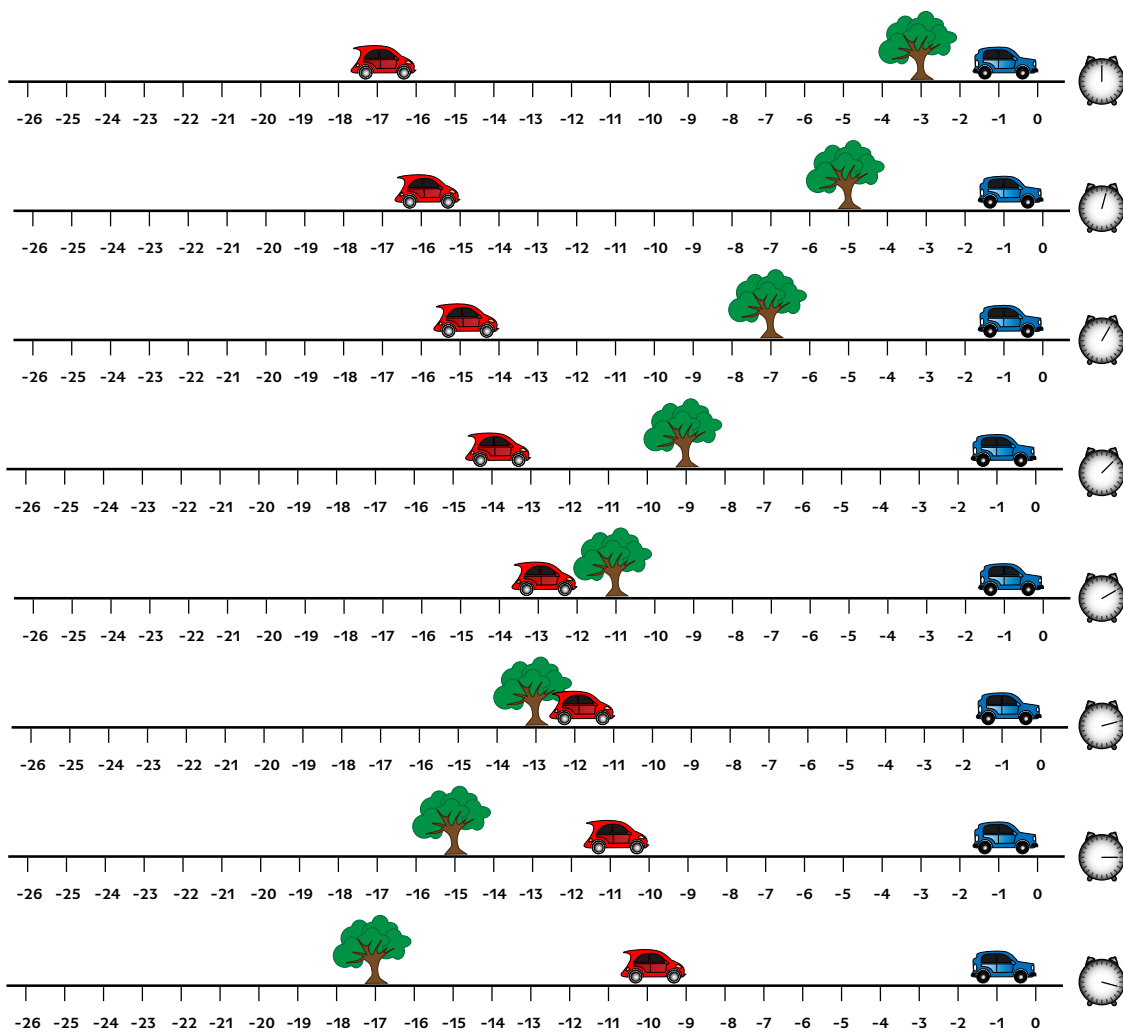


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 1 (a)

Figura 11 - Solução da atividade 1 (a)

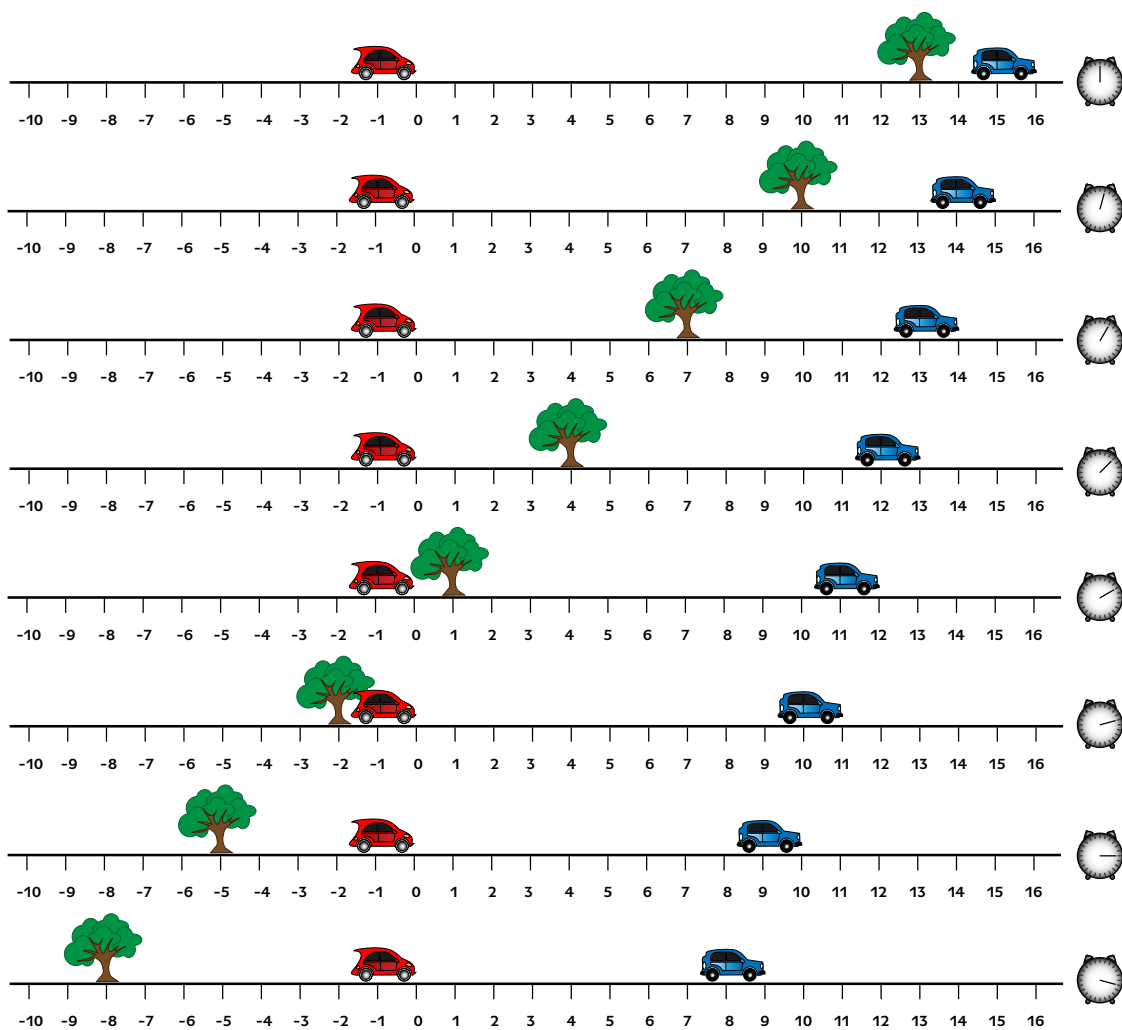


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 1 (b)

Figura 12 - Solução da atividade 1 (b)

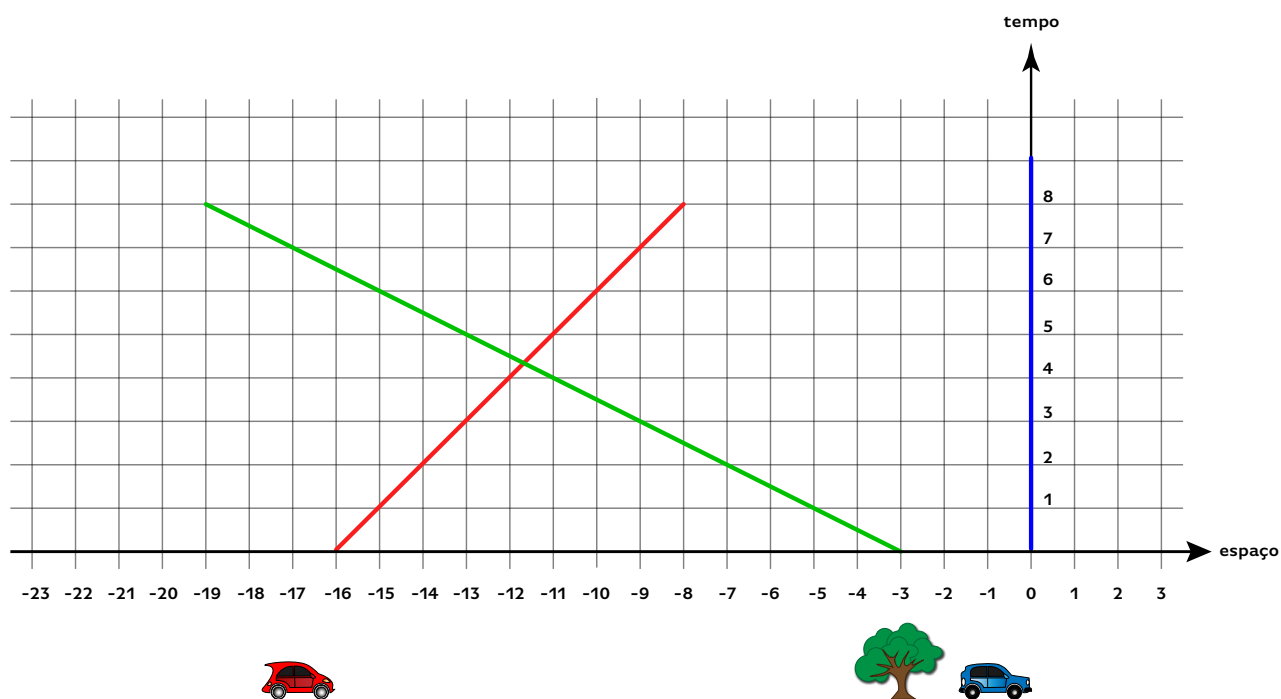


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 2 (a)

Figura 13 - Solução da atividade 2 (a)

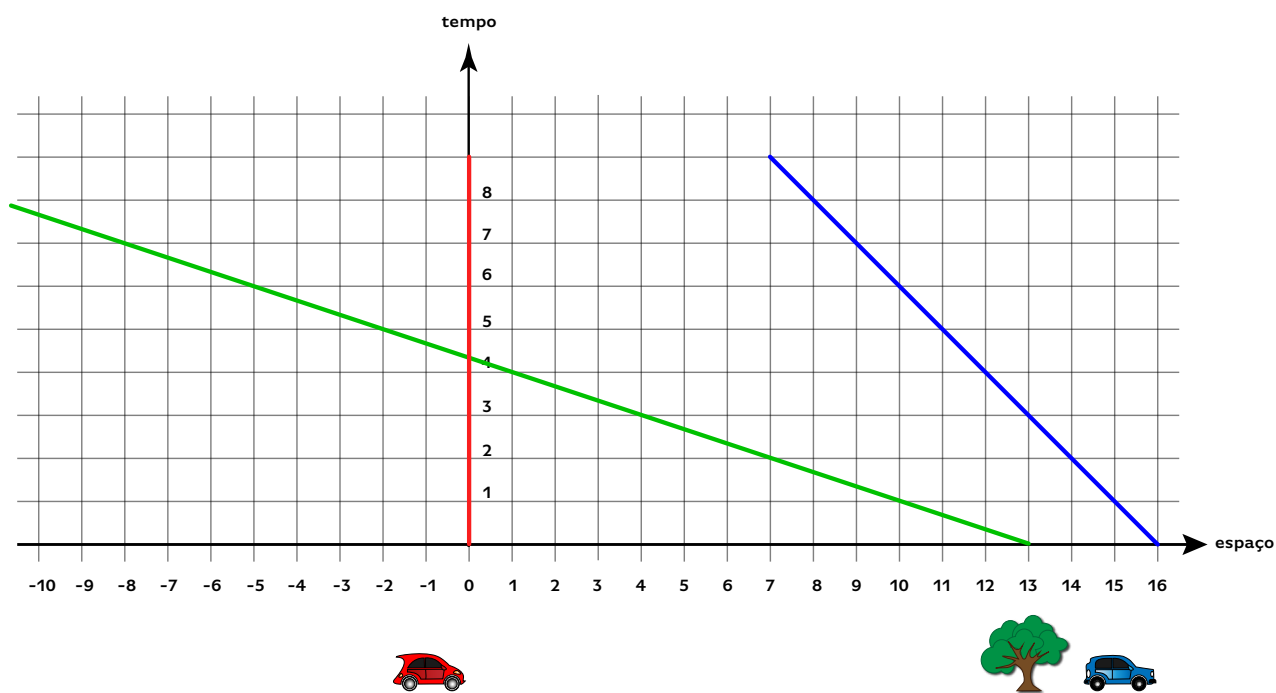


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 2 (b)

Figura 14 - Solução da atividade 2 (b)

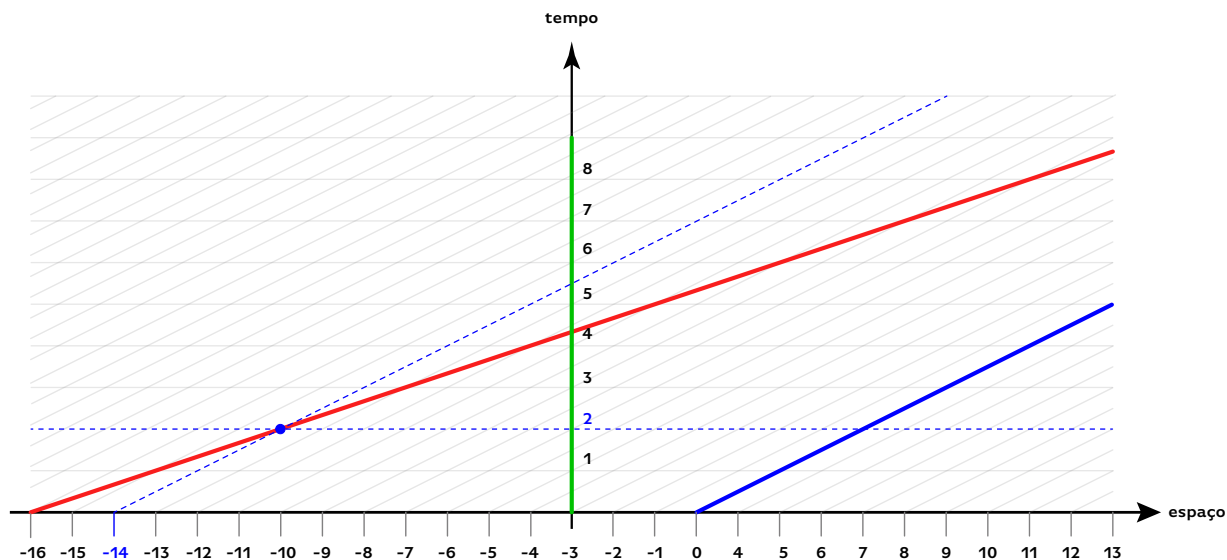


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 2 (c)

Figura 15 - Solução da atividade 2 (c)

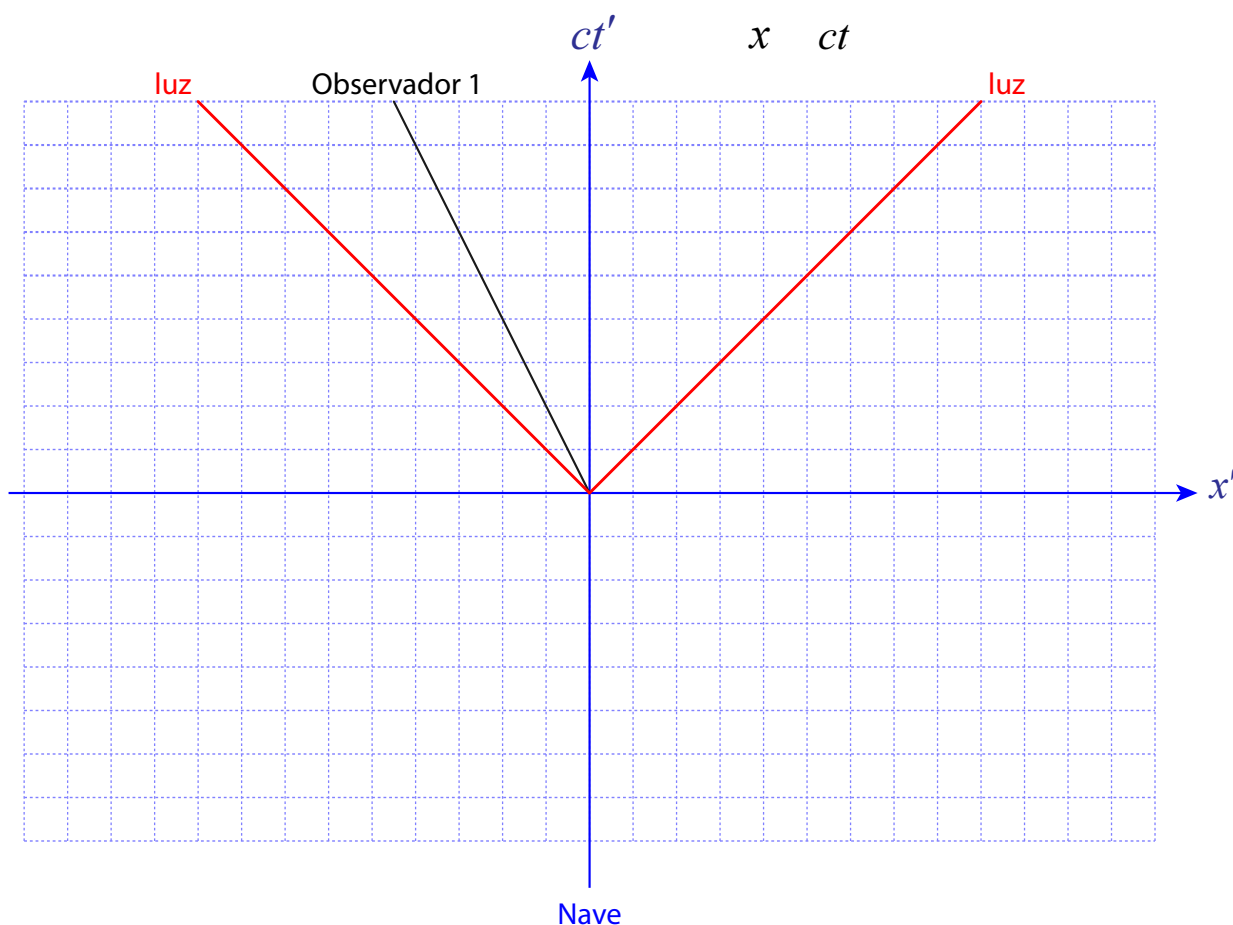


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 3 (a)

Figura 16 - Solução da atividade 3 (a)

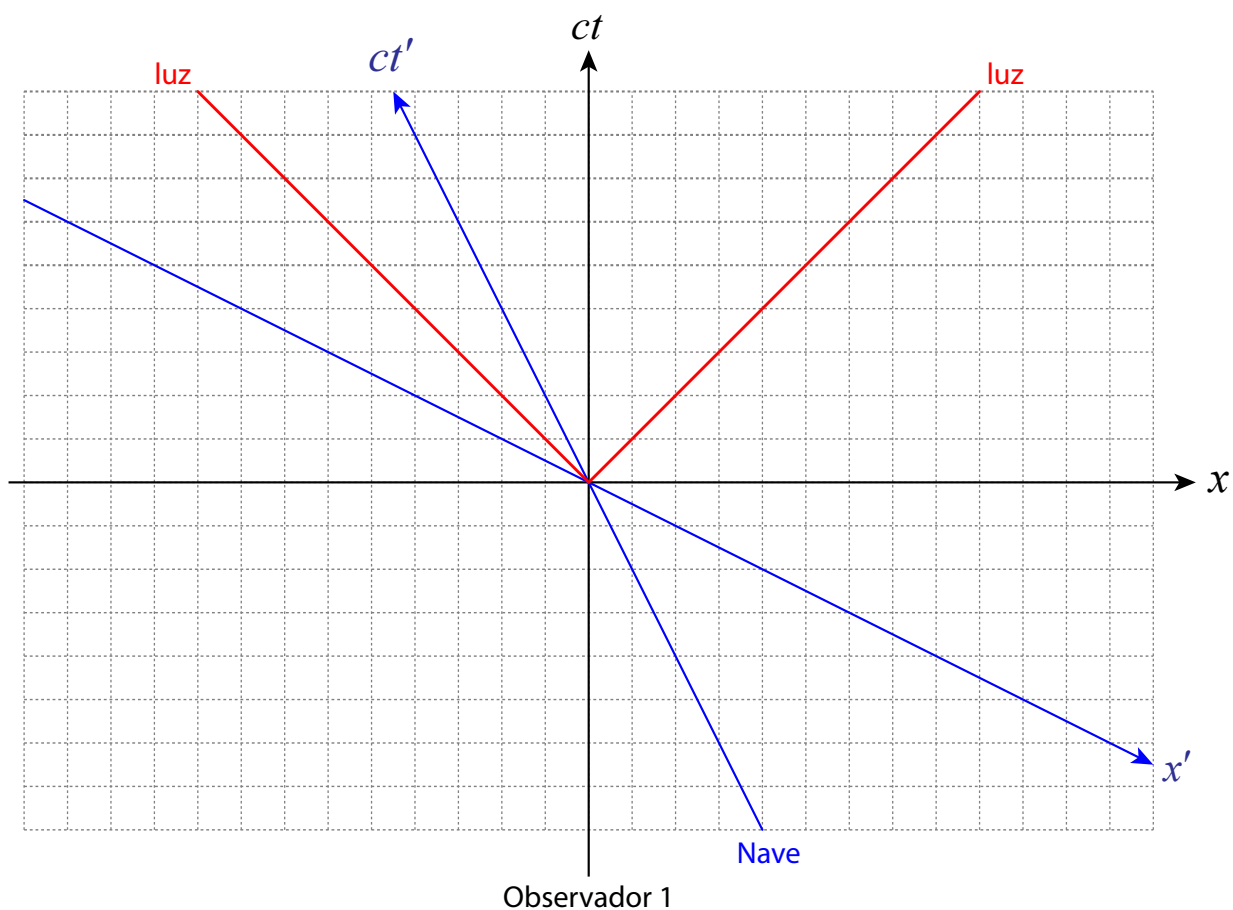


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 3 (b)

Figura 17 - Solução da atividade 3 (b)

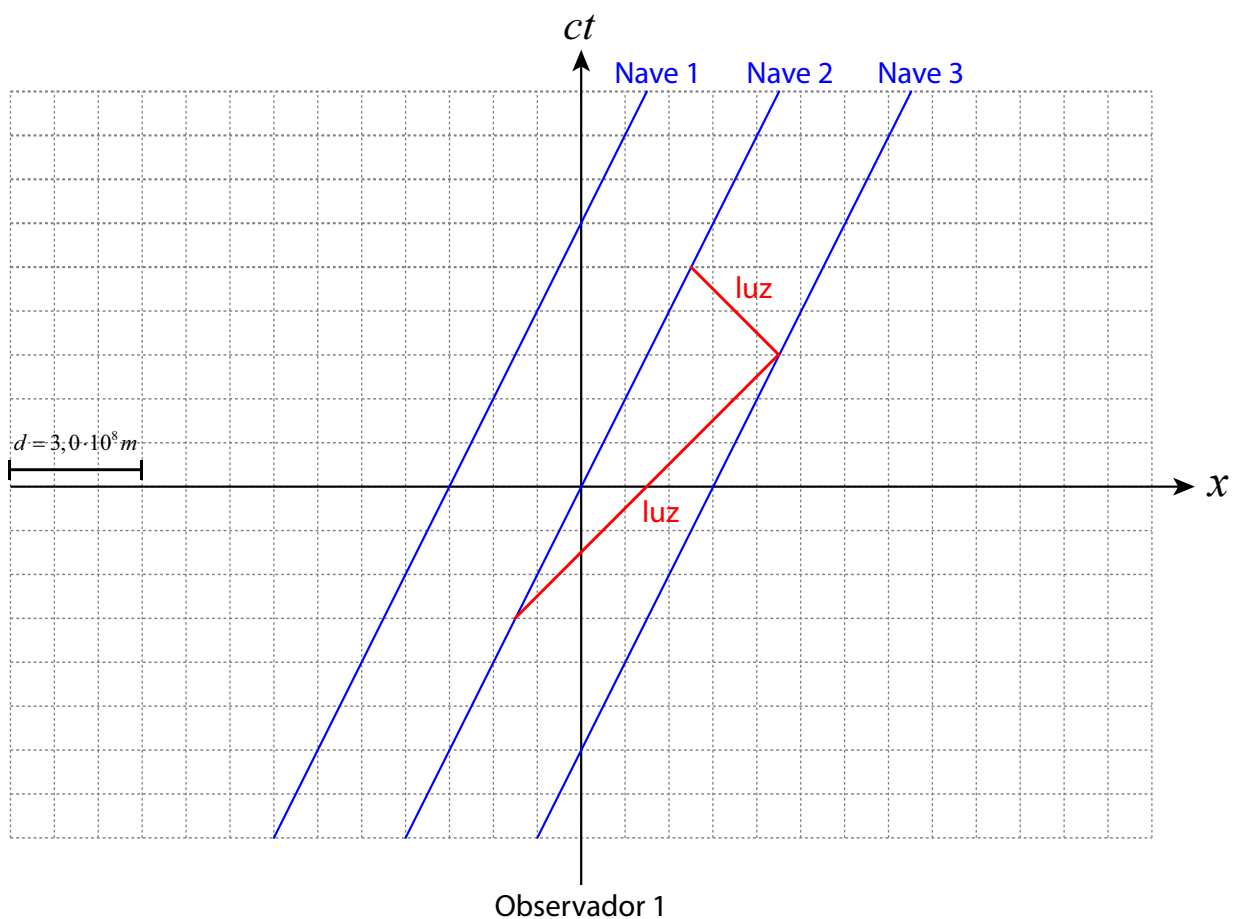


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 4 (a)

Figura 18 - Solução da atividade 4 (a)

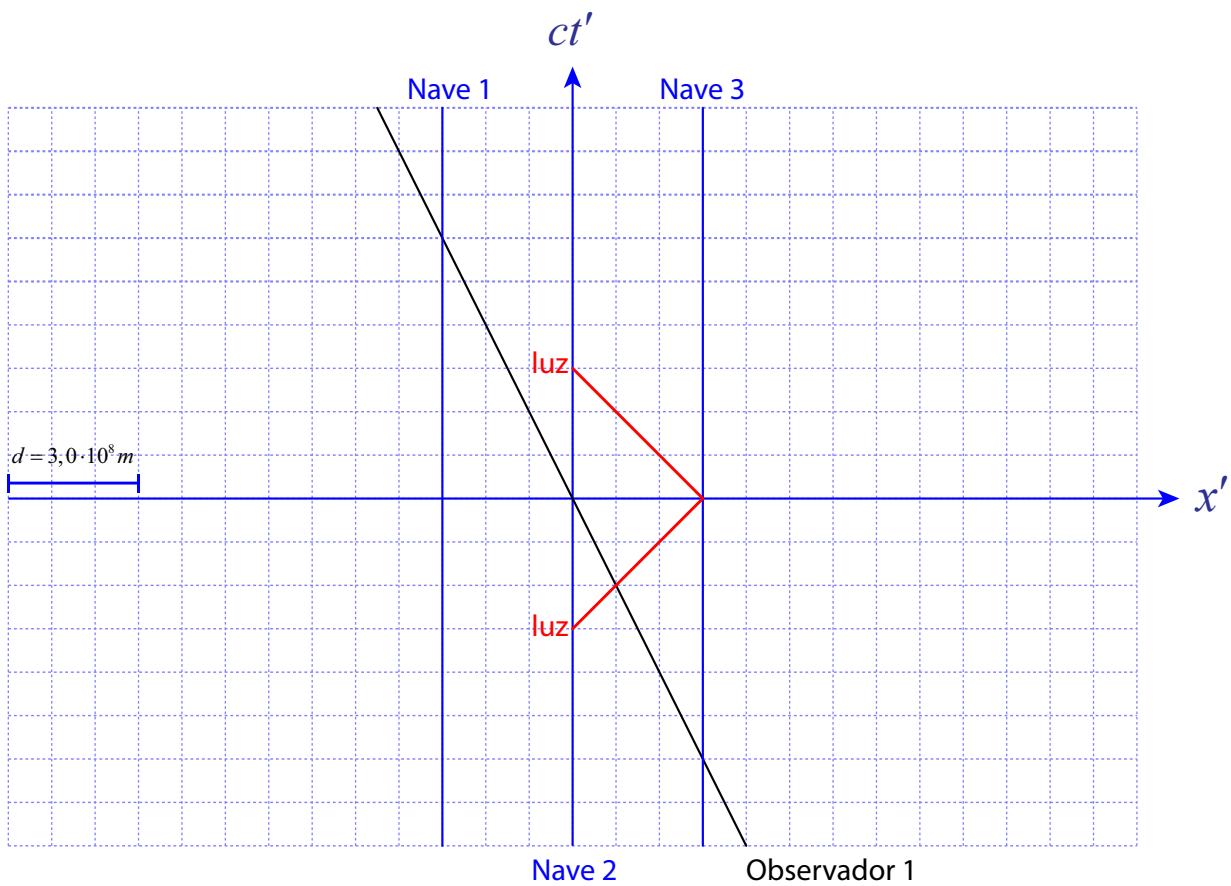


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 4 (b)

Figura 19 - Solução da atividade 4 (b)

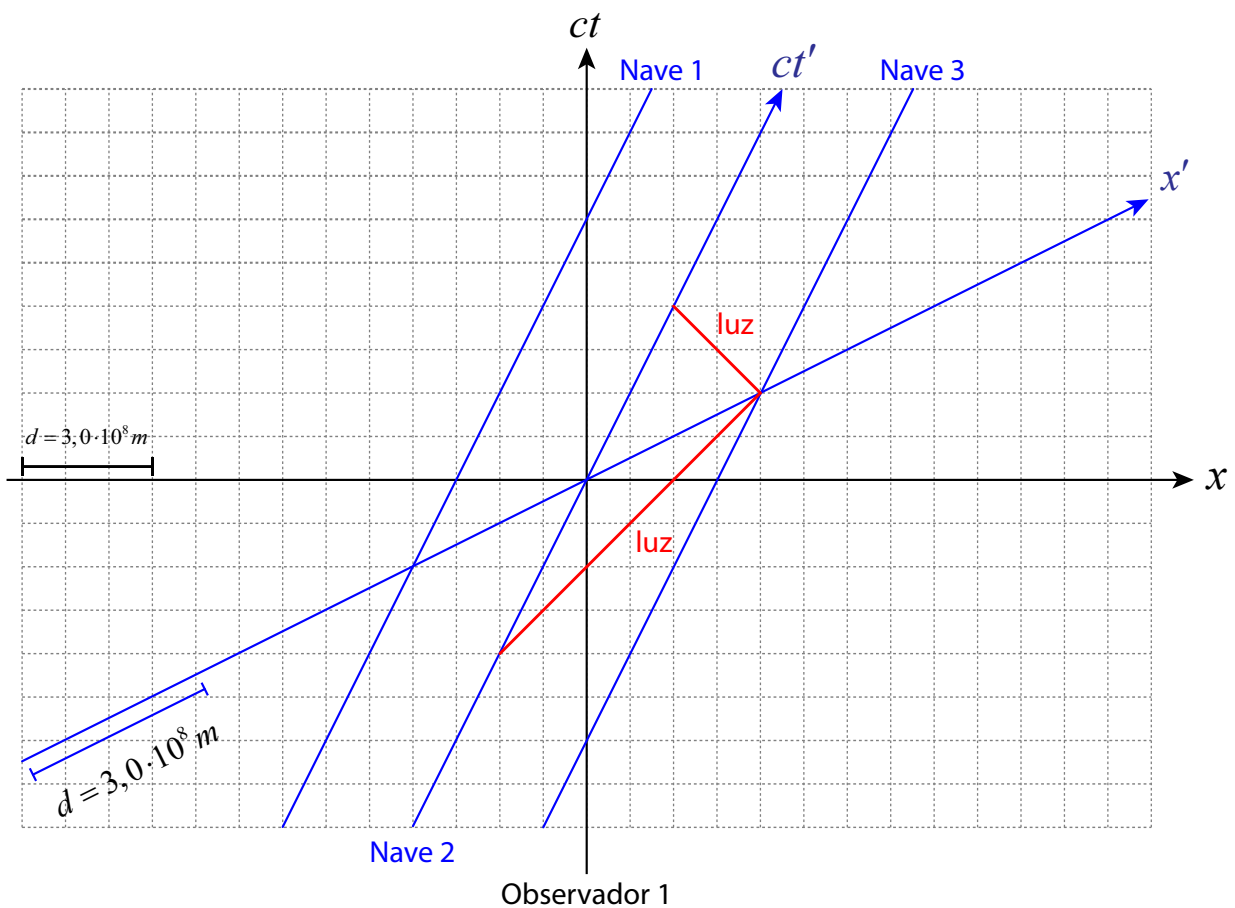


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 4 (c)

Figura 20 - Solução da atividade 4 (c)

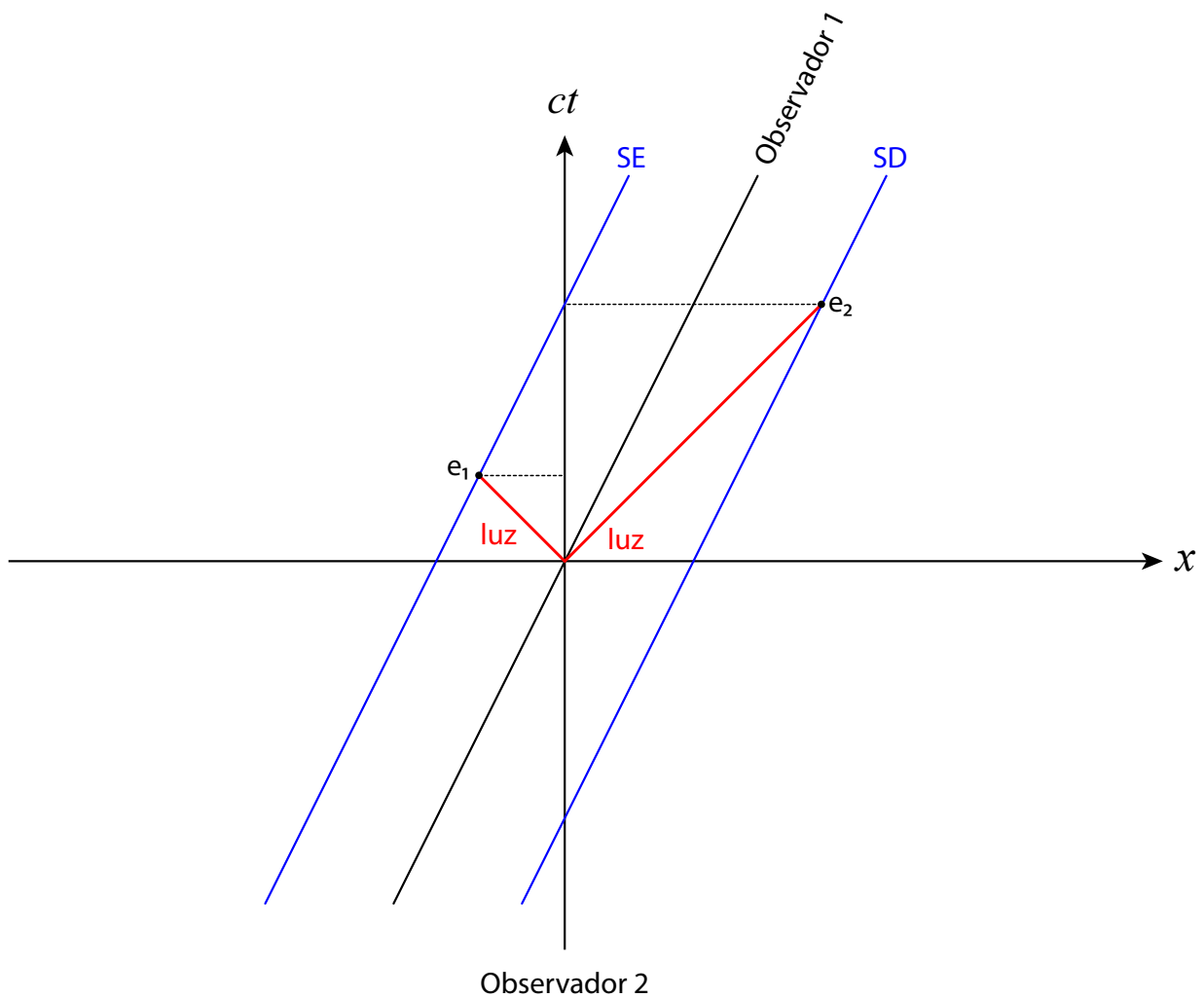


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 5 (a)

Figura 21 - Solução da atividade 5 (a)

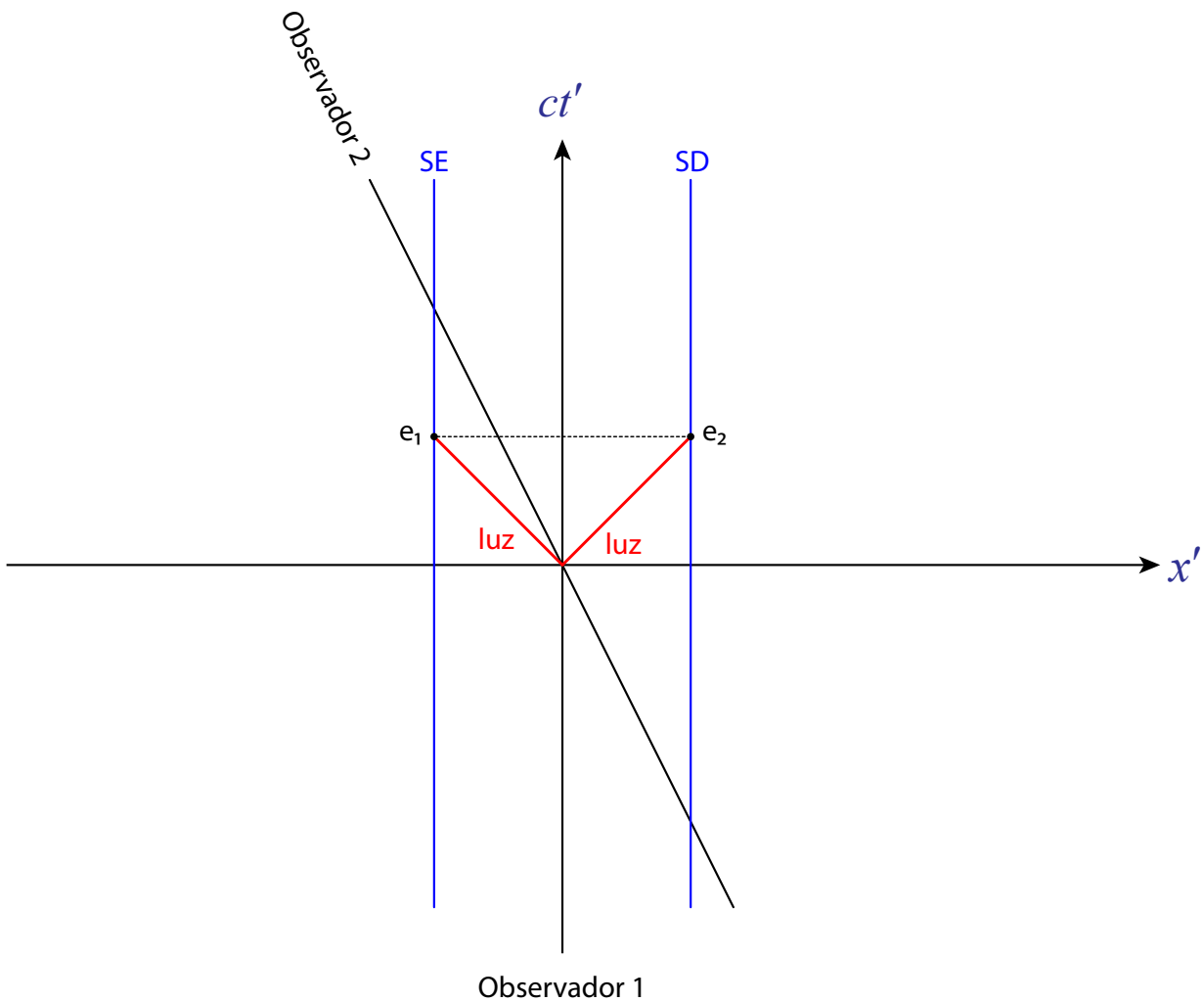


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 5 (b)

Figura 22 - Solução da atividade 5 (b)

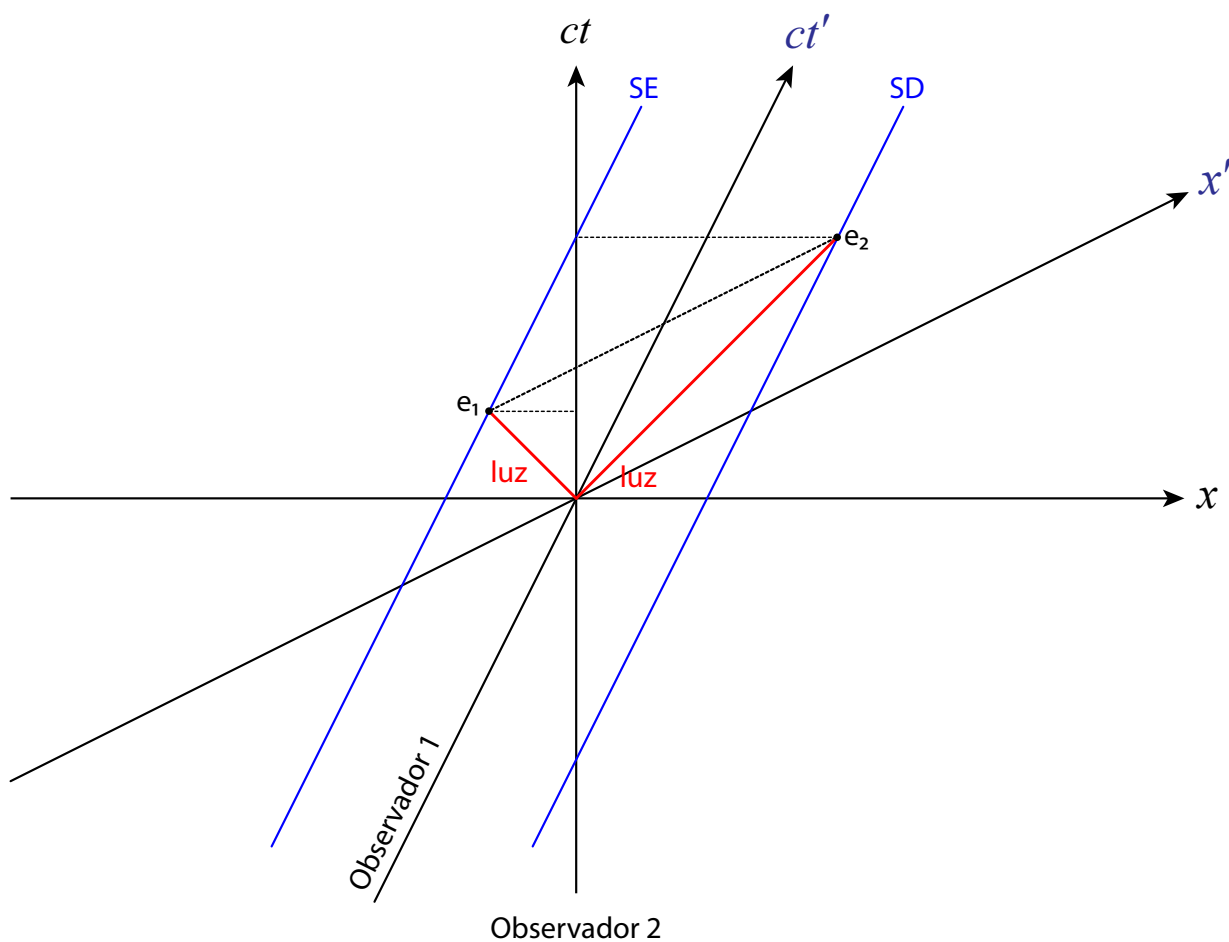


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 5 (c)

Figura 23 - Solução da atividade 5 (c)

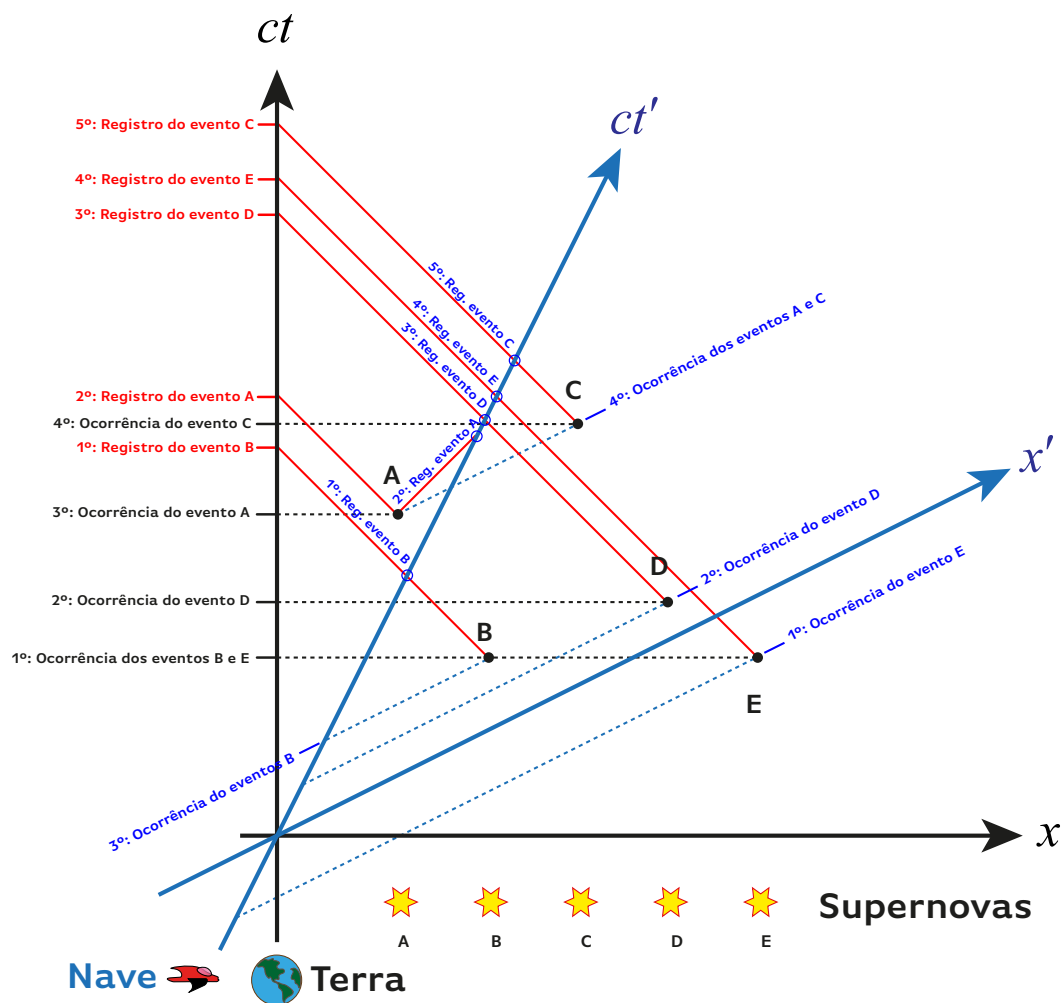


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 6 (a, b, c, d)

Figura 24 - Solução da atividade 6

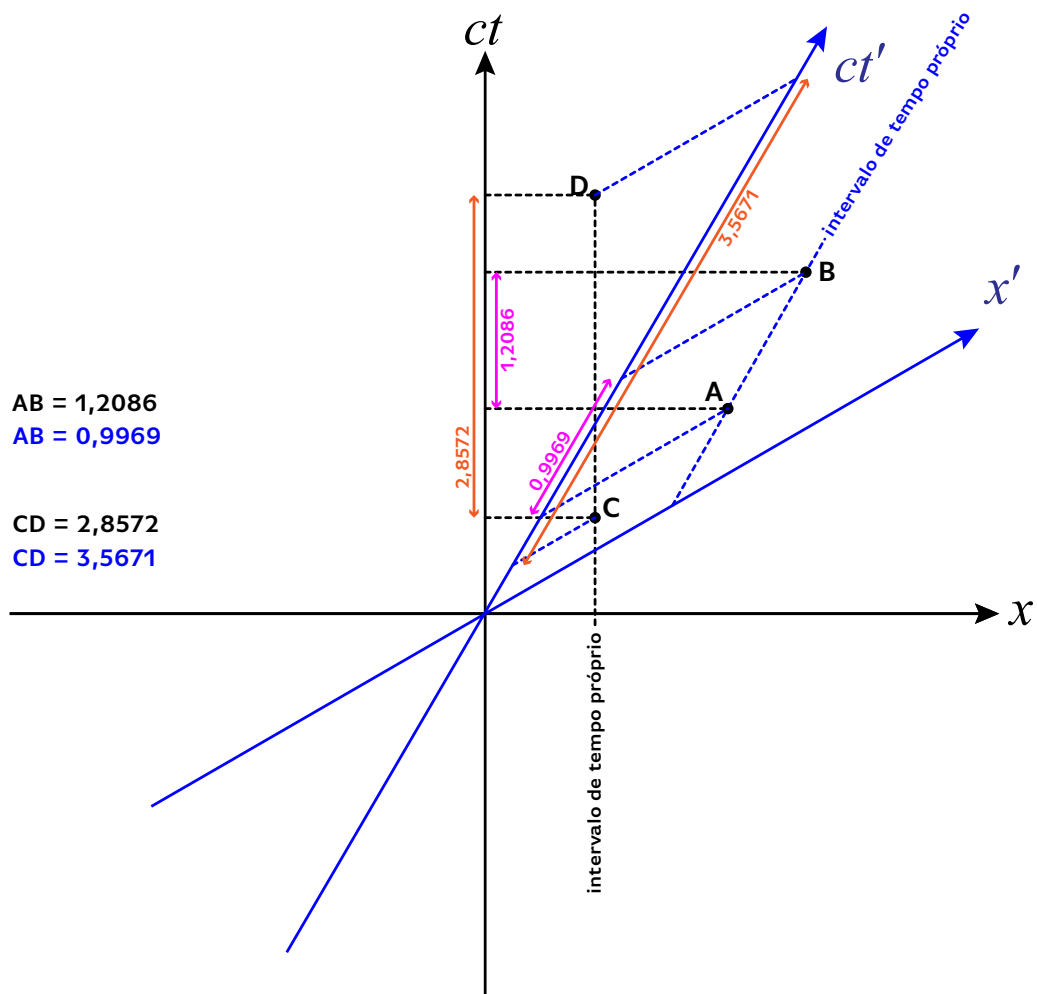


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 7 (a, b, c, d)

Figura 25 - Solução da atividade 7

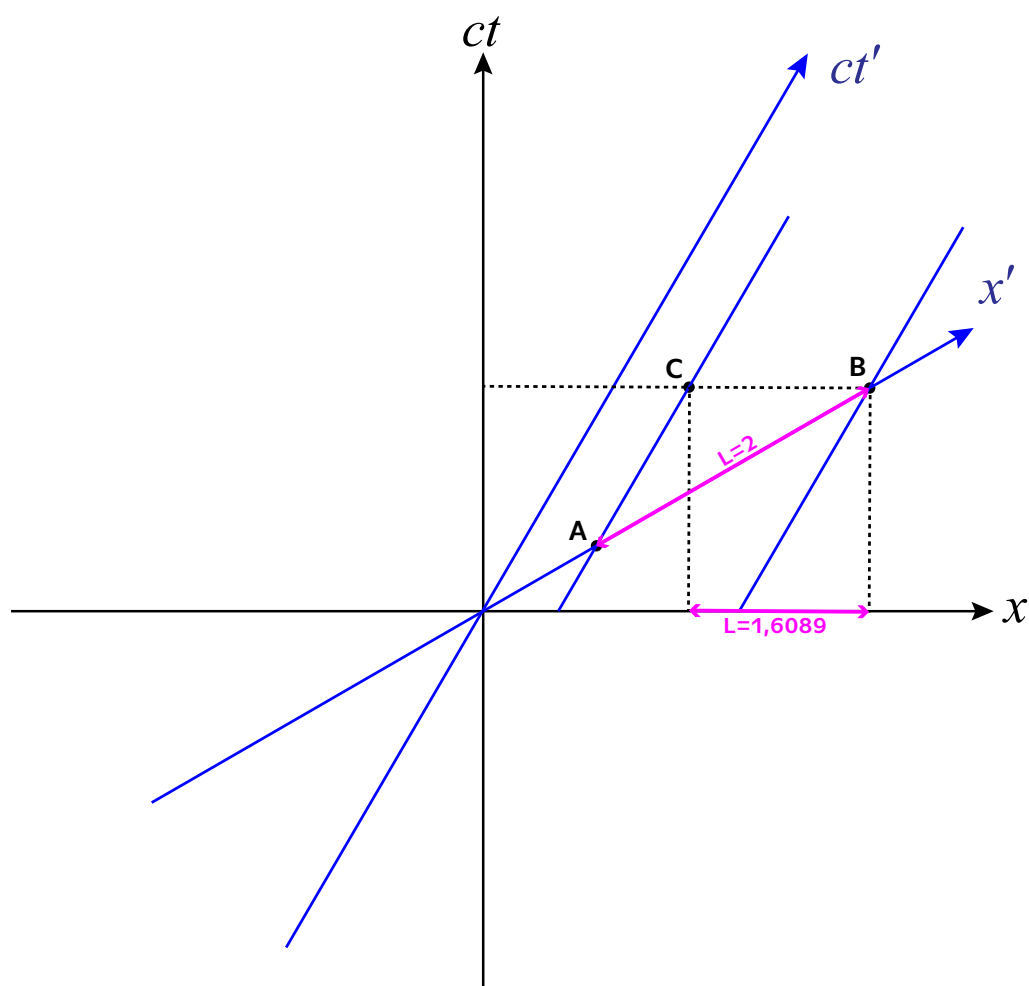


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 8 (a, b)

Figura 26 - Solução da atividade 8

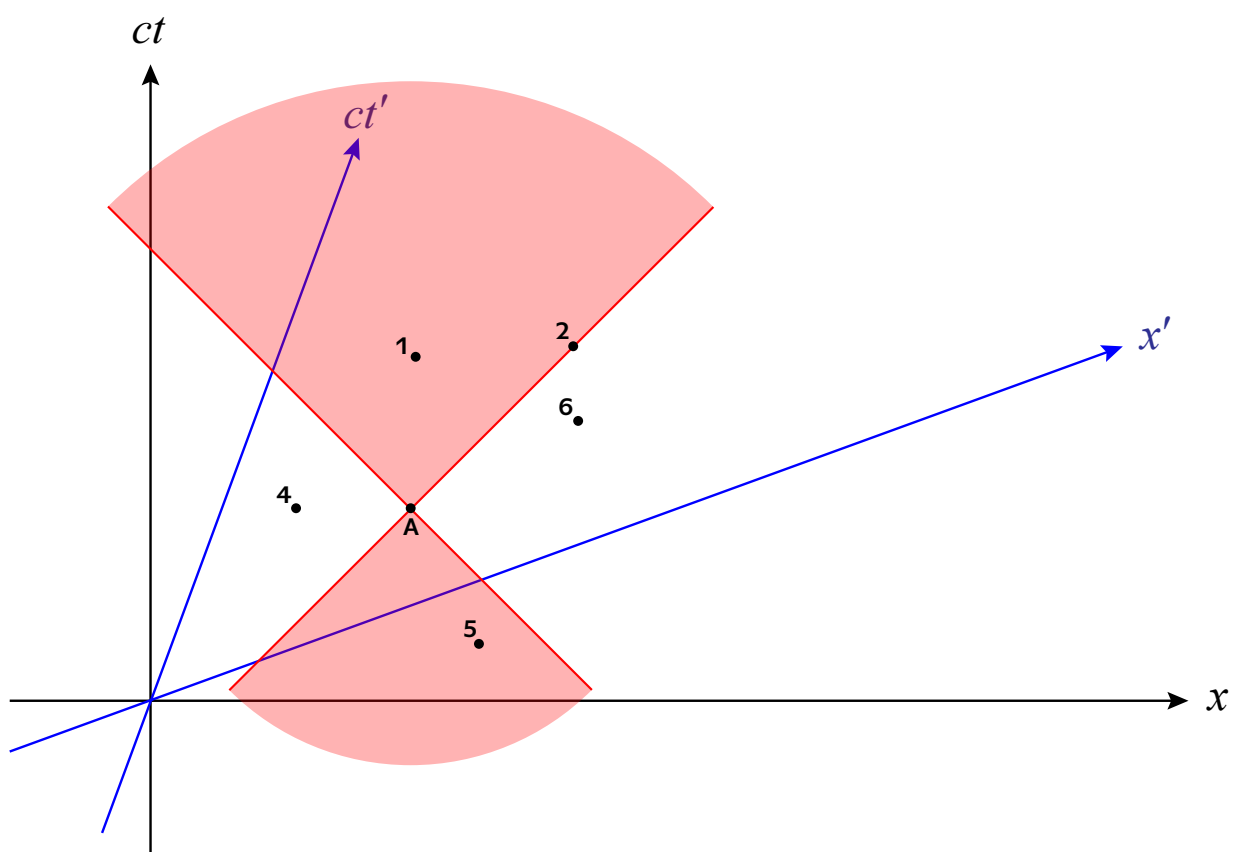


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 9 (a, b)

Figura 27 - Solução da atividade 9

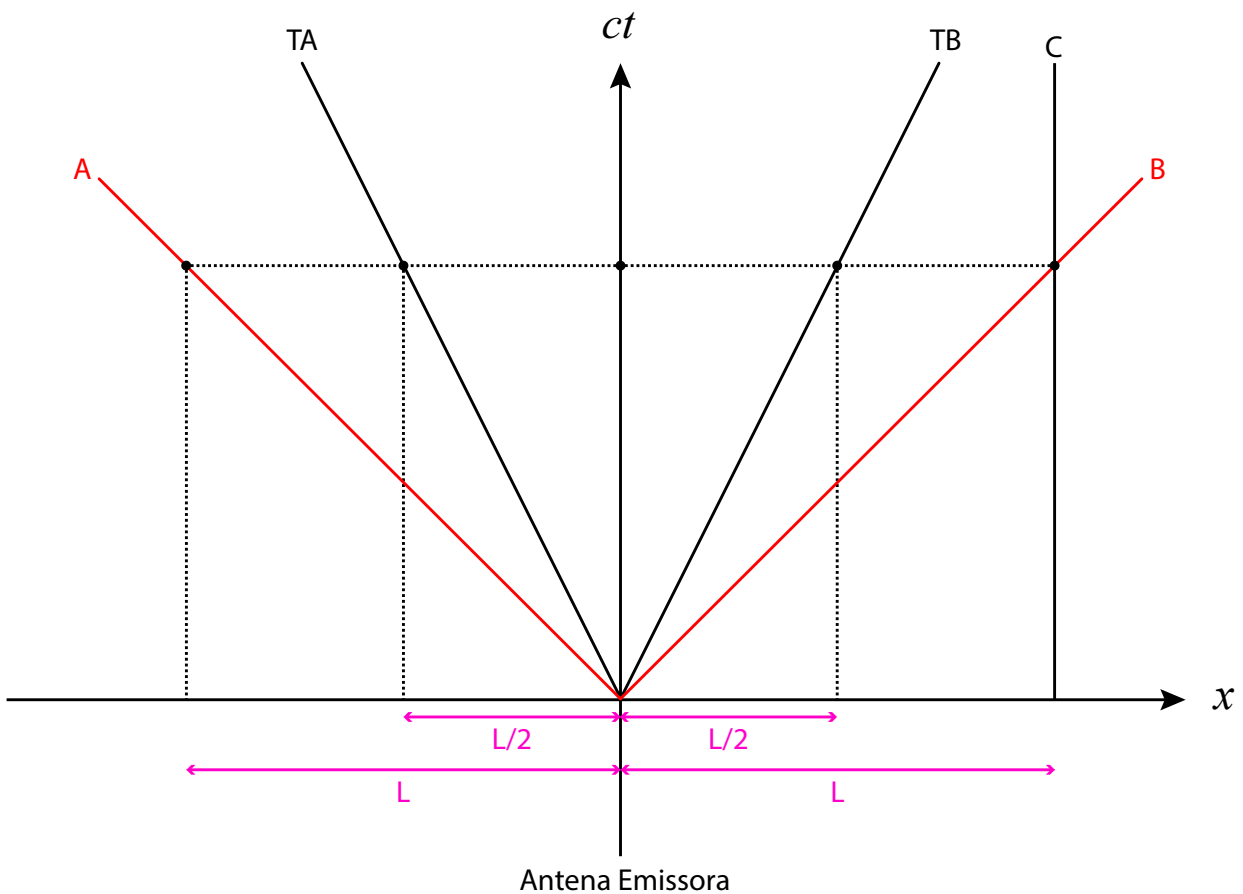


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 10 (a)

Figura 28 - Solução da atividade 10 (a)

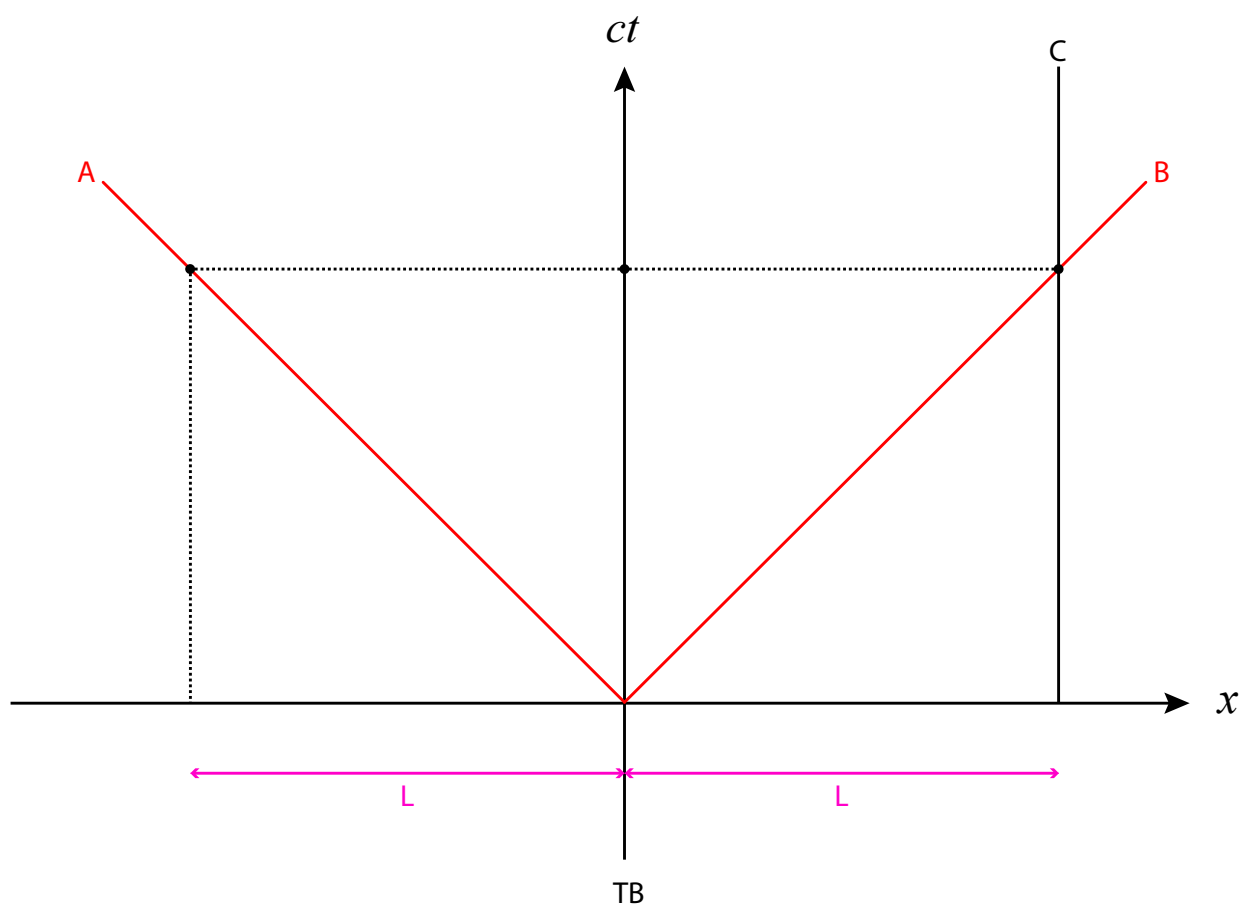


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 10 (b)

Figura 29 - Solução da atividade 10 (b)

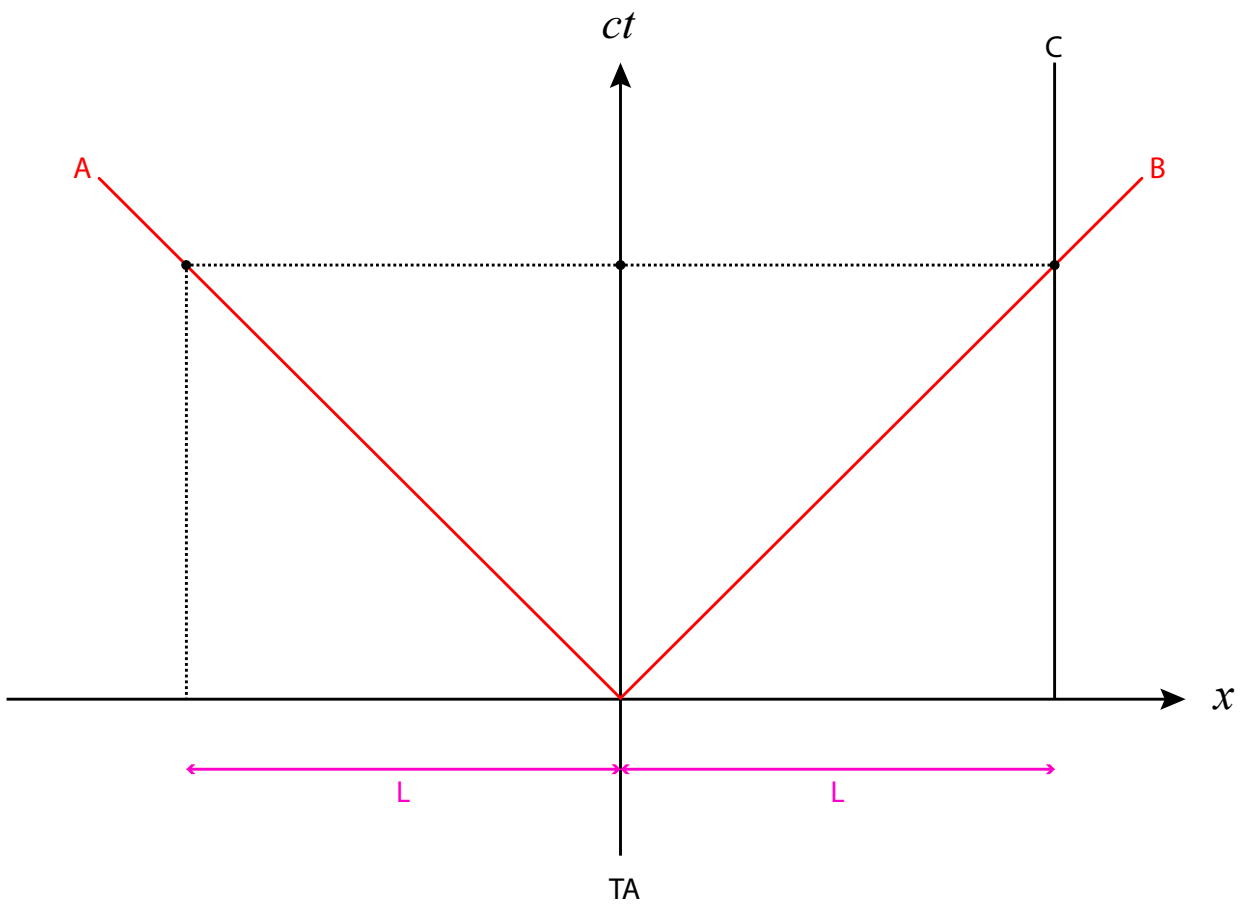


Fonte: Autoria própria (2022)

SOLUÇÃO DAS ATIVIDADES

ATIVIDADE 10 (c)

Figura 30 - Solução da atividade 10 (c)



Fonte: Autoria própria (2022)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O produto educacional em questão foi validado em uma escola da rede pública federal de ensino, especificamente o curso Técnico Integrado em Edificações do Instituto Federal do Paraná (IFPR), campus Foz do Iguaçu. No momento de sua implementação este curso possuía duração de quatro (4) anos e acontecia na modalidade integrado, onde o Ensino Médio e o Ensino Técnico ocorriam concomitantemente, tendo como proposta uma integração da base nacional comum curricular com as disciplinas da área técnica a qual o curso pertence.

Porém, dada a sua versatilidade, acredita-se que este produto também possa ser utilizado como material didático complementar sobre Teoria da Relatividade Restrita em cursos de níveis de instrução superiores ao da Educação Básica, como nos cursos de Licenciatura e Bacharelado em Física, tanto na modalidade de ensino presencial quanto no ensino à distância, assim como em ambientes formais ou informais de educação, desde que com condições estruturais mínimas para isso.

Dessa forma, a partir da apropriação deste produto por outros(as) professores(as) espera-se fomentar a inclusão de Física Moderna e Contemporânea nos currículos da Educação Básica, assim como contribuir para a superação de alguns desafios sugeridos pela literatura acerca do ensino-aprendizagem da Teoria da Relatividade Restrita.

Por fim, cabe salientar que este produto educacional está aberto a críticas e sugestões feitas por aqueles que vierem a se apropriar desta proposta, não sendo este um produto acabado. Acredita-se que através de sucessivas aplicações deste, contribuições irão surgir naturalmente e essas serão sempre bem vindas. Através das necessárias revisões demandadas por essas contribuições, espera-se não só alcançar os objetivos pretendidos quando no momento de sua elaboração, mas também atingir novos objetivos sugeridos dialéticamente por essas revisões. Somente assim, a partir de reflexões inerentes ao “chão de sala”, este produto educacional se tornará efetivo ao público a que se destina.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTIGOS

AYALA FILHO, A. L. A construção de um perfil para o conceito de referencial em Física e os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da teoria da relatividade restrita. **Investigações em Ensino de Ciências**, Pelotas, v. 15, n. 1, p. 155-179, jan. 2010. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/319/206>. Acesso em: 16 maio 2023.

CARVALHO JUNIOR, G. D. O esquema de movimento como organizador da ação em mecânica clássica e relativística. **Investigações em Ensino de Ciências**, Pelotas, v. 20, n. 3, 2015. Disponível em: <https://ienci.if.ufrgs.br/index.php/ienci/article/view/36>. Acesso em: 16 maio 2023.

CARVALHO JÚNIOR, G. D.; AGUIAR JUNIOR, O. G. Os campos conceituais de Vergnaud como ferramenta para o planejamento didático. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 25, n. 2, p. 207-227, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2008v25n2p207>. Acesso em: 16 maio 2023.

CAYUL, E.; ARRIASSECO, I. Utilización de los diagramas de Minkowski para la enseñanza de la Teoría Especial de la Relatividad en la escuela secundaria. **Revista de Enseñanza de La Física**, Córdoba, v. 27, n. 2, p. 232-331, nov. 2015. Disponível em: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revistaEF/article/view/12622/12898>. Acesso em: 16 maio 2023.

CONTO, G. et al. Cálculo K: Uma abordagem alternativa para a relatividade especial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 1-10, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/yFywBzqTYRJD6s7VXLR97jH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 16 maio 2023.

LIVROS

BOHM, D. **A teoria da relatividade restrita**. 1. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2015.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

RESNICK, R. **Introdução à relatividade especial**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1971.

TAKEUCHI, T. **An illustrated guide to relativity**. New York: Cambridge University Press, 2010.